Adaptado al nuevo RLAT (BOE 2008)

INSTALACIONES ELÉCTRICAS EN MEDIA Y BAJA TENSIÓN

José García Trasancos



SEXTA EDICIÓN

Paraninfo

INSTALACIONES ELÉCTRICAS EN MEDIA Y BAJA TENSIÓN

INSTALACIONES ELÉCTRICAS EN MEDIA Y BAJA TENSIÓN

6.ª Edición

José García Trasancos

PARANINFO

Paraninfo

Instalaciones eléctricas en media y baja tensión

© José García Trasancos

Gerente Editorial Área Ciclos Formativos:
María José López Raso

Asistente Editorial:
Alicia Cerviño González

Editora de Adquisiciones:
Carmen Lara Carmona

Producción:
Rafael García Jiménez

Diseño de cubierta:
Ediciones Nobel

Preimpresión:
José García Trasancos

Reservados los derechos para todos los países de lengua española. De conformidad con lo dispuesto en el artículo 270 del Código Penal vigente, podrán ser castigados con penas de multa y privación de libertad quienes reprodujeren o plagiaren, en todo o en parte, una obra literaria, artística o científica fijada en cualquier tipo de soporte sin la preceptiva autorización. Ninguna parte de esta publicación, incluido el diseño de la cubierta, puede ser reproducida, almacenada o transmitida de ninguna forma, ni por ningún medio, sea éste electrónico, químico, mecánico, electro-óptico, grabación, fotocopia o cualquier otro, sin la previa autorización escrita por parte de la Editorial.

COPYRIGHT © 2008 Ediciones Paraninfo, SA
6ª edición, 3ª impresión de 2010

Av. Filipinas, 50 Bajo A / 28003 Madrid, ESPAÑA
Teléfono: 902 995 240 / Fax: 914 456 218
clientes@paraninfo.es / www.paraninfo.es

ISBN: 978-84-283-3190-6
Depósito legal: M-26421-2010

(061/93/78)

Impreso en España / Printed in Spain
CLM, SL
Polígono Codein
Fuenlabrada (Madrid)

ÍNDICE

PRÓLOGO A LA PRIMERA EDICIÓN XV
NOTA A LA SEXTA EDICIÓN XVII

1. LÍNEAS DE DISTRIBUCIÓN 1
1.1. Clasificación de las líneas eléctricas según su tensión nominal 1
1.2. Producción transporte y distribución de energía eléctrica 2
1.3. Distribución de energía en corriente alterna 4
1.4. Cálculo de circuitos de corriente alterna 5
1.5. Sistema trifásico con cargas desequilibradas 10
1.6. Líneas de distribución abiertas y cerradas 17
1.7. Transmisión de información 18
1.8. Conductores utilizados en las líneas eléctricas 19
1.9. Designación de conductores aislados en media y baja tensión 21
Problemas de recapitulación 24

2. CÁLCULO ELÉCTRICO DE LÍNEAS 27
2.1. Cálculo de la sección de los conductores en las líneas de baja tensión en corriente alterna 27
2.2. Sección mínima de los conductores por criterio térmico 28
2.3. Cálculo de líneas por caída de tensión 38
2.4. Cálculo de líneas de baja tensión en corriente alterna con carga única . . . 38
2.5. Cálculo de líneas de distribución abiertas de sección uniforme 42
2.6. Cálculo de líneas de distribución abiertas de sección no uniforme 46
2.7. Cálculo de líneas de sección uniforme, alimentadas por dos extremos a la misma tensión 51
2.8. Cálculo de líneas cerradas en anillo 53
2.9. Cálculo de líneas de B.T. por medio de ábacos 54
2.10. Cálculo de líneas de corriente continua 56
2.11. Cálculo eléctrico de líneas de media tensión 57
2.12. Caída de tensión en las líneas de media tensión 58
2.13. Potencia máxima de transporte 62
2.14. Pérdidas de potencia 62
2.15. Sección mínima de los conductores para soportar un cortocircuito 64
Problemas de recapitulación 66

© Ediciones Paraninfo

3. LÍNEAS AÉREAS 69
3.1. Línea eléctrica aérea 69
3.2. Cables de aluminio acero utilizados en las líneas aéreas de distribución en media tensión. 69
3.3. Cálculo eléctrico de los conductores en las líneas aéreas de M.T. con cables de aluminio acero 70
3.4. Aisladores 73
3.5. Aislamiento suspendido en líneas de media tensión 73
3.6. Apoyos 74
3.7. Postes de hormigón en media y baja tensión 75
3.8. Apoyos metálicos de celosía para media tensión 77
3.9. Crucetas 78
3.10. Crucetas para apoyos de hormigón en media tensión 79
3.11. Crucetas para apoyos metálicos en media tensión 79
3.12. Herrajes 80
3.13. Antivibratorios 80
3.14. Empalmes y derivaciones en las líneas aéreas de media tensión 80
3.15. Cálculo mecánico de cables 81
3.16. Cálculo de la flecha 82
3.17. Ecuación del cambio de condiciones 84
3.18. Cálculos mecánicos de los conductores de la línea de M.T. 86
3.19. Cálculo de apoyos en las líneas de M.T. 93
3.20. Apoyos de alineación 94
3.21. Apoyos en ángulo 96
3.22. Apoyos de anclaje 98
3.23. Apoyos de fin de línea 99
3.24. Cargas verticales sobre los apoyos 100
3.25. Distancias de seguridad 100
3.26. Cables aislados de aluminio trenzados en haz utilizados en las líneas aéreas de baja tensión 101
3.27. Sujeciones y accesorios en las líneas aéreas de baja tensión 102
3.28. Empalmes y conexiones 103
3.29. Empalmes y derivaciones en las líneas aéreas de baja tensión 103
3.30. Derivaciones para acometidas 104
3.31. Tomas de tierra en las líneas de B.T. 105
3.32. Cálculo eléctrico en las líneas de distribución en baja tensión 105

© Ediciones Paraninfo

3.33. Cálculo mecánico de cables aislados de aluminio trenzados en haz en líneas aéreas de baja tensión 107
3.34. Cálculo de los apoyos en líneas aéreas de baja tensión 110
3.35. Cruzamientos, proximidades y paralelismos en las líneas de B.T. 111
3.36. Cimentaciones 112
3.37. Puesta a tierra de los apoyos 113
3.38. Cimentación y elevación de apoyos 114
3.39. Tendido de cables 114
3.40. Tensado de cables 115
3.41. Instalación de líneas aéreas de media tensión con conductores de aluminio acero 115
3.42. Instalación de líneas aéreas de baja tensión 115
3.43. Señalización de seguridad en las líneas aéreas 116
3.44. Apertura de calles en zonas de arbolado para líneas de media tensión . . . 116
Problemas de recapitulación 117

4. LÍNEAS SUBTERRÁNEAS 119
4.1. Líneas subterráneas 119
4.2. Cables subterráneos 119
4.3. Cables aislados subterráneos para media tensión 120
4.4. Cálculo de líneas subterráneas de media tensión 121
4.5. Empalme, derivación y terminal 123
4.6. Empalmes subterráneos en media tensión 123
4.7. Terminales de cables subterráneos para media tensión 124
4.8. Cables subterráneos para líneas de baja tensión 125
4.9. Cálculo de líneas subterráneas de baja tensión 126
4.10. Empalmes y derivaciones en B.T. 129
4.11. Registro o arqueta 129
4.12. Arquetas de registro para canalizaciones subterráneas de media y baja tensión 129
4.13. Armarios de urbanización 130
4.14. Excavación y preparación de la zanja 130
4.15. Señalización de líneas subterráneas 130
4.16. Rellenado de la zanja 130
4.17. Zanjas y canalizaciones en media tensión 131
4.18. Zanjas y canalizaciones en baja tensión 132

© Ediciones Paraninfo

4.19. Tendido de cables 132
Problemas de recapitulación 133

5. APARAMENTA Y PROTECCIÓN 135
5.1 Aparamenta eléctrica 135
5.2. Parámetros característicos de los aparatos eléctricos 135
5.3. Interruptor 136
5.4. Interruptor automático 137
5.5. Interruptor magnetotérmico 138
5.6. Seccionador 139
5.7. Fusible 140
5.8. Fusibles de B.T. 141
5.9. Contactor 142
5.10. Protección de las instalaciones contra sobrecargas 145
5.11. Protección de las instalaciones contra cortocircuitos 147
5.12. Cálculo de la intensidad de cortocircuito 149
5.13. Elección de un interruptor automático 150
5.14. Selectividad en las protecciones contra sobreintensidades 150
5.15. Puesta a tierra 154
5.16. Partes de una puesta a tierra 154
5.17. Tipos de electrodos utilizados en las puestas a tierra 154
5.18. Cálculo aproximado de la resistencia de puesta a tierra de los electrodos . 155
5.19. Soldadura aluminotérmica 156
5.20. Tensión de paso y tensión de contacto 157
5.21. Medida de una toma de tierra 158
5.22. Medida de la resistividad del terreno 158
5.23. Peligrosidad de la corriente eléctrica 159
5.24. Interruptor diferencial 160
5.25. Protección contra contactos directos 161
5.26. Protección contra contactos indirectos 163
5.27. Elección de un interruptor diferencial 165
5.28. Selectividad entre interruptores diferenciales 166
5.29. Protección de las líneas eléctricas 167
5.30. Relés de protección 167
5.31. Protección de las líneas contra sobrecargas 168
5.32. Protección de las líneas de distribución contra cortocircuitos 168

© Ediciones Paraninfo

5.33. Sobretensiones en las líneas 169
5.34. Protección de las líneas de distribución contra sobretensiones 170
5.35. Medida del aislamiento de una línea 170
5.36. Medidas de seguridad para trabajos sin tensión 170
5.37. Trabajos en tensión 170
5.38. Determinación de averías en las líneas 171
5.39. Localización de averías en las líneas 171
5.40. Verificaciones e inspecciones en las líneas de AT 173
5.41. Mantenimiento de líneas aéreas 173
5.42. Mantenimiento y averías en las líneas subterráneas 174
Problemas de recapitulación 175

6. CENTROS DE TRANSFORMACIÓN 177
6.1. Centro de transformación 177
6.2. Régimen de neutro en el C.T. 178
6.3. Componentes del C.T. 178
6.4. Transformador 179
6.5. Protecciones propias del transformador 181
6.6. Protección contra defectos internos 181
6.7. Protección contra sobrecargas y cortocircuitos 182
6.8. Protección contra las sobretensiones 183
6.9. Protección contra incendios 184
6.10. Alumbrado, señalización y material de seguridad 184
6.11. Cuadro general de baja tensión 184
6.12. Medidas 185
6.13. Cálculos eléctricos del centro de transformación 185
6.14. Centros de transformación intemperie sobre poste 191
6.15. Centros de transformación de interiores 198
6.16. Ventilación del centro de transformación 204
6.17. Verificaciones previas a la conexión de un centro de transformación 206
6.18. Maniobras de conexión y desconexión en el centro de transformación . . . 206
6.19. Mantenimiento de los centros de transformación 207
6.20. Cálculo de la toma de tierra 207
Problemas de recapitulación 213

© Ediciones Paraninfo

7. TARIFACIÓN ELÉCTRICA 215
7.1. Contador monofásico de inducción 215
7.2. Contadores trifásicos 215
7.3. Contadores de impulsos 217
7.4. Contadores electrónicos 217
7.5. Regletas de verificación 218
7.6. Coeficiente de facturación 218
7.7. Medida del factor de potencia con voltímetro, amperímetro y vatímetro . . . 219
7.8. Medida del factor de potencia con fasímetro 220
7.9. Medida del factor de potencia con analizador de redes 220
7.10. Medida del factor de potencia con contadores de energía activa y reactiva 220
7.11. Tarifas eléctricas 221
4.12. Tarifas eléctricas reguladas en baja tensión 223
7.13. Potencia de facturación 224
7.14. Discriminación horaria en tarifas eléctricas reguladas 226
7.15. Complemento por energía reactiva en tarifas reguladas 227
7.16. Tarifas de acceso en baja tensión 228
7.17. Estructura de las tarifas de acceso 228
7.18. Otros conceptos de la facturación 230
7.19. Tarifas eléctricas de acceso en alta tensión 233
7.20. Medida en B.T. y facturación en A.T. 236
7.21. Corrección del factor de potencia 236
7.22. Cálculo de la potencia reactiva 238
7.23. Instalación de la batería de condensadores 240
Problemas de recapitulación 242

8. INSTALACIONES DE ENLACE E INTERIORES 245
8.1. Instalaciones de enlace 245
8.2. Acometida en B.T. 245
8.3. Acometida aérea 246
8.4. Acometida subterránea 246
8.5. Acometida mixta 246
8.6. Caja general de protección y bases tripolares verticales 247
8.7. Línea general de alimentación 248
8.8. Equipo de medida 249

© Ediciones Paraninfo

8.9. Derivación individual 249
8.10. Cuadro privado de mando y protección 252
8.11. Instalaciones interiores 252
8.12. Canalizaciones eléctricas en B.T. 252
8.13. Proceso de trabajo en una instalación empotrada bajo tubo 253
8.14. Instalaciones domésticas 253
8.15. Instalaciones en el interior de la vivienda 255
8.16. Instalación de ascensor 259
8.17. Instalaciones en edificios singulares 264
8.18. Instalaciones de emergencia 265
8.19. Instalaciones industriales 271
8.20. Instalaciones eléctricas de seguridad contra incendios 282
8.21. Instalaciones temporales y de obras 283
8.22. Instalación de pararrayos 284
8.23. Puesta a tierra en edificios 285
8.24. Conductores de puesta a tierra 286
8.25. Número de picas necesarias para la instalación de puesta a tierra en un edificio 286
8.26. Número de picas necesarias para la instalación de puesta a tierra provisional 288
8.27. Proceso a seguir en la instalación de electrodos 288
8.28. Control de la realización de la instalación de puesta a tierra 289
8.29. Prueba de funcionamiento de la instalación de puesta a tierra 290
8.30. Mantenimiento de las puestas a tierra 290
8.31. Puesta en servicio e inspección de las instalaciones eléctricas de B.T. . . . 290
Problemas de recapitulación 292

9. ILUMINACIÓN 295
9.1. Luz 295
9.2. Fuentes de luz eléctrica 295
9.3. Magnitudes luminosas y unidades 296
9.4. Características y propiedades de las lámparas 297
9.5. Lámparas de incandescencia convencionales 298
9.6. Lámparas de incandescencia halógenas 299
9.7. Lámparas o tubos fluorescentes 299
9.8. Lámparas de vapor de mercurio alta presión 301

© Ediciones Paraninfo

9.9. Lámparas de luz mezcla 302
9.10. Lámparas de halogenuros metálicos 302
9.11. Lámparas de vapor de sodio baja presión 303
9.12. Lámparas de vapor de sodio alta presión 303
9.13. Lámparas de inducción 304
9.14. Luminarias 304
9.15. Clases de protección eléctrica 305
9.16. Índices de protección de las luminarias 305
9.17. Leyes fundamentales de la luminotecnia 306
9.18. Diagramas de iluminación 308
9.19. Alumbrado de interiores 311
9.20. Cálculo de un alumbrado de interior 311
9.21. Rendimiento de la iluminación 314
9.22. Factor de conservación 315
9.23. Control y regulación de las instalaciones de alumbrado de interiores 316
9.24. Alumbrado exterior 318
9.25. Cálculo del alumbrado de exteriores por el método del flujo luminoso . . . 318
9.26. Luminarias para el alumbrado exterior 321
9.27. Curvas de utilización 321
9.28. Alimentación y control de las instalaciones de alumbrado de exteriores . . 323
9.29. Alumbrado con proyectores 326
9.30. Mantenimiento de las instalaciones de alumbrado 328
Problemas de recapitulación 329

A. CORRIENTE ALTERNA 331
A.1. Corriente alterna 331
A.2. Período, frecuencia y alternancia de la corriente alterna 331
A.3. Valores característicos de las magnitudes alternas 331
A.4. Representación gráfica de una magnitud alterna senoidal 332
A.5. Circuitos simples de corriente alterna 333
A.6. Circuito serie de corriente alterna 335
A.7. Construcciones gráficas 336
A.8. Principio de separación de potencias 337
A.9. Circuito paralelo de corriente alterna 337
A.10. Resonancia 338
A.11. Corriente alterna trifásica 339

© Ediciones Paraninfo

A.12. Representación gráfica de magnitudes trifásicas 340
A.13. Conexión en estrella 340
A.14. Conexión en triángulo 341
A.15. Potencia en corriente alterna trifásica 342
A.16. Cálculo de un circuito trifásico equilibrado 342
A.17. Aplicación de los números complejos al cálculo de circuitos en corriente alterna senoidal 343
Problemas resueltos 344
Problemas propuestos 350

B. TRANSFORMADOR 353
B.1. Transformador 353
B.2. Constitución y principio de funcionamiento de un transformador monofásico 353
B.3. Transformador ideal 354
B.4. Transformador real 355
B.5. Caída de tensión en el transformador 358
B.6. Corriente de cortocircuito 359
B.7. Transformador trifásico 359
B.8. Conexión en paralelo de transformadores 361
B.9. Autotransformador 362
B.10. Transformadores de medida 363
Problemas resueltos 367
Problemas propuestos 372

C. PROYECTO TÉCNICO 375
C.1. Proyecto técnico 375
C.2. Fases de un proyecto técnico 375
C.3. Documentos del proyecto técnico 377
C.4. Tramitación de los proyectos técnicos 383
C.5. Estudio previo del proyecto de una instalación eléctrica de baja tensión . . . 383

D. SÍMBOLOS GRÁFICOS 385

E. SOLUCIÓN A LOS PROBLEMAS DE RECAPITULACIÓN 391

BIBLIOGRAFÍA 421

© Ediciones Paraninfo

PRÓLOGO A LA PRIMERA EDICIÓN

En el estudio de la tecnología, junto con el conocimiento manipulativo de una profesión, los procesos de análisis y síntesis son fundamentales para que este conocimiento no sea un conjunto de recetas junto a una descripción de aparatos. Se pretende en este libro que los alumnos adquieran conceptos claros de las instalaciones eléctricas de media y baja tensión, que permitan su aplicación en cálculos, que deben completar usando e interpretando catálogos de casas comerciales, proyectos tipo y programas informáticos.

Por su contenido está dirigido a los alumnos de ciclos formativos de electricidad, especialmente al ciclo superior de Instalaciones Electrotécnicas. Puede, sin embargo, ser utilizado también en el ciclo medio de Equipos e Instalaciones Electrotécnicas atendiendo más a su parte descriptiva y conceptual que a los cálculos.

Es útil también para técnicos instaladores electricistas y para proyectistas de estas instalaciones; así como para los alumnos que acceden a estudios técnicos sin pasar por la formación profesional.

El libro consta de nueve capítulos y cuatro apéndices.

El primer Capítulo, "Líneas de distribución," trata de la distribución de energía eléctrica en corriente alterna y del cálculo de circuitos monofásicos y trifásicos.

El segundo Capítulo, "Cálculo eléctrico de líneas," abarca el cálculo eléctrico en baja y media tensión de las líneas eléctricas, por caída de tensión, pérdida de potencia y cortocircuito.

Los Capítulos 3 y 4, "Líneas aéreas" y Líneas subterráneas," estudian la constitución de estas líneas en baja y media tensión, su cálculo con los conductores más utilizados, incluyendo el cálculo mecánico de conductores y apoyos en las líneas aéreas.

El Capítulo 5, "Aparamenta y protección," trata de los aparatos utilizados para maniobra y protección de las líneas, averías, mantenimiento de las mismas y cálculo de las protecciones.

En el Capítulo 6, "Centros de transformación," se estudia la constitución, cálculos, maniobra y mantenimiento en los centros de transformación de intemperie e interiores.

© Ediciones Paraninfo

El Capítulo 7, "Tarifación," se ocupa de la medida de la energía eléctrica, tarifas en baja y media tensión, así como de la mejora del factor de potencia.

El Capítulo 8, "Instalaciones de enlace e interiores," sobre la constitución y cálculo de las instalaciones de enlace, además de las instalaciones domésticas, singulares e industriales en el interior de edificios.

El Capítulo 9, "Iluminación," trata de las fuentes de luz, constitución, mantenimiento y cálculo de alumbrados de interiores y exteriores.

Cada capítulo consta de teoría y problemas de aplicación, resueltos unos, y con los resultados indicados, otros. Al final de cada capítulo, y como síntesis de lo tratado en él, se plantean problemas de recapitulación con los resultados.

El Apéndice A, "Corriente alterna," es un resumen de las leyes y fórmulas de corriente alterna monofásica y trifásica. Completa el capítulo primero para todos los que necesiten conocer la teoría de circuitos de corriente alterna, antes de abordar los problemas de aplicación. Consiste en un resumen teórico,con problemas resueltos y otros para resolver con los resultados especificados.

El Apéndice B, "Transformador," es un resumen de la constitución y funcionamiento de esta máquina eléctrica. Completa el Capítulo 6, para todos los que necesiten conocer la teoría del transformador, antes de abordar el estudio de los centros de transformación. Consiste en un resumen teórico, con problemas resueltos y otros para resolver con indicación de los resultados.

El Apéndice C, "Proyecto técnico," consiste en unas indicaciones sobre el proyecto técnico en general, análisis de los documentos de que consta y estudio previo para la realización del proyecto de una instalación eléctrica.

El Apéndice D, "Símbolos gráficos," es un cuadro de símbolos eléctricos, que contiene todos los utilizados en el libro.

Quiero agradecer la colaboración de todas aquellas empresas que me facilitaron información sobre instalaciones eléctricas, especialmente a Unión Fenosa, por permitirme utilizar datos y gráficos de sus unidades constructivas, de líneas eléctricas y centros de transformación.

Mi agradecimiento también a todas las personas que desinteresadamente me han ayudado en la confección de este libro, especialmente a los ingenieros técnicos industriales, D. Antonio Picado Rodríguez y D. Arcadio Seco Falcón, que revisaron los capítulos de Líneas aéreas y Tarificación, y D. José Carlos Pérez Fernández, que hizo una revisión de los problemas que aparecen en el libro y una atenta corrección del texto.

EL AUTOR

© Ediciones Paraninfo

NOTA A LA SEXTA EDICIÓN

En la edición anterior se recogió la adaptación al nuevo Reglamento electrotécnico de baja tensión y se ampliaba con el apéndice E, "Solución a los problemas de recapitulación". También se planteaba mediante el acceso a la página Web de la editorial, una colección de pruebas objetivas sobre cada capítulo.

En esta sexta edición, se mantienen las ampliaciones de la edición anterior y se actualiza todo el libro para adaptarlo a nuevas normas que le afectan, especialmente:

En instalaciones interiores, norma UNE 20460-5-523: 2004.

En líneas de distribución, norma UNE 211435: 2007.

En alta tensión, Reglamento sobre condiciones técnicas y garantías de seguridad en líneas eléctricas de alta tensión y sus instrucciones técnicas complementarias (Real Decreto 223/2008).

En tarifación eléctrica, tarifas eléctricas actuales (Orden ITC/3801/2008).

El conjunto de pruebas objetivas sobre cada capítulo se han corregido y ampliado hasta 350 test.

Se mantiene como objetivo, que simultáneamente con el estudio de los fenómenos físicos implicados, el estudiante debe obtener soltura en los métodos de cálculo necesarios para resolver los problemas que se le plantean en la práctica como técnico electricista.

EL AUTOR

© Ediciones Paraninfo

1 LÍNEAS DE DISTRIBUCIÓN

1.1. CLASIFICACIÓN DE LAS LÍNEAS ELÉCTRICAS SEGÚN SU TENSIÓN NOMINAL

Tensión nominal de una instalación o aparato eléctrico es el valor de tensión asignado y al cual se refieren sus características.

Tensión nominal en una línea trifásica de corriente alterna es el valor convencional de la tensión eficaz entre fases de la línea. La frecuencia de la corriente alterna normalizada en Europa es de 50 Hz.

La clasificación de las líneas según su tensión es la siguiente:

1) *Líneas de baja tensión (B.T.)*: Son las que tienen una tensión nominal menor o igual a 1 000 V para corriente alterna y 1 500 V para corriente continua, según el artículo 2° del Reglamento electrotécnico para baja tensión (REBT).
Las tensiones nominales normalizadas son:

Tabla 1.1

	Corriente alterna (Valor eficaz)	Corriente continua (Valor medio aritmético)
Muy baja tensión..	$U_n \leq 50$ V	$U_n \leq 75$ V
Tensión usual.....	$50 < U_n \leq 500$ V	$75 < U_n \leq 750$ V
Tensión especial...	$500 < U_n \leq 1000$ V	$750 < U_n \leq 1500$ V

Las tensiones nominales usuales en distribuciones de corriente alterna serán: 230 V para redes trifásicas de tres conductores, 400 V entre fases y 230 V entre fase y neutro para redes trifásicas de cuatro conductores. La frecuencia de la red será de 50 Hz, (artículo 4° del REBT).

2) *Líneas de alta tensión (A.T.)*: Son las líneas que tienen una tensión nominal mayor de 1 000 V. Se clasifican en cuatro categorías, según el artículo 3 del Reglamento técnico de líneas eléctricas aéreas de alta tensión (RLAT):

- Líneas de categoría especial. Son de tensión nominal igual o superior a 220 kV y las de tensión inferior que forman parte de la red de transporte.
- Líneas de primera categoría. Son de tensión nominal mayor de 66 kV e inferior a 220 kV.
- Líneas de segunda categoría. De tensión nominal mayor de 30 kV e igual o inferior a 66 kV.
- Líneas de tercera categoría. De tensión nominal igual o inferior a 30 kV y superior a 1 kV.

La tensión nominal superior a 400 kV, debe autorizarla la Administración.

© Ediciones Paraninfo

Las empresas productoras y distribuidoras de energía eléctrica dividen las líneas de Alta Tensión de la forma siguiente:

- Media Tensión (M.T.). De tensión nominal igual o mayor de 1 kV hasta 50 kV.
- Alta Tensión (A.T.). De tensión nominal superior a 50 kV hasta 300 kV.
- Muy Alta Tensión (M.A.T.). De tensión nominal superior a 300 kV e inferior a 800 kV
- Ultra Alta Tensión (U.A.T.). De tensión igual o superior a 800 kV.

Las líneas de transmisión de energía en A.T. suelen ser aéreas, y para distribución en M.T. las líneas son aéreas o subterráneas.

1.2. PRODUCCIÓN TRANSPORTE Y DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

La energía eléctrica se produce (fig. 1.1) en la central generadora (1) a una tensión que no suele sobrepasar los 25 kV. En la subestación elevadora (2) se eleva a tensión de transporte (380 kV, 220 kV o 132 kV) para la línea (3) que transporta la energía a alta tensión (A.T.) hasta la estación reductora (4), que distribuye la tensión para líneas de 2ª o 3ª categoría. La línea de distribución (5) lleva la energía a centros de gran consumo o a centros de transformación (6) que disminuyen la tensión a 400 V y, con las líneas de distribución (7) en baja tensión (B.T.), se suministra energía a los abonados, que conectan a la línea mediante acometidas (8).

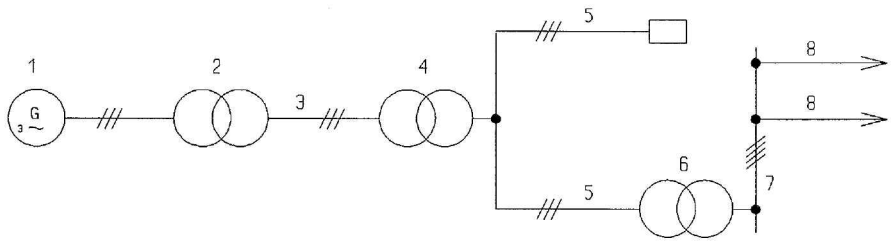


Fig. 1.1

La energía eléctrica producida en la central puede ser distribuida directamente (fig. 1.2) cuando la utilización es próxima a la central generadora (1). En este caso la energía producida a M.T. es utilizada directamente (2) o mediante centro de transformación (3), distribuida en B.T. (4).

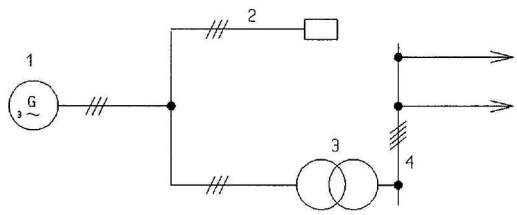


Fig. 1.2

La elección de tensión de una línea depende de características técnicas y económicas diversas:

© Ediciones Paraninfo

- Aislamiento de las máquinas y aparatos. El transformador es una máquina eléctrica estática fácilmente aislable, pero el alternador que genera la corriente alterna, al tener partes móviles, tiene más dificultad de aislamiento y produce tensiones como máximo a 30 kV.
- Economía. A igualdad de potencia aparente, la intensidad de corriente disminuye al aumentar la tensión. Por ello es conveniente para el transporte de energía eléctrica que la tensión sea lo más elevada posible, lo que disminuye la sección necesaria de los conductores al pasar por ellos menor intensidad de corriente.
- Seguridad. La seguridad contra los peligros de la corriente eléctrica aumenta al disminuir la tensión, por lo que se usan tensiones bajas en la utilización. La mayoría de los aparatos eléctricos funcionan en baja tensión, por lo que es necesario, mediante transformadores, reducir la tensión para la utilización de la energía eléctrica.

Las instalaciones eléctricas están generalmente alimentadas en derivación, a tensión prácticamente constante.

Las instalaciones alimentadas en serie o a corriente constante sólo se utilizan en casos bien determinados, como instalaciones de electrólisis o en algún tipo de iluminación.

PROBLEMAS DE APLICACIÓN[1]

1.2-1. Se desea construir una línea eléctrica trifásica para transportar a M.T. una potencia de 2 MVA. Calcular:

a) Intensidad de línea si la tensión de línea es de 20 kV.
b) Sección mínima del conductor de cobre necesario si se admite una densidad de corriente de 3 A/mm^2.
c) Intensidad de línea si la tensión de línea es de 6 kV.
d) Sección mínima del conductor de cobre necesario si se admite la misma densidad de corriente que para la línea de 20 kV.
e) Máxima potencia aparente a transportar con una sección de 70 mm^2 y densidad de corriente máxima de 4 A/mm^2.

a) La potencia aparente $S = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_L$; de donde la intensidad de línea.

$$I_L = \frac{S}{\sqrt{3}\, V_L} = \frac{2 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \,.\, 20\,000} = 57{,}74 \text{ A}$$

b) La densidad de corriente $\delta = \frac{I_L}{s}$. La sección mínima $s = \frac{I_L}{\delta} = \frac{57{,}74}{3} = 19{,}25 \text{ mm}^2$

[1]Para aplicar las fórmulas de los circuitos fundamentales de corriente alterna, consultar el Apéndice A: "Corriente alterna"

© Ediciones Paraninfo

c) La intensidad de línea: $I_L = \dfrac{S}{\sqrt{3}\,V_L} = \dfrac{2\cdot 10^6}{\sqrt{3}\cdot 6\,000} = 192{,}45\,A$

d) La sección mínima: $s = \dfrac{I_L}{\delta} = \dfrac{192{,}45}{3} = 64{,}15\ \text{mm}^2$

e) La máxima intensidad de corriente: $I_{L\,máx} = s\cdot\delta = 70\cdot 4 = 280\ \text{A}$

La máxima potencia aparente: $S_{máx} = \sqrt{3}\cdot V_L \cdot I_{L\,máx} = \sqrt{3}\cdot 20\,000\cdot 280 = 9\,699\,485\ \text{VA}$

1.2-2. En una línea trifásica de distribución en M.T. se utiliza un conductor de aluminio de sección nominal 120 mm^2. Si se admite una densidad de corriente de 3 A/mm^2. Calcular:

a) Máxima intensidad de corriente que puede circular por la línea.

b) Máxima potencia aparente a transportar si la tensión de línea es de 20 kV.

Solución: a) 360 A; b) 12,47 MVA

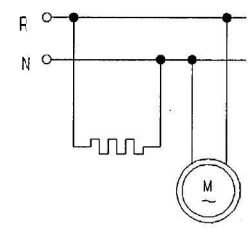


Fig. 1.3

1.3. DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA EN CORRIENTE ALTERNA

En la construcción de una red de distribución de energía eléctrica se pretende conseguir:

- Buena calidad de servicio: mantenimiento de la tensión y frecuencia, con continuidad de servicio.
- Posibilidad de soportar aumento de consumo.
- Construcción simple y económica.

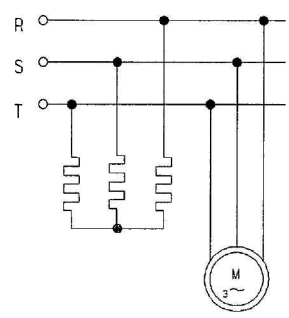


Fig. 1.4

La distribución de energía eléctrica se realiza de varias formas:

1) Monofásica, a dos conductores (fig. 1.3). para alimentación de reducido consumo en B.T.
2) Trifásica, a tres conductores (fig. 1.4). Se utiliza para distribución en A.T. y en B.T. (En este caso solamente para receptores trifásicos equilibrados, con las tres fases iguales).

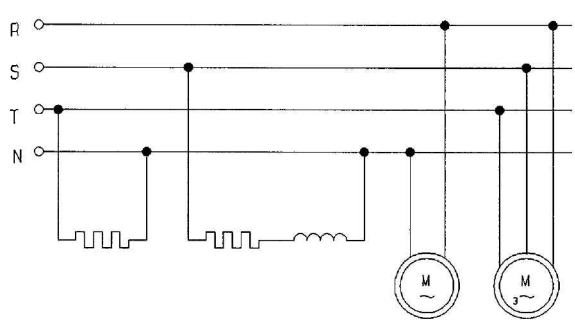


Fig. 1.5

© Ediciones Paraninfo

3) Trifásica a cuatro conductores (fig. 1.5). Se utiliza en B.T. para receptores monofásicos y trifásicos, obteniéndose así dos tensiones: la tensión de fase V_f (entre fase y neutro) y la de línea V_L (entre dos fases).

$$V_L = \sqrt{3}\ V_f$$

1.4. CÁLCULO DE CIRCUITOS DE CORRIENTE ALTERNA

El cálculo directo de circuitos de corriente alterna puede realizarse por los siguientes métodos:

1) *Método gráfico o vectorial.* Utilizando los vectores representativos de las magnitudes eléctricas de tensión o intensidad, siendo necesario considerar como origen de fases el vector de tensión o intensidad de corriente común a todos los receptores.
2) *Método simbólico o de números complejos.* Utilizando números complejos para el análisis de la red, aplicando las leyes de Ohm y Kirchhoff.
3) *Método de separación de potencias o de Boucherot.* Considerando que en una red de corriente alterna de frecuencia constante se conservan por separado las potencias activas y reactivas.

En el cálculo de redes de corriente alterna trifásica se consideran dos casos:

a) *Sistema trifásico equilibrado.* En un sistema equilibrado o simétrico las magnitudes que representan las tensiones y las intensidades tienen el mismo valor y están desfasadas entre sí un tercio de período o 120°. Como las tres fases son idénticas puede realizarse el cálculo por fase igual que en una distribución monofásica.
b) *Sistema trifásico desequilibrado.* Se calcula por separado cada fase. En la práctica se consideran las tensiones de línea equilibradas y desequilibradas las cargas.

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

1.4-1. A una línea monofásica de 230 V, 50 Hz se conectan los receptores siguientes (fig. 1.6):

- Una bobina de resistencia 10 Ω y reactancia 4 Ω.
- Una estufa de resistencia 110 Ω.
- Un motor monofásico de potencia 0,75 CV, factor de potencia 0,8 y rendimiento 80% a plena carga.

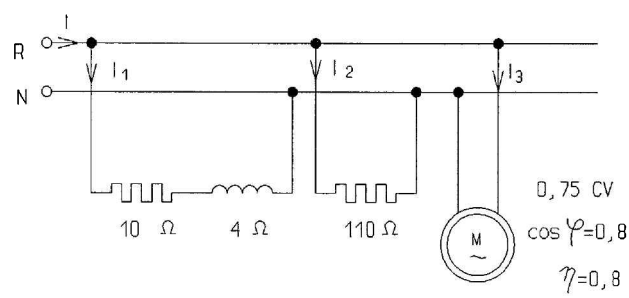


Fig. 1.6

Calcular por los métodos, gráfico, simbólico y de separación de potencias, la intensidad total y el factor de potencia total.

© Ediciones Paraninfo

1) Método gráfico.

a) Cálculo de las intensidades de los receptores.

En el primer receptor: $Z_1 = \sqrt{R_1^2 + X_1^2} = \sqrt{10^2 + 4^2} = 10{,}77\ \Omega$

$I_1 = \dfrac{230}{10{,}77} = 21{,}36\ \text{A}$; $\cos\varphi_1 = \dfrac{10}{10{,}77} = 0{,}9285$; $\varphi_1 = 21{,}8°$; con retraso de la intensidad respecto a la tensión.

En el segundo receptor: $I_2 = \dfrac{230}{110} = 2{,}09\ \text{A}$; $\cos\varphi_2 = 1$; $\varphi_2 = 0°$

En el tercer receptor:

La potencia absorbida por el motor a plena carga:

$$P_{ab} = \frac{P_u}{\eta} = \frac{0{,}75 \cdot 736}{0{,}8} = 690\ W$$

La intensidad absorbida:

$$I_3 = \frac{P_{ab}}{V\cos\varphi_3} = \frac{690}{230 \cdot 0{,}8} = 3{,}75\ \text{A}; \quad \cos\varphi_3 = 0{,}8; \quad \varphi_3 = 36{,}87°;$$ con retraso de la intensidad respecto a la tensión, porque el motor siempre es inductivo.

b) Calculo de la intensidad total.

Considerando la tensión horizontal y dibujando los vectores de las intensidades con sus desfases correspondientes (fig. 1.7), se calcula la intensidad total I y su desfase respecto a la tensión.

$$\vec{I} = \vec{I}_1 + \vec{I}_2 + \vec{I}_3$$

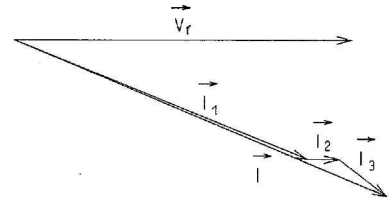


Fig. 1.7

2) Método simbólico.

Utilizando números complejos y considerando el vector tensión horizontal y como origen de fase.

$$\vec{I}_1 = 21{,}36 \angle -21{,}8° = (19{,}83 - 7{,}93j)\ \text{A}$$
$$\vec{I}_2 = 2{,}09 \angle 0° = (2{,}09 + 0j)\ \text{A}$$
$$\vec{I}_3 = 3{,}75 \angle -36{,}87° = (3 - 2{,}25j)\ \text{A}$$

La intensidad total: $\vec{I} = \vec{I}_1 + \vec{I}_2 + \vec{I}_3 = 24{,}92 - 10{,}18j = 26{,}92 \angle -22{,}22°\ \text{A}$

3) Método de separación de potencias.

En el primer receptor:

$$P_1 = VI_1\cos\varphi_1 = 230 \cdot 21{,}36 \cdot 0{,}9285 = 4\,561{,}5\ \text{W}$$
$$Q_1 = VI_1\,\text{sen}\varphi_1 = 230 \cdot 21{,}36 \cdot 0{,}3713 = 1\,824{,}4\ \text{VAr}$$

En el segundo receptor:

$$P_2 = VI_2\cos\varphi_2 = 230 \cdot 2{,}09 \cdot 1 = 480{,}7\ \text{W}$$
$$Q_2 = 0\ \text{VAr}$$

En el tercer receptor:

$$P_3 = 690\ \text{W}$$
$$Q_3 = VI_3\,\text{sen}\varphi_3 = 230 \cdot 3{,}75 \cdot 0{,}6 = 517{,}5\ \text{VAr}$$

© Ediciones Paraninfo

Las potencias activas y reactivas totales:

$$P = P_1 + P_2 + P_3 = 5\,732{,}2 \text{ W}$$
$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 = 2\,341{,}9 \text{ VAr}$$

La potencia aparente: $S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{5\,732{,}2^2 + 2\,341{,}9^2} = 6\,192{,}14$ VA

La intensidad total: $I = \dfrac{S}{V} = \dfrac{6\,192{,}14}{230} = 26{,}92$ A

El factor de potencia total: $\cos\varphi = \dfrac{P}{S} = \dfrac{5\,732{,}2}{6\,192{,}14} = 0{,}9257$

1.4-2. A una línea monofásica de 230 V, 50 Hz se conectan los receptores siguientes:
- Una bobina de resistencia 10 Ω y reactancia 40 Ω.
- Un receptor de resistencia 40 Ω y reactancia inductiva 30 Ω.

Calcular:

a) Impedancia e intensidad de primer receptor.
b) Impedancia e intensidad del segundo receptor.
c) Intensidad y factor de potencia total.

Solución: a) 41,23 Ω, 5,58 A; b) 50 Ω, 4,6 A; c) 9,62 A, 0,524

1.4-3. A una línea monofásica de 230 V, 50 Hz se conectan los receptores siguientes:
- Un receptor que consume 2 kW con factor de potencia unidad.
- Un receptor que consume 2,5 kW con factor de potencia 0,8 inductivo.
- Un receptor que consume 1,5 kW con factor de potencia 0,6 inductivo.

Calcular:

a) Potencia activa y potencia reactiva total.
b) Intensidad y factor de potencia total.

Solución: a) 6 kW, 3,875 kVAr; b) 31,05 A, 0,84

1.4-4. A una línea monofásica de 230 V, 50 Hz se conectan los receptores siguientes:
- Una bobina de resistencia despreciable y reactancia 10 Ω.
- Un receptor de resistencia 11Ω y reactancia despreciable.
- Un condensador de reactancia 100 Ω.

Calcular la potencia activa que consumen.

Solución: 4,8 kW

1.4-5. A una línea monofásica de 230 V, 50 Hz se conectan los receptores siguientes:
- Un receptor de impedancia $\mathbf{Z}_1 = 20 \angle 30°$ Ω.
- Un receptor de impedancia $\mathbf{Z}_2 = 40 \angle 0°$ Ω.
- Un receptor que consume una potencia de 2 kW con factor de potencia 0,8 inductivo.

Calcular la intensidad y factor de potencia total.

Solución: 27,32 A; 0,893

1.4-6. A una línea trifásica de 400 V, 50 Hz, se conectan los receptores que indica la figura 1.8:
- Receptor en estrella de 4 Ω de resistencia cada rama.

© Ediciones Paraninfo

- Motor trifásico de 4 kW, factor de potencia 0,8 y rendimiento a plena carga 88,9%.
- Receptor conectado en triángulo con una bobina de resistencia 4 Ω y reactancia 3 Ω por rama.

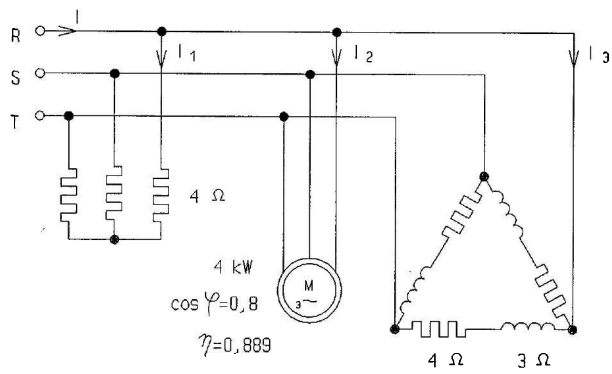


Fig. 1.8

Calcular por los métodos, gráfico, simbólico y de separación de potencias, la intensidad total por fase y el factor de potencia de la instalación.

1) Método gráfico.

a) Cálculo de las intensidades de fase de los receptores.

En el primer receptor: $I_1 = I_{f1} = \dfrac{V_{f1}}{Z_{f1}} = \dfrac{400/\sqrt{3}}{4} = 57{,}74$ A; $\cos\varphi_1 = 1$; $\varphi_1 = 0°$

En el segundo receptor, la potencia absorbida por el motor a plena carga:

$$P_{ab} = \frac{P_u}{\eta} = \frac{4\,000}{0{,}889} = 4\,499\ W$$

La intensidad absorbida:

$$I_2 = \frac{P_{ab}}{\sqrt{3}\,V_L \cos\varphi_2} = \frac{4\,499}{\sqrt{3}\cdot 400\cdot 0{,}8} = 8{,}12\text{ A};\quad \cos\varphi_2 = 0{,}8;\quad \varphi_2 = 36{,}87°$$

En el tercer receptor:

$$I_{f3} = \frac{V_{f3}}{Z_{f3}} = \frac{400}{\sqrt{4^2+3^2}} = 80\text{ A}$$

$$I_3 = 80\cdot\sqrt{3} = 138{,}56\text{ A};\quad \cos\varphi_3 = \frac{4}{\sqrt{4^2+3^2}} = 0{,}8;\quad \varphi_3 = 36{,}87°$$

b) Cálculo de la intensidad total.

Considerando la tensión horizontal y dibujando los vectores de las intensidades con sus desfases correspondientes (fig. 1.9), se calcula la intensidad total I y su desfase respecto a la tensión.

$$\vec{I} = \vec{I}_1 + \vec{I}_2 + \vec{I}_3$$

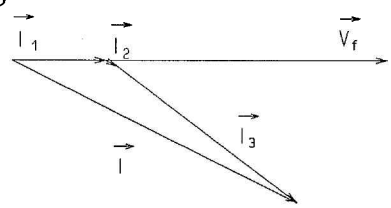


Fig. 1.9

2) Método analítico.

Utilizando números complejos y considerando el vector tensión de fase horizontal y como origen de fase en cada caso.

$$\vec{I}_1 = 57{,}74\angle 0° = (57{,}74 + 0j)\text{ A}$$
$$\vec{I}_2 = 8{,}12\angle -36{,}87° = (6{,}5 - 4{,}87j)\text{ A}$$
$$\vec{I}_3 = 138{,}56\angle -36{,}87° = (110{,}85 - 83{,}14j)\text{ A}$$

© Ediciones Paraninfo

La intensidad total: $\boldsymbol{I} = \boldsymbol{I}_1 + \boldsymbol{I}_2 + \boldsymbol{I}_3 = 175{,}09 - 88{,}01j = 196 \angle -26{,}69°$ A

3) Método de separación de potencias.

En el primer receptor:

$$P_1 = \sqrt{3}\, V_{L1} I_1 \cos\varphi_1 = \sqrt{3} \cdot 400 \cdot 57{,}74 \cdot 1 = 40\,003{,}4 \text{ W}$$

$$Q_1 = \sqrt{3}\, V_{L2} I_1 \operatorname{sen}\varphi_1 = 0 \text{ VAr}$$

En el segundo receptor:

$$P_2 = 4\,499 \text{ W}$$

$$Q_2 = \sqrt{3}\, V_{L2} I_2 \operatorname{sen}\varphi_2 = \sqrt{3} \cdot 400 \cdot 8{,}12 \cdot 0{,}6 = 3\,375{,}42 \text{ VAr}$$

En el tercer receptor:

$$P_3 = \sqrt{3}\, V_{L3} I_3 \cos\varphi_3 = \sqrt{3} \cdot 400 \cdot 138{,}56 \cdot 0{,}8 = 76\,797{,}75 \text{ W}$$

$$Q_3 = \sqrt{3}\, V_{L3} I_3 \operatorname{sen}\varphi_3 = \sqrt{3} \cdot 400 \cdot 138{,}56 \cdot 0{,}6 = 57\,598{,}31 \text{ VAr}$$

Las potencias activas y reactivas totales:

$$P = P_1 + P_2 + P_3 = 121{,}3 \text{ kW}$$

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 = 60{,}974 \text{ kVAr}$$

La potencia aparente:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{121{,}3^2 + 60{,}974^2} = 135{,}763 \text{ kVA}$$

La intensidad total por fase: $I = \dfrac{S}{V} = \dfrac{135\,763}{\sqrt{3} \cdot 400} = 196\,A$

El factor de potencia total: $\cos\varphi = \dfrac{P}{S} = \dfrac{121{,}3}{135{,}763} = 0{,}893$

1.4-7. A una línea trifásica de 400 V, 50 Hz, se conectan los receptores siguientes:
- Receptor en estrella de resistencia por fase 100 Ω y reactancia despreciable.
- Receptor en triángulo de resistencia por fase 100 Ω y reactancia despreciable.

Calcular:

a) Intensidad de línea del primer receptor.
b) Intensidad de línea del segundo receptor.
c) Intensidad de línea total.

Solución: a) 2,3 A; b) 6,93 A; c) 9,23 A

1.4-8. A una línea trifásica de 400 V, 50 Hz, se conectan los receptores siguientes:
- Receptor en estrella de impedancia $\mathbf{Z}_1 = 50 \angle 37°$ Ω por fase.
- Receptor en triángulo de impedancia $\mathbf{Z}_2 = 3 + 4j$ Ω por fase.

Calcular:

a) Intensidad de línea del primer receptor.
b) Intensidad de línea del segundo receptor.
c) Intensidad de línea y factor de potencia total.

Solución: a) 4,6 A; b) 138,56 A; c) 143 A, 0,607

1.4-9. A una línea trifásica de 400 V, 50 Hz, se conectan los receptores siguientes:
- Receptor trifásico equilibrado que consume una potencia aparente de 10 kVA, con factor de potencia 0,8 inductivo.

© Ediciones Paraninfo

- Receptor trifásico equilibrado que consume una potencia de 2 kW, con factor de potencia 0,8 inductivo.
- Motor trifásico de 7,5 CV, factor de potencia 0,8 y rendimiento a plena carga 85%.

Calcular:

a) Potencia activa que consume el primer receptor.
b) Potencias activa y reactiva total.
c) Intensidad de línea y factor de potencia total.

Solución: a) 8 kW; b) 16,5 kW, 12,37 kVAr; c) 29,77 A, 0,8

1.4-10. A una línea trifásica de 400 V, 50 Hz, se conectan los receptores siguientes:
- Receptor trifásico equilibrado que consume una potencia de 10 kW, con factor de potencia 0,98 capacitivo.
- Receptor trifásico equilibrado que consume una potencia de 2 kW, con factor de potencia 0,8 inductivo.
- Motor trifásico que consume 11 kW, con factor de potencia 0,8.

Calcular:

a) Potencia reactiva que consume el primer receptor.
b) Potencias activa y reactiva total.
c) Intensidad de línea y factor de potencia total.

Solución: a) -2,03 kVAr; b) 23 kW, 7,75 kVAr; c) 35 A, 0,948 inductivo.

1.4-11. A una línea trifásica de 230 V, 50 Hz, se conectan los receptores siguientes:
- Receptor trifásico equilibrado que consume una potencia de 10 kW, con factor de potencia 0,8 inductivo.
- Receptor en triángulo con impedancia $\boldsymbol{Z}=(30+40j)\,\Omega$ por cada rama.
- Motor trifásico de 15 CV, factor de potencia 0,84 y rendimiento a plena carga 86%.

Calcular:

a) Intensidad de línea del primer receptor.
b) Intensidad de línea del segundo receptor.
c) Intensidad de línea que consume el motor.
d) Intensidad de línea, factor de potencia y potencia activa total.

Solución: a) 31,38 A; b) 7,97 A; c)38,36 A; d) 77,3 A, 0,804, 24,76 kW

1.5. SISTEMA TRIFÁSICO CON CARGAS DESEQUILIBRADAS

Se consideran los siguientes casos:

1) *Receptor desequilibrado en conexión triángulo*. Se calculan las intensidades por cada rama del triángulo a partir de la tensión de línea y de la impedancia de cada rama. A continuación se calculan las intensidades por cada conductor de la línea. Al no existir neutro la suma de las corrientes de línea en cualquier instante es nula.
2) *Receptor desequilibrado en conexión estrella sin neutro*. Se convierte la estrella en triángulo equivalente y se procede como en el caso anterior. Para que una conexión triángulo (fig. 1.10) sea equivalente a una conexión estrella, la

© Ediciones Paraninfo

impedancia que une dos puntos de conexión del triángulo tiene que ser igual a la suma de impedancias de la estrella que concurren en esos puntos, aumentada en el cociente de dividir el producto de esas impedancias por la tercera impedancia de la estrella.

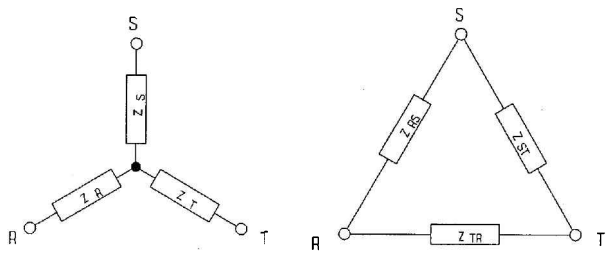


Fig. 1.10

$$Z_{RS} = Z_R + Z_S + \frac{Z_R \cdot Z_S}{Z_T};\quad Z_{ST} = Z_S + Z_T + \frac{Z_S \cdot Z_T}{Z_R};\quad Z_{TR} = Z_T + Z_R + \frac{Z_T \cdot Z_R}{Z_S}$$

3) *Receptor desequilibrado en conexión estrella con neutro.* Se calcula cada fase independientemente, teniendo en cuenta:

- La intensidad de corriente en un conductor fase de la línea de alimentación, es la suma vectorial de las intensidades de corriente debidas a los receptores trifásicos, y las debidas a los receptores monofásicos conectados entre ese conductor y el neutro.
- La intensidad de corriente en el neutro es igual y opuesta a la corriente resultante de la suma vectorial de las corrientes de las tres fases.

PROBLEMAS DE APLICACIÓN [2]

1.5-1. A una línea trifásica de 400 V, 50 Hz se conecta un receptor en triángulo (fig. 1.11). La rama RS del triángulo es una bobina de resistencia despreciable y reactancia 5 Ω; la rama ST es una resistencia de 10 Ω; la rama TR es una bobina de resistencia despreciable y reactancia 10 Ω. Calcular las intensidades de línea.

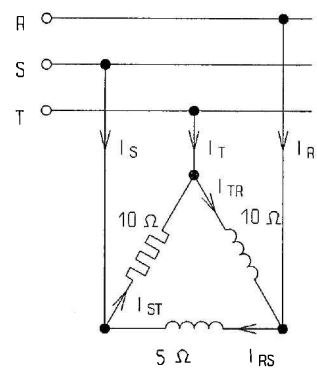


Fig. 1.11

Considerando la tensión V_{ST} (fig. 1.12) como origen de fase, las tensiones de línea tendrán las siguientes expresiones complejas:

$$V_{ST} = 400 \angle 0° = 400 \text{ V}$$
$$V_{RS} = 400 \angle 120° \text{ V}$$
$$V_{TR} = 400 \angle -120° \text{ V}$$

La intensidad I_{RS} se calcula por la ley de Ohm

$$I_{RS} = \frac{V_{RS}}{Z_{RS}} = \frac{400 \angle 120°}{5 \angle 90°} = 80 \angle 30° = (69{,}28 + 40j) \text{ A}$$

[2] En los problemas se consideran las tensiones compuestas o de línea equilibradas y con secuencia R-S-T.

© Ediciones Paraninfo

La intensidad I_{TR}:

$$I_{TR} = \frac{V_{TR}}{Z_{TR}} = \frac{400 \angle -120°}{10 \angle 90°} = 40 \angle -210° = (-34{,}64 + 20j)\ \text{A}$$

La intensidad I_{ST}:

$$I_{ST} = \frac{V_{ST}}{Z_{ST}} = \frac{400 \angle 0°}{10 \angle 0°} = 40 \angle 0° = (40 + 0j)\ \text{A}$$

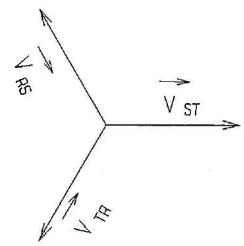


Fig. 1.12

La intensidad I_R se calcula aplicando la primera ley de Kirchhoff al punto de conexión de la fase R

$$I_R + I_{TR} = I_{RS};\ I_R = I_{RS} - I_{TR} = 103{,}92 + 20j = 105{,}83 \angle 11°\ \text{A}$$

De forma análoga:

$$I_S = I_{ST} - I_{RS} = -29{,}28 - 40j = 49{,}57 \angle -126{,}2°\ \text{A}$$

$$I_T = I_{TR} - I_{ST} = -74{,}64 + 20j = 77{,}27 \angle 165°\ \text{A}$$

1.5-2. A una línea trifásica de 300 V, 50 Hz se conecta un receptor en triángulo. La rama RS del triángulo es una resistencia de 300 Ω; las ramas ST y TR son resistencias de 100 Ω. Calcular:

a) Intensidad I_{RS}.
b) Intensidad I_{TR}.
c) Intensidad de línea I_R

Solución: a) 1 A; b) 3 A; c) 3,61 A

1.5-3. A una línea trifásica de 400 V, 50 Hz se conecta un receptor en triángulo. Las ramas RS y ST del triángulo son resistencias de 100 Ω; la rama TR es una bobina de impedancia $\mathbf{Z} = 100 \angle 30°$ Ω. Calcular las intensidades de línea.

Solución: $I_R = 5{,}66$ A; $I_S = 6{,}93$ A; $I_T = 7{,}73$ A

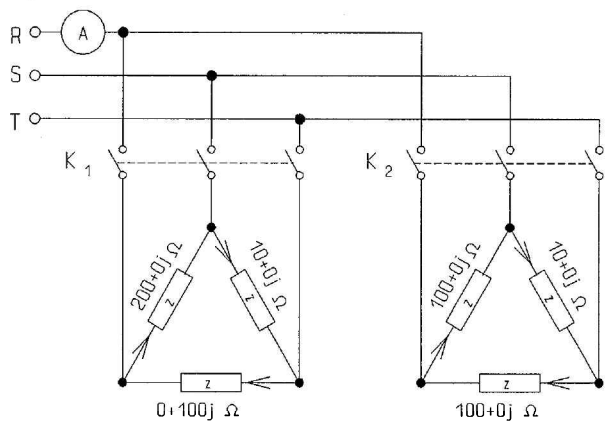


Fig. 1.13

1.5-4. En la línea trifásica de 400 V, 50 Hz, con los receptores que indica la figura 1.13. Calcular la indicación del amperímetro en los casos siguientes:

a) El interruptor K_1 abierto y K_2 cerrado.
b) El interruptor K_1 cerrado y K_2 abierto.
c) Los dos interruptores cerrados.

Solución: a) 6,93 A; b) 2,48 A; c) 4,77 A.

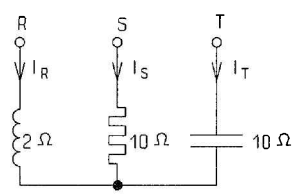


Fig. 1.14

© Ediciones Paraninfo

1.5-5. A una línea trifásica de 400 V, 50 Hz se conecta un receptor en estrella (fig.1.14). La fase R del receptor está formada por una bobina de resistencia despreciable y reactancia 2 Ω; la fase S está formada por una resistencia de 10 Ω y la fase T por un condensador de reactancia 10 Ω. Calcular las intensidades de línea.

Para calcular las intensidades se convierte el receptor en estrella en otro receptor equivalente en triángulo.

La impedancia compleja Z_{RS} de una rama del triángulo se calcula por la fórmula:

$$Z_{RS} = Z_R + Z_S + \frac{Z_R \cdot Z_S}{Z_T} = 2j + 10 + \frac{20j}{-10j} = 8 + 2j = 8{,}246 \angle 14° \ \Omega$$

De forma análoga se calculan Z_{ST} y Z_{TR}:

$$Z_{ST} = Z_S + Z_T + \frac{Z_S \cdot Z_T}{Z_R} = 10 + (-10j) + \frac{-100j}{2j} = -40 - 10j = 41{,}23 \angle -166° \ \Omega$$

$$Z_{TR} = Z_T + Z_R + \frac{Z_T \cdot Z_R}{Z_S} = -8j + \frac{20}{10} = 2 - 8j = 8{,}246 \angle -76° \ \Omega$$

Considerando la tensión V_{ST} como origen de fase (fig. 1.15).

$$V_{RS} = 400 \angle 120° \text{ V}$$
$$V_{ST} = 400 \angle 0° \text{ V}$$
$$V_{TR} = 400 \angle -120° \text{ V}$$

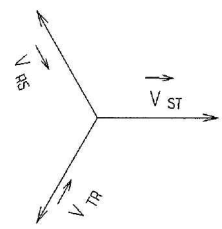


Fig. 1.15

Las intensidades por cada rama del triángulo (fig. 1.16).

$$I_{RS} = \frac{V_{RS}}{Z_{RS}} = \frac{400 \angle 120°}{8{,}246 \angle 14°} = 48{,}5 \angle 106° = (-13{,}37 + 46{,}62j) \text{ A}$$

$$I_{ST} = \frac{V_{ST}}{Z_{ST}} = \frac{400 \angle 0°}{41{,}23 \angle 166°} = 9{,}7 \angle 166° = (-9{,}4 + 2{,}35j) \text{ A}$$

$$I_{TR} = \frac{V_{TR}}{Z_{TR}} = \frac{400 \angle -120°}{8{,}246 \angle -76°} = 48{,}5 \angle -44° = (34{,}89 - 33{,}7j) \text{ A}$$

Las intensidades por cada conductor de línea

$$I_R = I_{RS} - I_{TR} = -48{,}26 + 80{,}32j = 93{,}7 \angle 121° \text{ A}$$
$$I_S = I_{ST} - I_{RS} = 3{,}97 - 44{,}27j = 44{,}45 \angle -84{,}9° \text{ A}$$
$$I_T = I_{TR} - I_{ST} = 44{,}29 - 36{,}05j = 57{,}1 \angle -39{,}14° \text{ A}$$

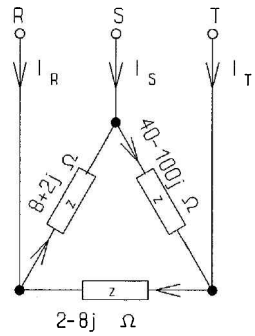


Fig. 1.16

1.5-6. A una línea trifásica de 400 V, 50 Hz, sin conductor neutro, se conecta un receptor en estrella. La fase R de la estrella es una resistencia de 200 Ω, la fase S es una bobina de resistencia despreciable y reactancia 10 Ω, y la fase T es una resistencia de 100 Ω. Calcular:

a) Impedancia Z_{RS} equivalente.

b) Impedancia Z_{TR} equivalente.

c) Intensidad en la fase R.

Solución: a) 200+30j; b) 300-2 000j; c) 2,15 A

© Ediciones Paraninfo

1.5-7. A una línea trifásica de 400 V, 50 Hz, sin neutro, se conecta un receptor en estrella:
La fase R de la estrella es una resistencia de 200 Ω, la fase S es una resistencia de 10Ω, y la fase T es una resistencia de 100 Ω. Calcular la intensidad que circula por cada una de las fases del receptor.

Solución: $I_R = 1{,}83$ A; $I_S = 4{,}59$ A; $I_T = 3{,}56$ A

1.5-8. A una línea trifásica con neutro 400/230 V, 50 Hz, se conectan los receptores siguientes, según el esquema de la figura 1.17:

- Un receptor en estrella con neutro, con las impedancias por rama que indica la figura.
- Un receptor trifásico equilibrado que consume 10 kW con factor de potencia 0,8 inductivo.

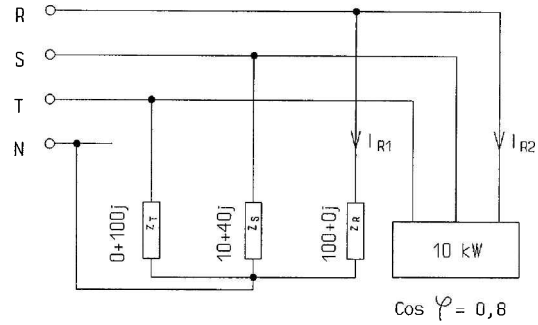


Fig. 1.17

Calcular:

a) Intensidad que circula por cada fase del receptor en estrella.
b) Intensidad de línea del segundo receptor.
c) Intensidad total en la fase R.

a) Considerando la tensión V_R como origen de fases (fig. 1.18) $V_R = 230 \angle 0°$, $V_S = 230 \angle -120°$ y $V_T = 230 \angle 120°$

La intensidad en la fase R del primer receptor:

$$I_{R1} = \frac{V_R}{Z_R} = \frac{230 \angle 0°}{100 \angle 0°} = 2{,}3 \angle 0° = 2{,}3 + 0j \text{ A}$$

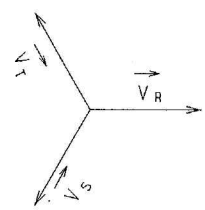


Fig. 1.18

La impedancia de la fase S: $Z_S = 10 + 40j = 41{,}23 \angle 76° \ \Omega$
La intensidad en la fase S:

$$I_{S1} = \frac{V_S}{Z_S} = \frac{230 \angle -120°}{41{,}23 \angle 76°} = 5{,}58 \angle -196° \text{ A}$$

La intensidad en la fase T: $I_{T1} = \dfrac{V_T}{Z_T} = \dfrac{230 \angle 120°}{100 \angle 90°} = 2{,}3 \angle 30°$ A

b) La intensidad de línea en el segundo receptor:

$$I_L = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot V_L \cdot Cos\varphi} = \frac{10\,000}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0{,}8} = 18{,}04 \text{ A}$$

$Cos\varphi = 0{,}8$; $\varphi = 36{,}87°$ de retraso respecto a la tensión de fase

$$I_{R2} = 18{,}04 \angle -36{,}87° = (14{,}04 - 10{,}8j) \text{ A}$$

c) La intensidad total en la fase R:

$$I_R = I_{R1} + I_{R2} = (2{,}3 + 0j) + (14{,}4 - 10{,}8j) = 16{,}7 - 10{,}8j = 19{,}89 \angle -32{,}89° \text{ A}$$

© Ediciones Paraninfo

1.5-9. A una línea trifásica con neutro, de tensión compuesta o de línea 400 V, 50 Hz, se conectan los receptores que indica la figura 1.19.

- Un motor monofásico entre la fase R y el neutro de potencia nominal 0 ,75 CV, factor de potencia 0,8 y rendimiento a plena carga 80%.
- Un motor trifásico de 5,5 CV, factor de potencia 0,8 y rendimiento a plena carga 90%.

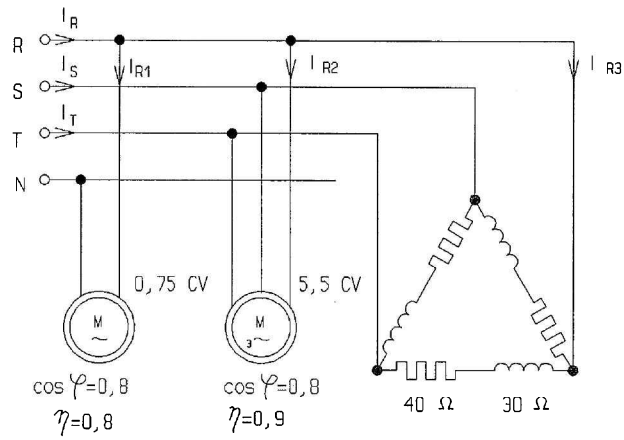


Fig. 1.19

- Receptor en triángulo con una bobina de resistencia 40 Ω y reactancia 30 Ω por rama. Calcular la intensidad de línea en la fase R.
  Solución: $I_R = 25{,}73$ A

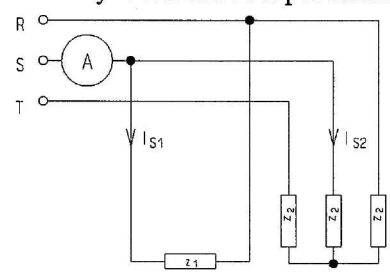


Fig. 1.20

1.5-10. A una línea trifásica de 380 V, 50 Hz, se conectan los receptores que indica la figura 1.20:

- Un receptor de impedancia $\mathbf{Z}_1 = 10 \angle 30°$ conectado entre las fases R y S.
- Un receptor trifásico en estrella de impedancia de fase $\mathbf{Z}_2 = 20 \angle -30°$

Calcular la indicación del amperímetro.

La tensión entre fase y neutro o tensión de fase:

$$V_f = \frac{V_L}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220 \text{ V}$$

Considerando la tensión V_R como origen de fases (fig. 1.21) $\boldsymbol{V}_R = 220 \angle 0°$, $\boldsymbol{V}_S = 220 \angle -120°$, $\boldsymbol{V}_{RS} = 380 \angle 30°$ y $\boldsymbol{V}_{SR}$ es opuesta a $\boldsymbol{V}_{RS}$; $\boldsymbol{V}_{SR} = 380 \angle -150°$

La intensidad en la fase S del primer receptor:

$$\boldsymbol{I}_{S1} = \frac{\boldsymbol{V}_{SR}}{\boldsymbol{Z}_1} = \frac{380 \angle -150°}{10 \angle 30°} = 38 \angle -180° = (-38 + 0j) \text{ A}$$

La intensidad en la fase S del segundo receptor:

$$\boldsymbol{I}_{S2} = \frac{\boldsymbol{V}_S}{\boldsymbol{Z}_2} = \frac{220 \angle -120°}{20 \angle -30°} = 11 \angle -90° = (0 - 11j) \text{ A}$$

La intensidad total en la fase S:

$$\boldsymbol{I}_s = \boldsymbol{I}_{S1} + \boldsymbol{I}_{S2} = -38 - 11j = 39{,}56 \angle -163{,}86° \text{ A}$$

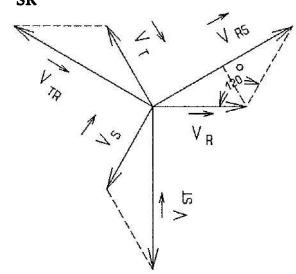


Fig. 1.21

© Ediciones Paraninfo

1.5-11. A una línea trifásica de 400 V, 50 Hz, se conectan los receptores que indica la figura 1.22:

- Un receptor de impedancia $\mathbf{Z}_1 = 100 \angle 0°$ conectado entre las fases R y S.
- Un receptor de impedancia $\mathbf{Z}_2 = 100 \angle 30°$ conectado entre las fases R y T.
- Un motor trifásico de 11 kW, factor de potencia 0,866 y rendimiento a plena carga 80%.

Calcular la intensidad total en la fase R.

Solución: 28,42 A.

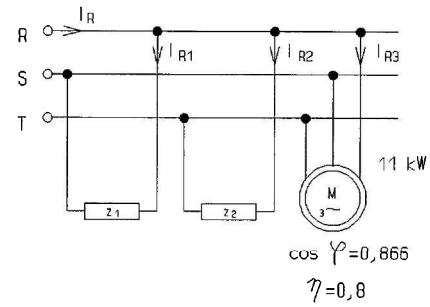


Fig. 1.22

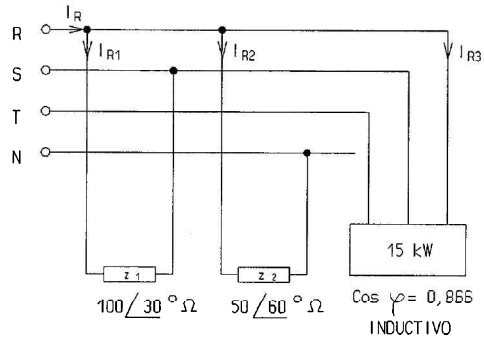


Fig. 1.23

1.5-12 Una línea trifásica con neutro de tensión de línea 400/230 V, 50 Hz, tiene conectados los receptores que indica la figura 1.23. Calcular la intensidad total en la fase R.

Considerando la tensión simple (fig. 1.24) para la fase R como horizontal y origen de fase, las tensiones $\mathbf{V}_R = 230 \angle 0°$ y $\mathbf{V}_{RS} = 400 \angle 30°$

La intensidad en el primer receptor:

$$\boldsymbol{I}_{R1} = \frac{\boldsymbol{V}_{RS}}{\boldsymbol{Z}_1} = \frac{400 \angle 30°}{100 \angle 30°} = 4 \angle 0° = (4 + 0j)\ \text{A}$$

La intensidad en el segundo receptor:

$$\boldsymbol{I}_{R2} = \frac{\boldsymbol{V}_2}{\boldsymbol{Z}_2} = \frac{230 \angle 0°}{50 \angle 60°} = 4{,}6 \angle -60° = (2{,}3 - 3{,}98j)\ \text{A}$$

La intensidad en el tercer receptor:

$$I_{R3} = \frac{P}{\sqrt{3}\, V_L \cos\varphi} = \frac{15\,000}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0{,}866} = 25\ \text{A}$$

El factor de potencia $\cos\varphi = 0{,}866$; $\varphi = 30°$; en retraso respecto a la tensión de fase $\mathbf{V}_R$, por lo que la intensidad en números complejos:

$$\boldsymbol{I}_{R3} = 25 \angle -30° = (21{,}65 - 12{,}5j)\ \text{A}$$

La intensidad total en el conductor de la fase R:

$$\boldsymbol{I}_R = \boldsymbol{I}_{R1} + \boldsymbol{I}_{R2} + \boldsymbol{I}_{R3} = 27{,}95 - 16{,}48j = 32{,}45 \angle -30{,}52°\ \text{A}$$

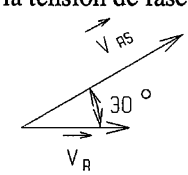


Fig. 1.24

© Ediciones Paraninfo

1.6. LÍNEAS DE DISTRIBUCIÓN ABIERTAS Y CERRADAS

Según el esquema de montaje las líneas de distribución se clasifican en:

a) *Líneas de distribución abiertas*. Son las que reciben corriente por un solo extremo.

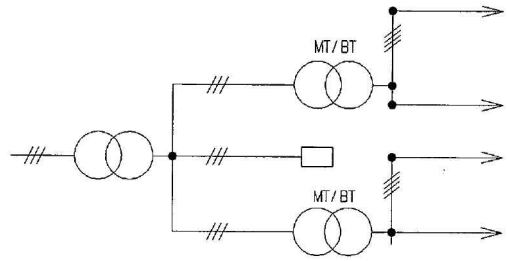


Fig. 1.25

Una red abierta se llama *radial*, cuando está constituida por líneas de derivación abiertas, con las cargas en los extremos o repartidas a lo largo de la línea (fig. 1.25).

La estructura de la red radial está constituida por un centro de alimentación, del cual parten las líneas principales con sus derivaciones. Las ventajas de estas redes son: sencillez de diseño, economía de instalación y clara distribución de corriente que permite la rápida localización de averías. Las principales desventajas son: limitada capacidad de ampliación de suministro de potencia y poca calidad de servicio, porque una avería en la línea afecta a muchos usuarios.

Se utiliza la red radial en electrificación rural, que se caracteriza por puntos de bajo consumo disperso en una zona relativamente grande. Se emplea una línea de M.T. de la que, mediante centros de transformación, parten líneas de B.T. que suministran energía eléctrica a los usuarios (fig. 1.26).

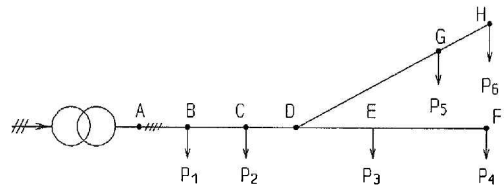


Fig. 1.26

Las líneas de distribución de energía en B.T. suelen ser de corta longitud y con estructura radial.

b) *Líneas de distribución cerradas*. Son las que reciben la corriente por dos o más puntos.

- *Red en anillo*. Una red en anillo está constituida por una línea cerrada que tiene una o dos alimentaciones (fig. 1.27).

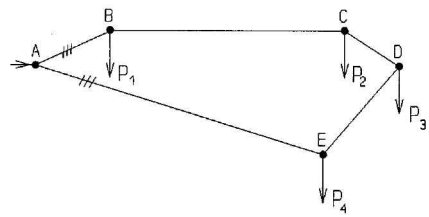


Fig. 1.27

Se utilizan en M.T. para alimentar altos consumos de energía y mantener a la vez la continuidad en el servicio. En el anillo se colocan elementos de maniobra que permiten aislar una parte del mismo, por lo que una avería afecta a menos usuarios que en una red radial. Para la red de distribución en B.T. se usa la construcción en

© Ediciones Paraninfo

anillo en distribución local, que presenta una pequeña caída de tensión y seguridad en el suministro. La red radial de B.T. puede conectarse en anillo por medio de una aparato de maniobra que normalmente está abierto.

Las redes de distribución urbanas en M.T. suelen ser construidas en anillo, alimentando a centros de transformación con entrada y salida de la línea, llamados centros de transformación "de paso" (fig. 1.28). Los aparatos de maniobra permiten que cada centro de transformación pueda alimentarse de uno u otro lado del anillo, dejando en caso de avería desconectada la parte averiada.

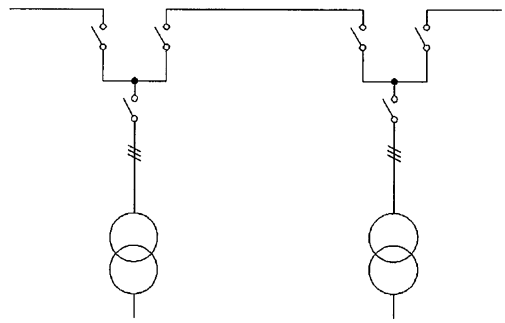


Fig. 1.28

Las principales ventajas de la construcción en anillo es que logra poca caída de tensión con variaciones bruscas de carga y más seguridad en el suministro que en la red radial.

- *Red en malla*. Una red en malla está constituida por redes cerradas unidas eléctricamente (fig. 1.29). Puede ser construida como tal o ser el resultado de unir eléctricamente entre sí redes radiales. La alimentación puede ser por uno o varios puntos.

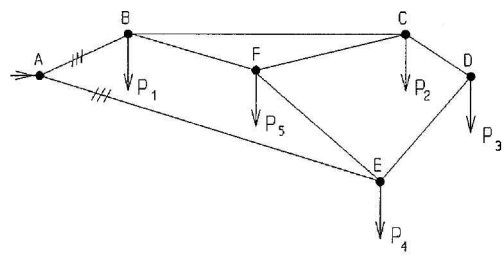


Fig. 1.29

Las principales ventajas de la red en malla son: pequeña caída de tensión sin grandes variaciones con el cambio de consumo, y poder hacer frente a aumento de demanda de potencia sin grandes cambios en la red.

Se utiliza para el suministro de energía a zonas de gran densidad de carga, obteniéndose buena estabilidad de tensión y gran seguridad en el suministro.

1.7. TRANSMISIÓN DE INFORMACIÓN

La transmisión de informaciones técnicas (medidas, señalizaciones y órdenes de maniobras) entre subestaciones y centros de transformación con un puesto de mando y control se llama telemedida, telemando y telecontrol.

Este sistema de telecomunicaciones consiste en lo siguiente: en el lado emisor se codifican las informaciones para su emisión por el canal de comunicación, y en el lado receptor se decodifican la informaciones transformándolas en señal indicativa, valor de medición u orden de maniobra.

© Ediciones Paraninfo

El soporte de la comunicación puede ser:

- Línea telefónica. Tiene el inconveniente que es necesario una instalación telefónica entre los puntos a comunicar.
- Ondas de radio de muy alta frecuencia (VHF) con radioenlace. Tiene el inconveniente de necesitar en muchos casos estaciones repetidoras.
- Onda portadora por alta tensión. Utiliza la línea de distribución en alta tensión. El emisor acopla la señal de poca intensidad y alta frecuencia (HF) a la línea, de forma que se superpone a la frecuencia de 50 Hz. El receptor detecta la señal del emisor separándola de la del sistema de potencia.
- Línea de fibra óptica. La transmisión de datos por cable de fibra óptica requiere una instalación de este tipo entre los puntos a comunicar. En líneas aéreas de alta tensión, que disponen de cable de tierra para protección de la línea contra descargas atmosféricas se instala el cable de fibra óptica adosado al de tierra o un cable especial que cumple la función de cable de tierra y de comunicación. En líneas aéreas en las que no se utiliza el cable de tierra (líneas de media tensión) se instala un cable de fibra óptica autosoportado, con resistencia a la tracción.

El puesto de mando y control tradicional con cuadros sinópticos de la red, de tipo mosaico se sustituye por ordenadores y pantallas, que permiten el análisis de datos para medida de magnitudes, visualización de fallos y representación actualizada de los valores necesarios para las maniobras a efectuar.

1.8. CONDUCTORES UTILIZADOS EN LAS LÍNEAS ELÉCTRICAS

Los conductores más utilizadas en M.T y en B.T. son:

1) *Conductores sin aislamiento*, formados por los materiales siguientes:



Fig. 1.30

   a) Cobre duro, los cuales pueden ser de:
      - Alambre.
      - Cable de cobre, formado por alambres cableados en capas concéntricas.
      - Cable de cobre con alma de acero, unidos por soldadura.
   b) Aluminio, se utiliza en forma de cable (art. 8 del RLAT).
      - Cable de aleación de aluminio con silicio y magnesio (Almelec).
      - Cable de aluminio-acero. Formado por varios alambres de aluminio, cableados sobre alambres de acero galvanizado (fig. 1.30).
      - Cable de aluminio-acero, de tipo comprimido. Formado por hilos sectoriales de aluminio comprimidos sobre un alambre de acero.
   c) Acero galvanizado, utilizado formando parte de cables y en los conductores de tierra, que en líneas aéreas de A.T. van tendidos sobre la línea para protección contra descargas atmosféricas.

© Ediciones Paraninfo

Actualmente los conductores sin aislamiento (conductores desnudos), se usan casi exclusivamente en líneas de A.T. En B.T. se usan como pletinas en canalizaciones prefabricadas bajo envolvente metálica o aislante.

2) *Conductores con aislamiento*. Los cables eléctricos aislados están formados básicamente por conductor rodeado de aislante, pero tienen otros elementos (fig. 1.31) para dar al cable resistencia mecánica, resistencia a los agentes atmosféricos, etc.

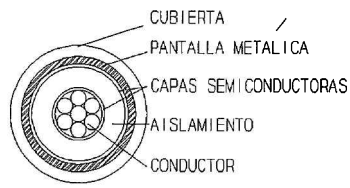


Fig. 1.31 Conductor aislado

Conductores. Los conductores más utilizados en los cables aislados son:

- Cobre. Se utiliza cobre recocido de resistividad a 20 °C, $\rho \simeq 0{,}018\ \Omega mm^2/m$ y carga de rotura 20 kp/mm^2.
- Aluminio. A igualdad de resistencia eléctrica el peso de aluminio es la mitad que el del cobre. Su resistividad a 20 °C $\rho = 0{,}028\ \Omega mm^2/m$ y la carga de rotura 15 kp/mm^2.
- Almelec. Aleación de aluminio con pequeñas proporciones de silicio y magnesio Su resistividad a 20 °C, $\rho = 0{,}032\ \Omega mm^2/m$ y la carga de rotura es el doble que el aluminio.
- Otros materiales, como el plomo (pantallas protectoras) y el acero (armaduras), pueden funcionar ocasionalmente como conductores.

Aislantes. Los materiales aislantes más empleados en M.T. y en B.T. son a base de material plástico:

- Termoplásticos. Se reblandecen con el calor, como el policloruro de vinilo PVC (utilizado en B.T.) y el polietileno PE (utilizado en M.T.).
- Termoestables. No funden al aumentar la temperatura. Se emplean el etileno-propileno EPR o HEPR, polietileno reticulado XLPE, utilizados en M.T. y B.T.; goma natural y goma butílica (que está siendo sustituida por EPR).
- Otros aislantes utilizados son a base de siliconas y plásticos, con baja emisión de gases tóxicos y humos, resistentes a altas temperaturas, a la llama o a determinados ambientes.

El cable aislado con papel impregnado en aceite y con cubierta de plomo se está usando cada vez menos actualmente.

Pantallas. Se utilizan para mejorar la distribución del campo eléctrico del cable. Se utilizan como pantallas hilos o mallas de cobre, hojas de aluminio, fundas de plomo, etc.

Armaduras. Se colocan sobre el aislante para aumentar la resistencia mecánica del cable. Se utilizan flejes de acero o hilos de acero arrollados sobre el cable.

Cubiertas. Protegen al aislante de efectos atmosféricos y daños mecánicos. Se utilizan diversos tipos de plásticos.

© Ediciones Paraninfo

Los tipos de cables aislados más utilizados son:

a) En líneas aéreas. Se utilizan en B.T. y en M.T. conductores de aluminio formados por cables unipolares aislados con polietileno reticulado o etileno propileno, trenzados en haz sobre un fiador de Almelec o de acero.
b) En líneas subterráneas. Se utilizan en B.T y en M.T. cables de aluminio o de cobre con aislamiento seco (plástico) o con papel impregnado.
c) En instalaciones interiores. Se utilizan conductores de cobre con aislamiento de plástico.

1.9. DESIGNACIÓN DE CONDUCTORES AISLADOS EN MEDIA Y BAJA TENSIÓN

Tabla 1.2 Cables con tensión nominal hasta 750 V, más utilizados en instalaciones interiores (UNE 20434)

PARTES DE LA DESIGNACIÓN	ELEMENTOS A CONSIDERAR	SÍMBOLO
1	Estado de armonización.	H Cable de tipo armonizado. ES ó ES-N Cable de tipo nacional. A Cable de tipo nacional autorizado por CENELEC.
	Tensión nominal U_0/U.	03 Tensión nominal 300/300 V. 05 Tensión nominal 300/500 V. 07 Tensión nominal 450/750 V.
2	Naturaleza del aislamiento o de la cubierta.	V Aislamiento en PVC normal. R Aislamiento en goma normal. N Cubierta de policloropreno. Z Compuesto reticulado a base de poliolefina, con baja emisión de gases corrosivos y de humos. Z1 Compuesto termoplástico a base de poliolefina, con baja emisión de gases corrosivos, de humos y no propagador de incendio (AS).
	Particularidades constructivas.	Ningún símbolo (cable circular). H Cable plano de conductores separables. H2 Cable plano no separable.
	Material conductor	Ningún símbolo (cobre). -A Aluminio.
	Formación del conductor.	-F Conductor flexible para cable flexible. -H Conductor muy flexible para un cable flexible. -K Conductor flexible para un cable de instalación fija. -R Conductor rígido redondo cableado. -U Conductor rígido redondo formado por un sólo alambre.
3	Número de conductores y sección nominal.	Número × sección en mm^2 (Si hay conductor de protección se utiliza G en lugar de ×).

EJEMPLOS:

ES07Z1-K (AS) 1x6: Cable de tipo nacional, de tensión nominal 450/750 V, aislamiento termoplástico de poliolefina, no propagador de incendio, conductor flexible para cable de cobre de instalación fija, unipolar de sección 6 mm^2.

H07V-U 1x2,5: Cable de normas armonizadas, de tensión nominal 450/750 V, aislamiento PVC, conductor rígido redondo, unipolar de sección 2,5 mm^2.

© Ediciones Paraninfo

Tabla 1.3

Cables de transporte de energía aislados con dieléctricos secos para tensiones nominales de 1 kV a 30 kV.

PARTES DE LA DESIGNACIÓN	ELEMENTOS A CONSIDERAR	SÍMBOLO
1	Particularidades constructivas.	*Naturaleza del aislamiento:* V Policloruro de vinilo (PVC). R o X Polietileno reticulado (XLPE). D Etileno-propileno (EPR). HEPR Etileno propileno de alto módulo. *Cables de campo radial:* H Pantalla semiconductora sobre el conductor, sobre el aislamiento y sobre pantalla metálica individual. HO Como en el caso anterior pero, además, con pantalla metálica sobre el conjunto de los conductores aislados cableados. *Cubierta de separación:* E Polietileno termoplástico. V Policloruro de vinilo. N Policloropreno (neopreno). I Polietileno clorosulfonado. *Protecciones metálicas:* O Pantalla conjunta. F Flejes de hierro. M Alambres de hierro. FA Flejes de aluminio. MA Alambres de aluminio. Q Pletinas de hierro. QA Pletinas de aluminio. P Tubo de plomo. A Tubo liso de aluminio. AW Tubo corrugado de aluminio. *Cubiertas*: E Polietileno termoplástico. V Policloruro de vinilo. N Policloropreno (neopreno). I Polietileno clorosulfonado. Z1: Compuesto termoplástico a base de poliolefina Cuando la cubierta termoplástica sea de naturaleza especial, se indica a continuación: RH Cubierta resistente a hidrocarburos. FLAM Cubierta no propagadora de incendio. *Propiedades especiales*: Protección contra la penetración de agua-OL. No propagador de llama (S) o de incendio (AS). Resistente al fuego (AS+).
2	Tensión nominal U_0/U	Expresada en kV y designando los valores Uo/U.
3	Conductores y sección	Número de conductores × sección nominal en mm^2.
4	Forma del conductor.	Sin indicación con cuerda convencional redonda. K Cuerdas compactas. S Cuerdas sectoriales.
5	Naturaleza del conductor.	Al Si el conductor es de aluminio.

© Ediciones Paraninfo

EJEMPLOS:

RVFV 0,6/1 kV 3×120/70 K: Cable con aislamiento de polietileno reticulado, cubierta interna de PVC, armado con fleje de acero y cubierta exterior de PVC, de tensión 0,6/1 kV, con tres conductores de cobre de sección 120 mm^2 y neutro de 70 mm^2, cuerda compacta.

RZ1-K (AS) 0,6/1 kV 1x16: Cable aislado etileno propileno, cubierta de termoplástico a base de poliolefina, flexible, no propagador de incendio y con baja emisión de humos y gases corrosivos, tensión nominal 0,6/1 kV, unipolar con conductor de cobre de 16 mm^2 de sección.

DHVMAV 15/25 kV 1×240 K: Cable unipolar con conductor de cobre de 240 mm^2 de sección en cuerda compacta, aislado etileno propileno, pantalla semiconductora, cubierta de separación de PVC, armadura de alambres de aluminio, cubierta de PVC, tensión 15/25 kV.

RHZ1-2OL (S) 12/20 KV 1x240 k Al + H16: Cable unipolar con conductor compacto de aluminio de 240 mm^2 de sección, tensión 12/20 kV, aislado con polietileno reticulado, cubierta de poliolefina, doble obturación frente al agua,no propagador de llama, sección de la pantalla 16 mm^2.

Tabla 1.4

Conductores de aluminio aislados, cableados en haz, para líneas aéreas de 0,6/1 kV de tensión nominal.

PARTES DE LA DESIGNACIÓN	ELEMENTOS A CONSIDERAR	SÍMBOLO
1	Tipo constructivo.	R Aislamiento de polietileno reticulado. Z Cableado en hélice visible.
2	Tensión nominal U_0/U.	0,6/1 kV
3	Número de conductores y sección nominal.	Número × sección en mm^2
4	Naturaleza del conductor.	Al. Si el conductor es de aluminio. Alm. Si el neutro es de aleación de aluminio, se indica a continuación de la sección. Ac. Si el fiador es de acero galvanizado, se indica a continuación de la sección.

EJEMPLO:

RZ 0,6/1kV 3×95 Al/54,6 Alm: Cable con aislamiento de polietileno reticulado, cableado en hélice visible, de tensión nominal 0,6/1 kV, tres conductores de aluminio de sección 95 mm^2, neutro fiador de Almelec (para sujeción del cable) de sección 54,6 mm^2.

© Ediciones Paraninfo

PROBLEMAS DE RECAPITULACIÓN

P.1-1 Una línea eléctrica trifásica en M.T. transporta una potencia de 1 MVA. Calcular:
a) Intensidad de línea y sección mínima del conductor de cobre necesario si se admite una densidad de corriente de 3 A/mm^2 y la tensión de línea es de 20 kV.
b) Sección mínima del conductor de cobre necesario, si se admite la misma densidad de corriente, para una tensión de línea de 15 kV.
Solución: a) 28,87 A; 9,62 mm^2; b) 38,49 A; 12,83 mm^2

P.1-2 A una línea monofásica de 230 V, 50 Hz se conectan los receptores siguientes:
- Un receptor de impedancia $\mathbf{Z}_1 = 50 \angle 30^\circ\ \Omega$.
- Una instalación de alumbrado, que consume 2,4 kW con factor de potencia 0,86 inductivo.
- Un motor monofásico que consume una potencia de 0,7 kW con factor de potencia 0,8 inductivo.

Calcular la intensidad total y el factor de potencia total de la instalación.
Solución: 20,5 A; 0,85

P.1-3 A una línea trifásica de 400 V, 50 Hz, se conectan los receptores siguientes:
- Receptor en estrella con impedancia $\mathbf{Z} = (100 + 0j)\ \Omega$ por cada rama.
- Receptor trifásico equilibrado que consume una potencia de 8 kW, con factor de potencia 0,8 inductivo.
- Motor trifásico de potencia nominal 15 kW, con factor de potencia 0,86 y rendimiento a plena carga del 88%.

Calcular:
a) Intensidad de línea del primer receptor.
b) Intensidad de línea del segundo receptor.
c) Intensidad de línea que consume el motor.
d) Intensidad de línea total.
e) Potencia activa total y factor de potencia.
Solución: a) 2,3 A; b) 14,43 A; c) 28,61 A; d) 44,93 A; e) 26,6 kW, 0,856

P.1-4 Un local industrial alimentado por una línea trifásica con neutro 400/230 V, 50 Hz, tiene dos instalaciones:
- Instalación de alumbrado que consume 1,2 kW por cada fase con factor de potencia 0,86 inductivo.
- Instalación de fuerza, que alimenta a motores trifásicos y consume 20 kW con factor de potencia 0,8 inductivo.

Calcular:
a) Intensidad de línea total en cada fase de alumbrado.
b) Intensidad de línea total en la instalación de fuerza.
c) Potencia activa que consume el local y su factor de potencia.
Solución: a) 6,07 A; b) 36,08 A; c) 23,6 kW; 0,81

© Ediciones Paraninfo

P.1-5 En la línea trifásica de 400 V, 50 Hz, con los receptores que indica la figura 1.32. Calcular la indicación del amperímetro.

Solución: 41,2 A.

P.1-6 A una línea trifásica con neutro de 400/230 V, 50 Hz, se conectan los receptores que indica la figura 1.33. Calcular:

a) Intensidad de línea del receptor en triángulo.
b) Intensidad en la fase R de la conexión en estrella.
c) Intensidad total en la fase R.

Solución: a) 30,98 A;
b) 4,6 A; c) 35,5 A.

P.1-7 A una línea trifásica de 400 V, 50 Hz, se conectan los receptores siguientes:

- Un receptor de impedancia $\mathbf{Z}_1 = 100 \angle 0°$ conectado entre las fases R y T.
- Un motor trifásico de 7,5 CV, factor de potencia 0,866 y rendimiento a plena carga 88%.

Calcular la intensidad en la fase R.

Solución: 14,45 A.

P.1-8 En la instalación de la figura 1.34, con línea trifásica de tensión compuesta o de línea 400 V, 50 Hz. Calcular la indicación del amperímetro.

Solución: 14,6 A.

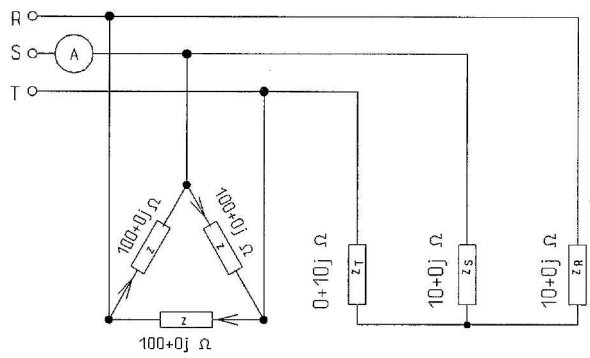


Fig. 1.32

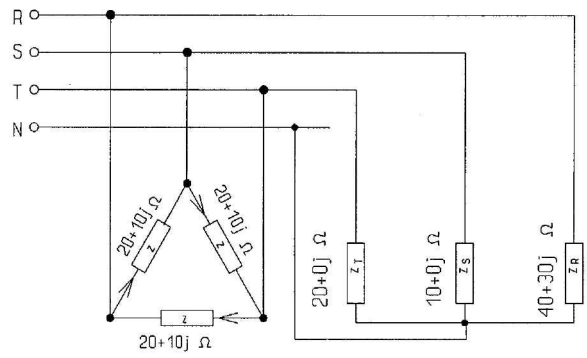


Fig. 1.33

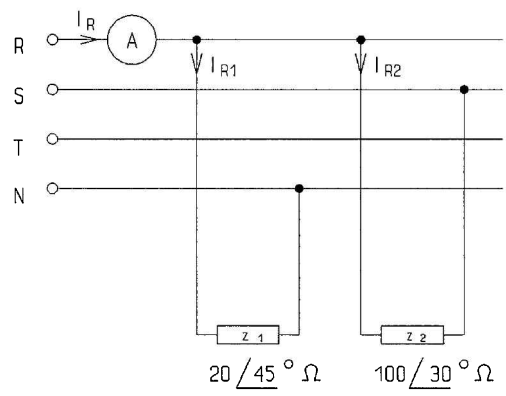


Fig. 1.34

© Ediciones Paraninfo

2 CÁLCULO ELÉCTRICO DE LÍNEAS

2.1. CÁLCULO DE LA SECCIÓN DE LOS CONDUCTORES EN LAS LÍNEAS DE BAJA TENSIÓN EN CORRIENTE ALTERNA

El cálculo eléctrico de una línea consiste en calcular la sección del conductor de forma que satisfaga unas condiciones (cálculo preliminar) o escogida una sección verificar que esas condiciones se cumplen (cálculo de comprobación).

En el cálculo de la sección de los conductores se consideran tres criterios:

1) *Calentamiento del conductor*. La densidad de corriente en el conductor debe ser limitada para disminuir el calentamiento producido al circular la corriente eléctrica. Este criterio fija la máxima intensidad de corriente por el conductor.
2) *Caída de tensión en el conductor*. La caída de tensión (diferencia entre la tensión al principio y al final de la línea), se limita para evitar el efecto que la disminución de la tensión de utilización tiene sobre el funcionamiento de los receptores, los cuales deben estar conectados a la tensión nominal para su correcto funcionamiento.

   En el cálculo de la caída de tensión en de las líneas de B.T. se tiene en cuenta la *resistencia eléctrica de los conductores* que las forman:

   - *Resistencia óhmica*. Es directamente proporcional a la longitud del conductor, inversamente proporcional a su sección y depende del tipo de material y de la temperatura.

$$R = \rho \frac{l}{s}$$

   R: Resistencia del conductor (Ω).
   l: Longitud del conductor (m).
   s: Sección del conductor (mm^2).
   ρ: Coeficiente de resistividad, según el material y la temperatura ($\Omega\ mm^2/m$).
   A la inversa de la resistividad se le denomina conductividad c.
   La resistencia de los conductores metálicos aumenta al aumentar la temperatura.

   - *Efecto pelicular o efecto Kelvin*. En corriente alterna, debido a que el flujo magnético producido por la corriente es alterno, se inducen fuerzas electromotrices en el interior del conductor que originan un desplazamiento de las cargas eléctricas a la periferia del mismo, produciendo un aumento de resistencia cuando la sección es grande. (El aumento de resistencia es menor del 2% para secciones de 300 mm^2 a la frecuencia de 50 Hz).

© Ediciones Paraninfo

- *Efecto de proximidad.* Cuando dos o más conductores están paralelos y próximos entre sí, el campo magnético producido por la corriente eléctrica que recorre un conductor actúa sobre las corrientes en los otros, produciendo una modificación de la distribución de densidad de corriente, lo que hace aumentar la resistencia del conductor.

En el cálculo eléctrico de líneas de B.T. suele considerarse solamente la resistencia óhmica de los conductores. Para cálculos más exactos en las líneas largas y secciones elevadas (superiores a 120 mm^2) se debe tener en cuenta también la reactancia inductiva.

3) *Capacidad del conductor para soportar la corriente de cortocircuito.* Debe limitarse la intensidad de corriente de cortocircuito, porque su valor muy elevado produce una excesivo calentamiento del conductor y puede originar que las fuerzas que tienden a separar o a juntar conductores próximos recorridos por esa corriente tomen un valor excesivo. En las instalaciones de interiores o receptoras de baja tensión, alejadas del centro de transformación que las alimenta, no se suele tener en cuenta este criterio para el cálculo de sección, porque se considera que la intensidad de corriente y el calentamiento producido no llegan a valores peligrosos antes de que actúen las protecciones contra cortocircuitos.

2.2. SECCIÓN MÍNIMA DE LOS CONDUCTORES POR CRITERIO TÉRMICO

Cuando circula corriente por un conductor se produce un calentamiento del mismo (debido fundamentalmente a la pérdida de energía en forma de calor o efecto Joule), aumentando su temperatura hasta que llega al equilibrio térmico cuando todo el calor producido es cedido al exterior. La temperatura de equilibrio térmico es directamente proporcional al volumen del conductor y al cuadrado de la densidad de corriente δ (relación entre la intensidad I que circula por el conductor y su sección s, $\delta = I/s$), dependiendo de las condiciones de enfriamiento. Para mantener una determinada temperatura, la densidad de corriente admisible debe disminuir al aumentar la sección del conductor.

En los conductores aislados el calor puede deteriorar los aislamientos y las máximas temperaturas admisibles dependen del material aislante.

En los conductores desnudos o sin aislamiento utilizados en líneas aéreas, la temperatura límite viene fijado por la constancia de las características mecánicas del conductor.

El cálculo de la sección de los conductores en B.T. según el calentamiento, se realiza mediante tablas de las normas UNE que indica el Reglamento electrotécnico para B.T. (REBT), que fijan las intensidades o las densidades de corriente máximas admisibles en función de la sección, del material conductor, del aislamiento y según el tipo de instalación que marca las condiciones de enfriamiento.

© Ediciones Paraninfo

- *Redes aéreas*. La sección se fija según la instrucción ITC-BT-06, por las tablas de la norma UNE 211435: 2007 que indican las intensidades admisibles en conductores para redes de distribución, aislados para una tensión superior o igual a 0,6/1 kV y temperatura ambiente de 40 °C.
- *Redes subterráneas*. La sección se fija según la instrucción ITC-BT-07, por las tablas de la norma UNE 211435: 2007 que indican las intensidades admisibles en conductores aislados para redes de distribución, con una tensión asignada superior o igual a 0,6/ 1 kV, profundidad 0,7 m, temperatura del terreno 25 °C y resistividad térmica 1,5 K·m/W.
- *Instalaciones interiores*. La sección se fija según la instrucción ITC-BT-19 y la norma UNE 20460-5-523: 2004, cuyas tablas indican las intensidades admisibles en conductores aislados con termoplásticos (PVC y similares) o termoestables (XLPE, EPR y similares), para una tensión de aislamiento hasta 1 kV y a la temperatura ambiente de 40 °C, que considera el REBT.

Cuando la temperatura ambiente o las condiciones de la instalación no coinciden con las de las tablas se utilizan unos factores de corrección para las intensidades admisibles, que están fijados en las instrucciones correspondientes de las normas.

El cálculo según este criterio puede efectuarse de dos formas:

1) *Cálculo preliminar*. Para calcular la sección del conductor necesaria para que por él circule una determinada intensidad de corriente (carga de la instalación), se divide esta intensidad por los factores de corrección necesarios y con el valor resultante se elige en las tablas la sección que admita una intensidad igual o superior.
2) *Cálculo de comprobación*. Escogida una sección, para determinar la intensidad admisible, se escoge en las tablas la intensidad correspondiente a esa sección y se multiplica este valor por los coeficientes de corrección necesarios. El valor resultante es la intensidad admisible en las condiciones de la instalación.

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

2.2-1. Calcular la intensidad admisible por criterio térmico en un cable con tres conductores de aluminio de 95 mm^2 de sección y neutro de aleación de aluminio (Almelec), con 54,6 mm^2 de sección, aislado con polietileno reticulado, tensión nominal de aislamiento 1 kV, trenzado en haz. El cable está en una línea aérea tensada entre apoyos con sujeción por el neutro expuestos al sol a la temperatura de 35°C.

La intensidad máxima admisible viene dada en la norma UNE 211435: 2007, a la temperatura ambiente de 40°C. Para otra temperatura es necesario utilizar factores de corrección.

Tabla 2.1. Factores de corrección de la intensidad máxima admisible para cables aislados en haz, en función de la temperatura ambiente UNE 211435: 2007. Tabla A.6.

Temperatura °C	20	25	30	35	40	45	50	55	60
Factor de corrección	1,18	1,14	1,10	1,05	1,00	0,95	0,89	0,84	0,77

© Ediciones Paraninfo

El factor de corrección de la intensidad que corresponde a 35ºC es 1,05, por lo que la intensidad admisible se multiplica por este factor.

La intensidad admisible para cables aislados con polietileno reticulado, en haz, instalados al aire, viene dada por la tabla A.2 de la norma UNE 211435: 2007.

Tabla 2.2. Intensidades máximas admisibles en los conductores de aluminio aislados con XLPE en haz a temperatura ambiente 40ºC (UNE 211435: 2007).

Sección mm²	Tres cables cargados		Dos cables cargados	
	Protegidos del sol	Expuestos al sol	Protegidos del sol	Expuestos al sol
Aluminio				
16	64	56	78	72
25	90	76	105	95
50	135	115	160	145
95	215	185	-	-
150	300	250	-	-
Cobre				
2,5	-	-	32	31
4	35	31	42	40
6	45	39	54	52
10	62	54	76	70
16	84	72	100	94

La intensidad admisible en el cable $185 \cdot 1{,}05 = 194{,}25$ A

2.2-2. Calcular la máxima intensidad admisible en un cable con dos conductores de aluminio de 25 mm² de sección, aislado con polietileno reticulado, tensión nominal de aislamiento 1 kV, trenzado en haz. El cable está en una línea aérea posada sobre fachada tendida al sol a la temperatura de 30ºC.

Solución: 104.5 A

2.2-3. Un cable tetrapolar de aluminio, trenzado en haz, aislado con polietileno reticulado, debe transportar un intensidad de 70 A, instalado al aire con una temperatura ambiente de 45ºC. Calcular la sección del conductor necesaria, por criterio térmico, si la línea es tendida al sol.

Solución: 25 mm²

2.2-4. Calcular la sección necesaria para la circulación de una corriente de intensidad 110 A, por tres cables de aluminio en contacto, aislados con XLPE, tensión nominal de aislamiento 1 kV, en instalación enterrada bajo tubo, a una profundidad de 0,8 m, en un terreno húmedo (con lluvia frecuente), resistividad térmica 0,8 k·m/W, a la temperatura de 20ºC.

La intensidad admisible para cables aislados con polietileno reticulado, en instalación subterránea, viene dada por la tabla A.7 de la norma UNE 211435: 2007.

© Ediciones Paraninfo

Tabla 2.3. Intensidad máxima admisible, en amperios para cables de aluminio en instalación enterrada (servicio permanente). Temperatura del terreno 25ºC. Profundidad de la instalación 0,70 m. Resistividad térmica del terreno 1,5 K·m/W. Extracto de la tabla A.7 (UNE 211435: 2007).

Sección mm²	Cables en triángulo en contacto		
	Directamente soterrados	Soterrados en tubo	Al aire protegidos del sol
25	95	82	88
50	135	115	125
95	200	175	200
150	260	230	290
240	340	305	390

Sin ningún factor de corrección se necesitaría un cable de sección 50 mm², que admite 115 A.

El factor de corrección para temperatura del terreno distinta de 25ºC para cables soterrados viene dada por la tabla A.6 de la norma UNE 211435: 2007.

Tabla 2.4. Factor de corrección para temperatura de terreno distinta de 25ºC, extracto de la tabla A.6 (UNE 211435: 2007).

Temperatura máxima del conductor ºC	Temperatura del terreno ºC								
	10	15	20	25	30	35	40	45	50
90 (XLPE o EPR)	1,11	1,07	1,04	1	0,96	0,92	0,88	0,83	0,78
105 (HEPR)	1,09	1,06	1,03	1	0,97	0,94	0,90	0,87	0,83

El factor de corrección para resistividad térmica del terreno viene dada por la tabla A.7 de la norma UNE 211435: 2007.

Tabla 2.5. Factor de corrección para resistividad térmica del terreno distinta de 1,5 K·m/W extracto de la tabla A.7 (UNE 211435: 2007).

Sección mm²	Soterrados bajo tubo, un circuito por tubo							Directamente soterrados en triángulo en contacto						
	Resistividad térmica del terreno (de más húmedo a más seco) en K·m/W							Resistividad térmica del terreno (de más húmedo a más seco) en K·m/W						
	0,8	0,9	1	1,5	2	2,5	3	0,8	0,9	1	1,5	2	2,5	3
25	1,12	1,10	1,08	1	0,93	0,88	0,83	1,25	1,20	1,16	1	0,89	0,81	0,75
35	1,13	1,11	1,09	1	0,93	0,88	0,83	1,25	1,21	1,16	1	0,89	0,81	0,75
50	1,13	1,11	1,09	1	0,93	0,87	0,83	1,26	1,21	1,16	1	0,89	0,81	0,74
70	1,13	1,11	1,09	1	0,93	0,87	0,82	1,27	1,21	1,17	1	0,89	0,81	0,74
95	1,14	1,12	1,09	1	0,93	0,87	0,82	1,28	1,22	1,18	1	0,89	0,80	0,74
120	1,14	1,12	1,10	1	0,93	0,87	0,82	1,28	1,22	1,18	1	0,88	0,80	0,74
150	1,14	1,12	1,10	1	0.93	0,87	0,82	1,28	1,22	1,18	1	0,88	0,80	0,74
185	1,14	1,12	1,10	1	0.93	0,87	0,82	1,28	1,23	1,18	1	0,88	0,80	0,74
240	1,15	1,12	1,10	1	0,92	0,86	0,81	1,29	1,23	1,18	1	0,88	0,80	0,73
300	1,15	1,13	1,10	1	0,92	0,86	0,81	1,30	1,24	1,19	1	0,88	0,80	0,73
400	1,16	1,13	1,10	1	0,92	0,86	0,81	1,30	1,24	1,19	1	0,88	0,79	0,73

© Ediciones Paraninfo

El factor de corrección para diferentes profundidades de instalación viene dada por la tabla A.8 de la norma UNE 211435:2007.

Tabla 2.6. Factores de corrección para distintas profundidades de soterramiento. Extracto de la tabla A.8 (UNE 211435:2007).

Profundidad de soterramiento (m)	0,5	0,6	0,7	0,8	1	1,25	1,5	1,75	2	2,5	3
Soterrados	1,04	1,02	1	0,99	0,97	0,95	0,93	0,92	0,91	0,89	0,88
En tubular	1,03	1,01	1	0,99	0,97	0,96	0,95	0,94	0,93	0,91	0,90

La intensidad mínima que debe admitir el cable, en la instalación normal o tipo, teniendo en cuenta los factores de corrección por temperatura (1,04), resistividad térmica del terreno (1,13) y profundidad de la instalación (0,99).

$$\frac{110}{1{,}04 \cdot 1{,}13 \cdot 0{,}99} = 94{,}5 \text{ A}$$

La sección necesaria será la de un conductor que sin ningún factor de corrección admita según la tabla 2.3. para instalación enterrada bajo tubo una intensidad superior a 94,6 A. El cable de sección 50 mm^2 es válido, por lo que esa sección es suficiente según criterio térmico.

El conductor de sección 50 mm^2 admite, con esos factores de corrección una intensidad de 115·1,04·1,13·0,99=133,8 A, mayor que los 110 A, que circularán por el conductor.

2.2-5. Calcular la máxima intensidad admisible con una terna de cables unipolares de aluminio, aislados con XLPE, tensión asignada 0,6/1 kV, sección 50 mm^2 en una instalación de distribución enterrada bajo tubo a 0,8 m, con una temperatura de terreno de 25ºC y resistividad térmica 1 K·m/W

Solución: 124,1 A

2.2-6. Calcular la intensidad admisible en una instalación trifásica con cables unipolares de aluminio, aislados con XLPE, tensión asignada 0,6/1 kV, sección 95 mm^2, si la canalización se realiza bajo tubo a 0,7 m, con otra instalación trifásica bajo tubo separada 0,2 m. Se considera una temperatura del terreno de 30ºC y resistividad térmica 1,5 K·m/W.

La intensidad admisible para el conductor a profundidad 0,7 m, temperatura del terreno 25ºC y resisitividad térmica 1,5 K·m/W está dada en la tabla 2.3. Para este le corresponde una intensidad de 175 A.

La intensidad admisible está condicionada por factores de corrección, debidos a la temperatura del terreno y al agrupamiento de circuitos.

El factor de corrección por temperatura del terreno está dado por la tabla 2.4. Para ese cable es 0,96.

El factor de corrección por agrupamiento de cables viene dado por la tabla A.9.2 de la norma UNE 211435:2007.

© Ediciones Paraninfo

Tabla 2.7. Factores de corrección para agrupaciones de ternas de cables unipolares en instalación enterrada . Extracto de la tabla A.9.2 (UNE 211435:2007)

Separación entre tubos o ternas	Número de cables o ternas de la zanja								
	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tubulares									
0 m	0,87	0,77	0,71	0,67	0,64	0,61	0,59	0,57	0,56
0,2 m	0,90	0,82	0,77	0,74	0,71	0,69	0,67	0,66	0,65
0,4 m	0,94	0,87	0,84	0,81	0,79	0,78	0,77	0,76	0,75
0,6 m	0,96	0,90	0,88	0,86	0,85	0,84	0,83	0,82	-
0,8 m	0,97	0,93	0,91	0,89	0,88	-	-	-	-
Soterrados									
0 m	0,87	0,71	0,64	0,59	0,56	0,53	0,51	0,49	0,48
0,2 m	0,88	0,79	0,74	0,70	0,67	0,65	0,63	0,62	0,61
0,4 m	0,92	0,84	0,81	0,78	0,76	0,74	0,73	0,72	0,71
0,6 m	0,94	0,88	0,85	0,83	0,82	0,80	0,80	0,79	-
0,8 m	0,96	0,91	0,89	0,87	0,86	0,85	-	-	-

Para dos tubos separados 0,2 m el factor de corrección es 0,9.

La intensidad máxima admisible por el cable es de $175 \cdot 0{,}96 \cdot 0{,}9 = 151{,}2$ A.

2.2-7. Calcular la sección necesaria en los conductores de una línea trifásica con cables de aluminio, aislado con XLPE, tensión asignada 0,6/1 kV, enterrados directamente en una zanja, en terreno de resistividad térmica 0,9 K·m/W[1]. La intensidad que debe circular por el conductor es de 100 A.

Solución: 25 mm^2

2.2-8. Calcular la sección necesaria para la circulación de una corriente de intensidad 140 A, por una línea trifásica de 400 V, subterránea con cuatro conductores unipolares de aluminio (tres fases y neutro), aislados con polietileno reticulado XLPE, tensión de aislamiento 1 kV, en instalación enterrada directamente, temperatura del terreno 30°C, con resistividad térmica 1 K·m/W .

El factor de corrección por temperatura (tabla 2.4) es 0,96, y por resistividad térmica (tabla 2.5) es 1,16. La intensidad mínima que debe admitir el cable, en instalación tipo: $140/0{,}96 \cdot 1{,}16 = 125{,}72$ A

La sección mínima de los conductores de fase (tabla 2.3) es de 50 mm^2, que admite 135 A, mayor que 125,72 A. La sección del conductor neutro viene fijada por las normas de la empresa distribuidora, si se aplica el criterio de reducción de la sección a la mitad de la de fase sería 25 mm^2.Para distribución con dos o tres conductores la sección del neutro igual a la de fase

[1] Cuando no se especifican las condiciones se consideran las normales en una instalación tipo.

© Ediciones Paraninfo

2.2-9. Calcular la intensidad admisible en un cable tetrapolar con conductores de aluminio, aislados con XLPE, tensión 0,6/1 kV, sección 35 mm^2 en instalación interior enterrada bajo tubo y separada de otra instalación entubada 0,25 m.

Tabla 2.8. Intensidades máximas admisibles (A) en instalaciones receptoras con canalización enterrada. Cables unipolares o multiconductores directamente o bajo tubo. Temperatura del terreno 25°C. Resistividad térmica del terreno 2,5 k·m/W. Según la norma UNE 20460-5-523:2004 (extracto de la tabla A.52-2 bis).

Sección mm^2	COBRE				ALUMINIO			
	Número de conductores cargados y tipo de aislamiento							
	PVC2	PVC3	XLPE2	XLPE3	PVC2	PVC3	XLPE2	XLPE3
1,5	20,5	17	24,5	21	-	-	-	-
2,5	27,5	22,5	32,5	27,5	20,5	17	24,5	21
4	36	29	42	35	27,5	22,5	32,5	27,5
6	44	37	53	44	34	28	40	34
10	59	49	70	58	45	38	53	45
16	76	63	91	75	58	49	70	58
25	98	81	116	96	76	62	89	74
35	118	97	140	117	91	76	107	90
50	140	115	166	138	107	89	126	107
70	173	143	204	170	133	111	156	132
95	205	170	241	202	157	131	185	157
120	233	192	275	230	179	149	211	178
150	264	218	311	260	202	169	239	201
185	296	245	348	291	228	190	267	226
240	342	282	402	336	263	218	309	261
300	387	319	455	380	297	247	349	295

Tabla 2.9. Factores de reducción por agrupamiento de varios circuitos en conductos enterrados, según la norma UNE 20460-5-523:2004 (extracto de la tabla A.52-E3).

N° cables o circuitos unipolares	CABLES MULTICONDUCTORES				CABLES UNIPOLARES			
	Distancia entre conductos en metros							
	0	0,25	0,5	1,0	0	0,25	0,5	1
2	0,85	0,90	0,95	0,95	0,80	0,90	0,90	0,95
3	0,75	0,85	0,90	0,95	0,70	0,80	0,85	0,90
4	0,70	0,80	0,85	0,90	0,65	0,75	0,80	0,90
5	0,65	0,80	0,85	0,90	0,60	0,70	0,80	0,90
6	0,6	0,80	0,80	0,90	0,60	0,70	0,80	0,90

La intensidad admisible 90·0,9=81 A.

2.2-10. Calcular la intensidad admisible en una instalación interior, canalización bajo tubo empotrado en pared de obra, con 3 o 4 conductores unipolares de cobre de sección 16 mm^2 aislados con PVC, tensión asignada 400/750 V.

La intensidad máxima admisible en instalaciones interiores según el REBT, (ITC-BT-19) y la norma UNE 20 460-5-523: 2004; para conductores de cobre, aislados con termoplásticos (PVC, Z1 y similares) o termoestables (XLPE, EPR, Z y similares), tensión de aislamiento hasta 1 kV y temperatura ambiente 40°C se indica en la tabla:

© Ediciones Paraninfo

Tabla 2.10. Intensidades máximas admisibles (A) en instalaciones interiores, conductores de cobre, temperatura ambiente 40°C (norma UNE 20 460-5-523:2004, extracto de la tabla A.52-1 bis).

Conductores aislados en tubos empotrados en paredes térmicamente aislantes. Método A1		PVC3	PVC2		XLPE3	XLPE2						
Cables multiconductores en tubos empotrados en paredes térmicamente aislantes. Método A2	PVC3	PVC2		XLPE3	XLPE2							
Conductores aislados en tubos (incluyendo canaletas y conductos de sección circular) en montaje superficial o empotrados en obra. Método B1				PVC3	PVC2		XLPE3		XLPE2			
Cables multiconductores en tubos (incluyendo canaletas y conductos de sección circular) en montaje superficial o empotrados en obra. Método B2			PVC3	PVC2		XLPE3	XLPE2					
Cables multiconductores directamente sobre la pared o en bandeja no perforada. Método C					PVC3		PVC2	XLPE3		XLPE2		
Cables multiconductores al aire libre o en bandeja perforada. Distancia a la pared no inferior a 0,3 D (diámetro del cable). Método E						PVC3		PVC2	XLPE3		XLPE2	
Cables unipolares en contacto mutuo o en bandeja perforada. Distancia a la pared no inferior a D. Método F							PVC3		PVC2	XLPE3		XLPE2
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Conductor	mm^2											
Cobre	1,5	11	11,5	13	13,5	15	16	16,5	19	20	21	24	
	2,5	15	16	17,5	18,5	21	22	23	26	26,5	29	33	
	4	20	21	23	24	27	30	31	34	36	38	45	
	6	25	27	30	32	36	37	40	44	46	49	57	
	10	34	37	40	44	50	52	54	60	65	68	76	
	16	45	49	54	59	66	70	73	81	87	91	105	
	25	59	64	70	77	84	88	95	103	110	116	123	140
	35		77	86	96	104	110	119	127	137	144	154	174
	50		94	103	117	125	133	145	155	167	175	188	210
	70				149	160	171	185	199	214	224	244	269
	95				180	194	207	224	241	259	271	296	327
	120				208	225	240	260	280	301	314	348	380
	150				236	260	278	299	322	343	363	404	438
	185				268	297	317	341	368	391	415	464	500
	240				315	350	374	401	435	468	490	552	590

© Ediciones Paraninfo

La intensidad máxima admisible en el conductor según la tabla anterior, en la columna 5, para 16 mm^2 es 59 A.

2.2-11. En una instalación interior se utiliza un cable multiconductor 4 conductores (tres fases y neutro) RV-K 0,6/1 kV 4×10, bajo tubo en montaje superficial. Calcular la máxima intensidad admisible considerando una temperatura ambiente de 40 °C.

Solución: 52 A

2.2-12. Calcular la sección necesaria en una distribución trifásica con neutro en instalación interior, para transportar una intensidad de 65 A con conductores unipolares de cobre, aislados con PVC, tensión asignada 400/750 V, en canalización bajo tubo empotrado en obra, junto con otros cuatro conductores pertenecientes a otro circuito, a la temperatura de 40 °C.

El factor de corrección para agrupamiento de varios circuitos o varios cables multiconductores se indica en la norma UNE 20 460-5-523, según la siguiente tabla:

Tabla 2.11. Factores de reducción para agrupamiento de varios circuitos o de varios cables multiconductores. Grupos homogéneos de cables cargados por igual, (UNE 20 460-5-523, extracto de la tabla A.52-3).

DISPOSICIÓN DE LOS CABLES CONTIGUOS	Nº de circuitos o cables multiconductores								
	1	2	3	4	5	9	12	16	20
Empotrados o embutidos. Métodos A1/A2 y B1/B2	1,00	0,80	0,70	0,70	0,58	0,50	0,45	0,4	0,4
Capa única sobre muros, suelos o bandejas no perforadas. Método C	1,00	0,85	0,80	0,75	0,70	0,70	-	-	-
Capa única en el techo. Método C	0,95	0,80	0,70	0,70	0,65	0,60	-	-	-
Capa única sobre bandejas perforadas. Métodos E y F	1,00	0,90	0,80	0,75	0,75	0,70	-	-	-
Capa única sobre escaleras de cables, abrazaderas, etc. Métodos E y F	1,00	0,85	0,80	0,80	0,80	0,80	-	-	-

El número de circuitos es 2 por lo que el factor de reducción es 0,8.

La mínima intensidad que debe admitir el conductor, para mirar en la tabla de la instalación tipo: 65/0,8=81,25 A

Según la tabla 2.10 la sección necesaria es 35 mm^2, que admite 96 A.

En instalaciones interiores, para tener en cuenta las corrientes armónicas por cargas no lineales y posibles desequilibrios, salvo justificación por cálculo, la sección del neutro será como mínimo igual a la de las fases (ITC-BT-19).

La sección de los cuatro conductores será como mínimo 35 mm^2 (4x35).

2.2-13. Calcular la máxima intensidad permitida en una instalación interior, empotrada en obra, bajo tubo con un cable tripolar de aluminio, de sección 50 mm^2, aislado con XLPE, tensión de aislamiento 1 kV a un temperatura ambiente de 40ºC.

La intensidad máxima admisible en instalaciones interiores para conductores de aluminio, tensión asignada 0,6/1 kV y temperatura ambiente 40ºC se indica en la norma UNE 20 460-5-523: 2004, según la tabla siguiente:

© Ediciones Paraninfo

Tabla 2.12. Intensidades máximas admisibles (A) en instalaciones interiores, para conductores de aluminio en tubos, tensión de aislamiento hasta 1 kV y temperatura ambiente 40°C (UNE 20 460-5-523, extracto de la tabla A.52-1 bis).

Método de instalación B1			PVC3	PVC2		XLPE3	XLPE2
Método de instalación B2		PVC3	PVC2		XLPE3	XLPE2	
Sección mm²	2,5	13,5	14	16	17	18	20
	4	18,5	19	22	24	24	27,5
	6	24	25	28	30	31	36
	10	32	34	38	42	42	50
	16	42	46	51	56	57	66
	25	54	61	64	71	72	84
	35	67	75	78	88	89	104
	50	80	90	96	106	108	127
	70		116	122	136	139	162
	95		140	148	167	169	197
	120		162	171	193	196,5	228
	150		187	197	223	227	264
	185		212	225	236	259	301
	240		248	265	300	306	355

Esta tabla indica que la máxima intensidad permitida en el cable multiconductor de sección 50 mm² es, en método de instalación B2, 106 A.

2.2-14. Calcular la máxima intensidad permitida en una instalación interior trifásica, canalización en canaleta protectora, con cables unipolares de cobre, tipo RZ1 0,6/1 kV, sección 95 mm², a una temperatura ambiente de 40°C y con otro circuito trifásico en la misma canaleta.

Según la tabla 2.10, el método de instalación es el B1 y la intensidad admisible es 224 A.

Según la tabla 2.11, para una agrupación de dos circuitos en una canal protectora el factor de corrección es 0,8.

La intensidad permitida según la norma UNE 20460-5-523 es $224 \cdot 0{,}8 = 179{,}2$ A

2.2-15. Calcular la máxima intensidad permitida en una instalación trifásica para alimentación de un motor, con canalización en bandeja perforada horizontal en contacto con otros dos circuitos trifásicos, con cables multiconductores de cobre, sección 16 mm², tipo RV 0,6/1 kV, a una temperatura ambiente de 40°C.

Según la tabla 2.10, el método de instalación es el E y la intensidad admisible es 87 A.

Según la tabla 2.11, para una agrupación de tres circuitos en contacto, en capa única sobre bandeja perforada el factor de corrección sobre la intensidad máxima permitida es 0,8.

La intensidad permitida según la norma UNE 20460 es $87 \cdot 0{,}8 = 69{,}6$ A

© Ediciones Paraninfo

2.3. CÁLCULO DE LÍNEAS POR CAÍDA DE TENSIÓN

La sección del conductor es función de la caída de tensión admisible en la línea. Las empresas distribuidoras de energía eléctrica suelen limitar la caída de tensión en las líneas distribuidoras de B.T. como máximo a un 5%. Según el Real Decreto 1955/2000 sobre transporte, distribución, comercialización y autorización de instalaciones eléctricas (artículo 104), la máxima variación de tensión a los consumidores finales no debe ser superior a $\pm 7\%$. En las instalaciones interiores según el REBT (ITC-BT-19), la caída de tensión desde el origen de la instalación interior, considerando todos los aparatos susceptibles de funcionar simultáneamente, debe ser inferior al 3% para alumbrado y al 5% para los demás usos.

Para *instalaciones industriales que se alimentan en alta tensión con transformador de distribución propio*, el origen de la instalación se considera en la salida del transformador. Las caídas de tensión máximas serán del 4,5% para alumbrado y del 6,5% para los demás usos.

En las líneas de poca longitud, el criterio de calentamiento suele dar secciones con las que se obtienen caídas de tensión inferiores a las permitidas. En las líneas largas, por el criterio de caída de tensión se suelen obtener secciones que permiten más intensidad que la que circulará por el conductor.

En el cálculo de las líneas de B.T. deben tenerse en cuenta los dos criterios y escoger la sección normalizada superior o igual a la más elevada que resulte. El cálculo se puede realizar de dos formas:

1) *Cálculo preliminar.* Fijada la máxima caída de tensión admisible en las condiciones de la instalación y la carga, se realiza el cálculo de la sección y se evalúa si la intensidad permitida por calentamiento es superior a la que circulará por el conductor.
2) *Cálculo de comprobación.* Fijada la sección del conductor y la carga de la instalación, se verifica que la caída de tensión es admisible y que la intensidad permitida por calentamiento es superior a la de carga.

De no cumplirse las condiciones es necesario aumentar la sección hasta otra normalizada que verifique esas condiciones.

2.4. CÁLCULO DE LÍNEAS DE BAJA TENSIÓN EN CORRIENTE ALTERNA CON CARGA ÚNICA

La línea puede ser monofásica o trifásica y su sección se calcula en función de la intensidad de corriente que circula por ella o de la potencia que consumen los receptores.

1) *Cálculo de una línea monofásica.*

   a) En función de la intensidad $s = \dfrac{2LI\cos\varphi}{cu}$

© Ediciones Paraninfo

s: Sección del conductor (mm^2).
L: Longitud de la línea (m).
I: Intensidad eficaz (A).
$\cos \varphi$: Factor de potencia.
u: Caída de tensión en la línea (V).
c: Conductividad del conductor.
Para el cobre, a 20ºC $c = 56$ m/Ωmm^2
Para el aluminio, a 20ºC $c = 35$ m/Ωmm^2

b) En función de la potencia $s = \dfrac{2LP}{cuV}$

P: Potencia de consumo (W).
V: Tensión de la línea (V).

Si se considera la temperatura máxima de trabajo de los conductores según el aislante, 90ºC (termoestables como XLPE) o 70ºC (termoplásticos como PVC), la resistencia aumenta un 28% en el primer caso y un 20% en el segundo, por lo que la conductividad queda dividida por 1,28 o por 1,20, respectivamente.

DEMOSTRACIÓN

Según el diagrama de la figura 2.1, la caída de tensión en la línea con carga inductiva, se puede considerar prácticamente como el producto la resistencia de los conductores de la línea por la intensidad activa:

$$u = V_1 - V_2 \approx R_L I \cos \varphi$$

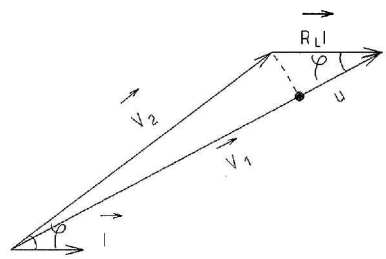


Fig. 2.1

La resistencia de la línea: $R_L = \rho \dfrac{2L}{s} = \dfrac{2L}{cs}$

Entonces: $= \dfrac{2LI\cos\varphi}{cs}$

La sección de conductor: $s = \dfrac{2LI\cos\varphi}{cu}$

La potencia activa: $P = VI\cos\varphi$; $I\cos\varphi = \dfrac{P}{V}$

La sección del conductor en función de la potencia: $s = \dfrac{2LP}{cuV}$

© Ediciones Paraninfo

2) *Cálculo de una línea trifásica.*

a) En función de la intensidad $s = \dfrac{\sqrt{3}\, L I_L \cos\varphi}{cu}$

I_L: Intensidad de línea (A).
u: Caída de tensión de línea (V).

b) En función de la potencia $s = \dfrac{LP}{cuV_L}$

V_L: Tensión de línea (V).

DEMOSTRACIÓN

En la línea trifásica se tiene en cuenta solamente el conductor de fase $s = \dfrac{LP}{cuV_L}$

Sustituyendo el valor de la potencia activa $P = \sqrt{3}\, V_L I_L \cos\varphi$

La sección en función de la intensidad $s = \dfrac{\sqrt{3}\, L I_L \cos\varphi}{cu}$

La sección mínima de los conductores de las líneas de distribución se adopta de según las instrucciones ITC-BT-06 (líneas aéreas) e ITC-BT-07 (líneas subterráneas) y de conformidad con las normas particulares de la compañía suministradora. La sección del conductor neutro será según la sección del conductor de fase:

- A dos o a tres hilos (fase y neutro o dos fases y neutro): Igual a la del conductor de fase.
- A cuatro hilos (tres fases y neutro) la sección del neutro será la indicada en de conformidad con las normas de la compañía suministradora y como mínimo la mitad de la sección de los conductores de fase.

En instalaciones interiores, para tener en cuenta las corrientes armónicas por cargas no lineales y posibles desequilibrios, salvo justificación por cálculo, la sección del neutro será como mínimo igual a la de las fases (ITC-BT-19).

Cuando en la línea trifásica se prevén fuertes desequilibrios de carga, se suele adoptar una sección de 1,2 veces la determinada por cálculo.

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

2.4-1. Calcular la sección de los conductores de una línea monofásica de 230 V, 50 Hz, con una caída de tensión del 1 % y que alimenta una instalación que consume 30 A con un factor de potencia unidad. Los conductores son de cobre, unipolares, aislados con PVC, 750 V, y la canalización es empotrada en obra bajo tubo, de longitud 40 m.

La caída de tensión: $u = \dfrac{1 \cdot 230}{100} = 2{,}3 \text{ V}$

La sección de los conductores: $s = \dfrac{2LI\cos\varphi}{cu} = \dfrac{2 \cdot 40 \cdot 30 \cdot 1}{56 \cdot 2{,}3} = 18{,}63 \text{ mm}^2$

La sección más próxima por exceso es 25 mm^2, que según la instrucción ITC-BT-19, norma UNE 20460, admite una intensidad de 84 A (tabla 2.10 del libro), mayor que 30.

© Ediciones Paraninfo

2.4-2. Una línea monofásica de 230 V, 50 Hz, alimenta una instalación que consume 15 A con un factor de potencia de 0,9 inductivo. Los conductores son de cobre, unipolares, aislados con policloruro de vinilo, para 750 V y la canalización es empotrada en obra bajo tubo, de longitud 25 m. Calcular la sección de los conductores admitiendo una caída de tensión del 0,5 %

Solución: 16 mm^2

2.4-3. Calcular la sección de los conductores de cobre, unipolares, aislados con PVC, 750 V, en canalización interior empotrada en obra bajo tubo, de longitud 20 m, que alimenta una instalación monofásica de 230 V, 4 kW y factor de potencia 0,86. La caída de tensión admisible es el 2%.

La caída de tensión: $u = \dfrac{2 \cdot 230}{100} = 4{,}6$ V

La sección del conductor: $s = \dfrac{2LP}{cuV} = \dfrac{2 \cdot 20 \cdot 4\,000}{56 \cdot 4{,}6 \cdot 230} = 2{,}7$ mm^2

La sección comercial más próxima por exceso es 4 mm^2, que según la instrucción ITC-BT-19, norma UNE 20460-5-523: 2004, admite una intensidad de 27 A (tabla 2.10 del libro), a temperatura ambiente de 40 °C.

La intensidad que consume el receptor:

$$P = VI\cos\varphi;\ I = \frac{P}{V\cos\varphi} = \frac{4\,000}{230 \cdot 0{,}86} = 20{,}2 \text{ A}$$

Esta intensidad es menor que la intensidad admisible, por lo que la sección de 4 mm^2 es válida. Si la intensidad de consumo del receptor fuese mayor de la permitida por el REBT para esa sección, habría que escoger una sección comercial mayor, hasta que el conductor pudiese transportar la intensidad de consumo.

2.4-4. Una línea monofásica de longitud 20 m está formada por conductores de cobre de 16 mm^2 de sección y alimenta a la tensión de 230 V una vivienda de electrificación elevada (potencia de consumo 9,2 kW y factor de potencia 1). Calcular la caída de tensión en la línea.

Solución: 0,78%

2.4-5. Calcular la sección de la línea de alimentación a un receptor trifásico de 10 kW, 400 V, cos φ=0,8, conectado a una red trifásica de 400 V, 50 Hz. La línea está formada por un cable tripolar, de longitud 40 m, con conductores de cobre aislados con PVC, 750 V, en canalización interior bajo tubo en montaje superficial. La caída de tensión admisible es del 1%.

La caída de tensión $u = \dfrac{1 \cdot 400}{100} = 4$ V

La sección de los conductores $s = \dfrac{LP}{cuV_L} = \dfrac{40 \cdot 10\,000}{56 \cdot 4 \cdot 400} = 4{,}46$ mm^2

La sección comercial más próxima por exceso es 6 mm^2, que según la instrucción ITC-BT-19, norma UNE 20460-5-523: 2004, admite una intensidad de 30 A (tabla 2.10).

© Ediciones Paraninfo

La intensidad absorbida por el receptor:

$$P = \sqrt{3}\, V_L I_L \cos\varphi; \quad I_L = \frac{P}{\sqrt{3}\, V_L \cos\varphi} = \frac{10\,000}{\sqrt{3}\cdot 400\cdot 0{,}8} = 18 \text{ A}$$

Esta intensidad es menor que la admitida por el REBT, por lo que la sección es válida.

2.4-6. Calcular la longitud máxima que puede tener una línea trifásica, con conductores de cobre de 10 mm^2 de sección, que alimenta a un receptor de 7 kW, 400 V y factor de potencia 0,9 inductivo. La caída de tensión no debe sobrepasar el 1%.

Solución: 128 m

2.4-7. Una instalación trifásica a 400 V, consume una intensidad de 48 A con $\cos\varphi = 0{,}9$ inductivo, y está alimentada por una línea de longitud 60 m, formada por conductores de aluminio de sección 16 mm^2, aislados con XLPE. Calcular la caída de tensión en la línea en tanto por cien, considerando la temperatura máxima de trabajo (90°C).

De la fórmula del cálculo de la sección se obtiene la caída de tensión.

$$u = \frac{\sqrt{3}\, L I_L \cos\varphi}{cs} = \frac{\sqrt{3}\cdot 60\cdot 48\cdot 0{,}9}{\frac{35}{1{,}28}\cdot 16} = 10{,}26 \text{ V}$$

La caída de tensión porcentual $u\% = \frac{u\cdot 100}{V_L} = \frac{10{,}26\cdot 100}{400} = 2{,}57\%$

2.4-8. Un receptor trifásico consume una intensidad de 38 A con factor de potencia 0,8 inductivo. Está alimentado por una línea formada por tres cables unipolares con conductores de cobre, aislados con XLPE, tensión de aislamiento 1 kV, en instalación interior bajo tubo empotrado en obra, de longitud 40 m. La tensión de línea es 400 V y la caída de tensión permitida del 1,5%. Calcular la sección de los conductores.

Solución: 10 mm^2

2.4-9. Calcular la sección de la línea trifásica, formada por un cable tetrapolar con conductores de cobre, aislado con EPR, tensión asiganda 0,6/1 kV, en canalización bajo tubo empotrado en obra. La línea alimenta a 400 V, 50 Hz, una instalación en la que se considera un consumo de 78 A con una factor de potencia 0,86 inductivo. En la instalación se prevén desequilibrios de carga entre las fases, por lo que se incrementa la sección calculada en un 20%. La longitud de la línea es de 70 m y la máxima caída de tensión permitida es del 1%.

Solución: 50 mm^2

2.5. CÁLCULO DE LÍNEAS DE DISTRIBUCIÓN ABIERTAS DE SECCIÓN UNIFORME

La línea (fig. 2.2), puede ser monofásica o trifásica y su sección puede calcularse en función de la intensidad de corriente que circula por ella o de la potencia que consumen los receptores.

© Ediciones Paraninfo

1) *Cálculo de una línea monofásica.*

a) En función de la potencia. Cuando las cargas de los receptores vienen dadas en potencias, como la caída de tensión debe ser relativamente pequeña, puede tomarse para todos los receptores la misma tensión, igual a la nominal de la línea:

$$s = \frac{2\,(L_1P_1 + L_2P_2 + \ldots L_nP_n)}{cuV} = \frac{2\sum(LP)}{cuV}$$

P: Potencia que consume cada receptor conectado (W).

L: Longitud de la línea, del extremo de alimentación a cada receptor(m).

V: Tensión de la línea (V).

s: Sección del conductor (mm^2).

u: Caída de tensión en la línea (V).

c: Conductividad del conductor ($m/\Omega mm^2$).

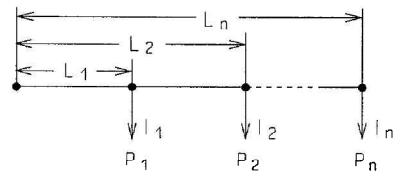


Fig. 2.2

b) En función de la intensidad $s = \frac{2\sum(LI\cos\varphi)}{cu}$

I: Intensidad eficaz de cada receptor (A).

$\cos\varphi$: Factor de potencia de cada receptor.

DEMOSTRACIÓN

La caída de tensión total es la suma de las caídas de tensión en cada tramo de la línea. Siendo las longitudes de cada tramo de la línea (fig. 2.2) l_1, l_2,...l_n, la caída de tensión:

$$u = \frac{2l_1(P_1 + P_2 + \ldots P_n)}{csV} + \frac{2l_2(P_2 + \ldots P_n)}{csV} + \ldots \frac{2l_nP_n}{csV}$$

$$u = \frac{2l_1P_1 + 2(l_1 + l_2)P_2 + \ldots 2(l_1 + l_2 + \ldots l_n)P_n}{csV}$$

Las longitudes al origen de la línea:

$$L_1 = l_1$$
$$L_2 = l_1 + l_2$$
$$L_n = l_1 + l_2 + \ldots l_n$$

La caída de tensión: $u = \frac{2L_1P_1 + 2L_2P_2 + \ldots 2L_nP_N}{csV} = \frac{2\sum(LP)}{csV}$

La sección: $s = \frac{2\sum(LP)}{cuV}$

Al producto LP se le llama momento eléctrico, por analogía con el momento de una fuerza en mecánica.

Sustituyendo el valor de la potencia $P = VI\cos\varphi$, en la fórmula de la sección.

$$s = \frac{2\sum(LVI\cos\varphi)}{cuV} = \frac{2V\sum(LI\cos\varphi)}{cuV} = \frac{2\sum(LI\cos\varphi)}{cu}$$

© Ediciones Paraninfo

2) *Cálculo de una línea trifásica.*

a) En función de la potencia $s = \dfrac{\Sigma (LP)}{cuV_L}$

V_L: Tensión de línea (V).
u: Caída de tensión de línea (V).

b) En función de la intensidad $s = \dfrac{\sqrt{3}\ \Sigma (LI_L \cos\varphi)}{cu}$

I_L: Intensidad de línea de cada receptor(A).

Para comprobar que la densidad de corriente en cada tramo de la línea no sobrepasa los valores permitidos por el Reglamento electrotécnico para baja tensión, se suelen considerar las intensidades de carga en fase, sin descomponerlas en sus componentes activas y reactivas, admitiendo como factor de potencia común el más desfavorable, con lo que las intensidades de corriente serán consideradas por exceso.

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

2.5-1. Calcular la sección de la línea monofásica representada en la figura 2.3. Los conductores son de cobre, unipolares, aislados con PVC, 750 V, en montaje superficial bajo tubo, la tensión 230 V y la caída de tensión máxima 1,5%.

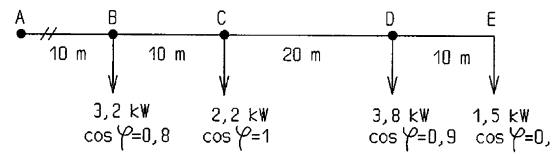


Fig. 2.3

La caída de tensión en la línea: $u = \dfrac{1{,}5 \cdot 230}{100} = 3{,}45\ V$

La sección del conductor: $s = \dfrac{2\,\Sigma (LP)}{cuV}$

La suma de momentos: ΣLP

$10 \cdot 3\,200 = 32\,000$
$20 \cdot 2\,200 = 44\,000$
$40 \cdot 3\,800 = 152\,000$ m·W
$50 \cdot 1\,500 = 75\,000$
$303\,000$

La sección: $s = \dfrac{2\,\Sigma (LP)}{cuV} = \dfrac{2 \cdot 303\,000}{56 \cdot 3{,}45 \cdot 230} = 13{,}6\ \text{mm}^2$

La sección comercial inmediatamente superior es de 16 mm², que según el REBT instrucción ITC-BT-19, admite una intensidad de 66 A (tabla 2.10 del libro).

La intensidad que circula por el tramo AB, es la intensidad de toda la línea, que suponemos con el factor de potencia más desfavorable 0,8:

$$I = \frac{P}{V\cos\varphi} = \frac{3\,200 + 2\,200 + 3\,800 + 1\,500}{230 \cdot 0{,}8} = \frac{10\,700}{230 \cdot 0{,}8} = 58{,}15\ \text{A}$$

Esta intensidad es menor que la permitida por el conductor por lo que la sección de 16 mm² es válida.

© Ediciones Paraninfo

2.5-2. Calcular la caída de tensión en la línea monofásica 230 V, 50 Hz, de la figura 2.4, con conductor RZ 0,6/1 kV 2×25 Al.

Solución: 3,11 %

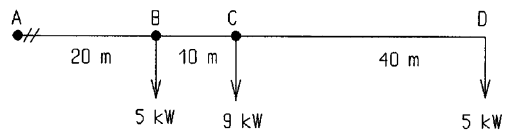


Fig. 2.4

2.5-3. La línea trifásica, de 400 V, representada en la figura 2.5, está formada por conductores de cobre, unipolares, de sección 25 mm², aislados con PVC en instalación bajo tubo. Calcular la caída de tensión a la temperatura máxima de trabajo (70°C).

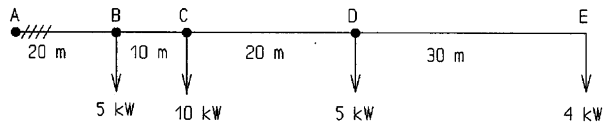


Fig. 2.5

La suma de momentos:

$$\Sigma(LP)$$

$20 \cdot 5\,000 = 100\,000$

$30 \cdot 10\,000 = 300\,000$

$50 \cdot 5\,000 = 250\,000$ m·W

$80 \cdot 4\,000 = 320\,000$

$970\,000$

La sección: $s = \dfrac{\Sigma(LP)}{cuV_L}$

La caída de tensión: $u = \dfrac{\Sigma(LP)}{csV_L} = \dfrac{970\,000}{\dfrac{56}{1,2} \cdot 25 \cdot 400} = 2,08$ V

En tanto por cien: $u\% = \dfrac{u \cdot 100}{V_L} = \dfrac{2,08 \cdot 100}{400} = 0,52\%$

2.5-4. En la línea trifásica de la figura 2.6, de 400 V, 50 Hz, con cable multiconductor de aluminio en instalación enterrada aislados con XLPE. Calcular:

a) Momento eléctrico total.

b) Sección de los conductores de fase, admitiendo una caída de tensión del 5%. y un factor de potencia global para todas las cargas 0,9.

Solución: a) 17,5 km·kW; b) 70 mm²

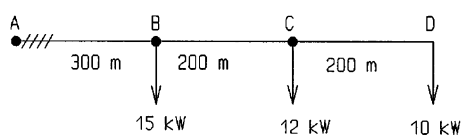


Fig. 2.6

2.5-5. La línea trifásica representada en la figura 2.7, está alimentada con una tensión de línea de 400 V. Los conductores serán de aluminio, trenzados en haz, aislados con polietileno reticulado, en instalación aérea posada sobre fachada expuesta al sol. La caída de tensión admitida es del 2% y las cargas son inductivas. Calcular la sección:

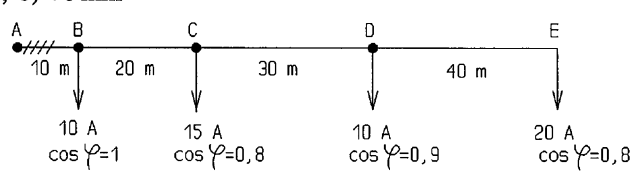


Fig. 2.7

La caída de tensión en la línea: $u = \dfrac{2 \cdot 400}{100} = 8\ V$

© Ediciones Paraninfo

La sección: $s = \dfrac{\sqrt{3}\ \Sigma(LI_L\cos\varphi)}{cu}$

La suma de momentos: $\Sigma L \cdot I_L \cdot \cos\varphi$

$$\begin{aligned} 10\cdot10\cdot1 &= 100 \\ 30\cdot15\cdot0{,}8 &= 360 \\ 60\cdot10\cdot0{,}9 &= 540 \\ 100\cdot20\cdot0{,}8 &= \underline{1\,600} \\ & 2\,600 \end{aligned} \quad \text{m·A}$$

La sección del conductor de fase: $s = \dfrac{\sqrt{3}\ \Sigma(LI_L\cos\varphi)}{cu} = \dfrac{\sqrt{3}\cdot2\,600}{35\cdot8} = 16{,}1\ \text{mm}^2$

Según el REBT instrucción ITC-BT-06, la sección del conductor más próxima por exceso es 25 mm², que admite 76 A (tabla 2.2 del libro).

La intensidad que circula por el primer tramo AB (tramo más desfavorable) es la intensidad correspondiente a todas las cargas, que para simplificar consideramos en fase, dando así un valor por exceso.

$$I_L = 10 + 15 + 10 + 20 = 55\ \text{A}$$

Valor inferior al que admite el conductor, por lo que los conductores de la línea serán RZ 0,6/1 kV 4×25.

Para hallar el valor exacto de la intensidad total, se descomponen las intensidades en sus componentes activas y reactivas o se utilizan números complejos. Así, sumando las intensidades de línea en forma compleja, se obtiene la intensidad de línea total.

$$\begin{aligned} I_{L1} &= 10 + 0j \\ I_{L2} &= 12 - 9j \\ I_{L3} &= 9 - 4{,}36j \\ \underline{I_{L4}} &= \underline{16 - 12j} \\ I_L &= 47 - 25{,}36j = 53{,}4\angle -28{,}35° \end{aligned}$$

El valor de la intensidad de línea es inferior al valor hallado considerando todas las intensidades en fase. Para simplificar los cálculos, en la práctica, se desprecia esta diferencia y se calcula la intensidad por exceso.

2.5-6. Calcular la caída de tensión en la línea representada en la figura 2.8, formada por conductor RZ 0,6/1 kV 3×50 Al/54,6 Alm. La tensión de línea es de 380 V.

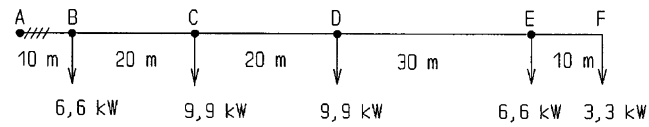


Fig. 2.8

Solución: 0,66%

2.6. CÁLCULO DE LÍNEAS DE DISTRIBUCIÓN ABIERTAS DE SECCIÓN NO UNIFORME

Con secciones de la línea proporcionales a la intensidad o potencia que soportan se consigue mayor economía que con líneas de sección uniforme. La sección más

© Ediciones Paraninfo

económica será aquella que de lugar a un volumen de material mínimo.

En la práctica se divide la línea en tramos que se calculan independientemente, considerando todas las cargas que soporta y su caída de tensión.

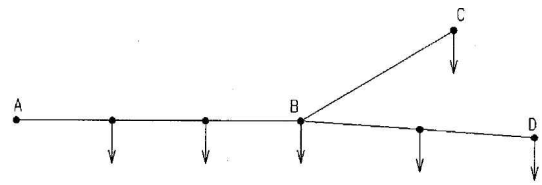


Fig. 2.9

La caída de tensión total debe ser la suma de las caídas de tensión parciales, desde el origen al extremo de la línea.

Para una línea de finales ramificados como la de la figura 2.9, la caída de tensión u_1 en el tramo inicial AB, que da lugar a un volumen mínimo, siendo u la caída de tensión total, se calcula:

$$u_1 = \frac{u}{1 + \sqrt{\dfrac{C \cdot L_{BC} + D \cdot L_{BD}}{B \cdot L_{AB}}}}$$

Siendo B, C y D los momentos eléctricos de los tramos AB, BC y BD.

$$B = \sum (LI\cos\varphi)_{AB} \quad C = \sum (LI\cos\varphi)_{BC} \quad D = \sum (LI\cos\varphi)_{BD}$$

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

2.6-1. En la línea trifásica a 400/230 V, de la figura 2.10, con conductores de cobre, se admite una caída de tensión total del 2%. Calcular:

a) Caída de tensión en los tramos AB, BC y BD para un volumen mínimo de cobre.

b) Sección teórica del conductor de fase en cada tramo.

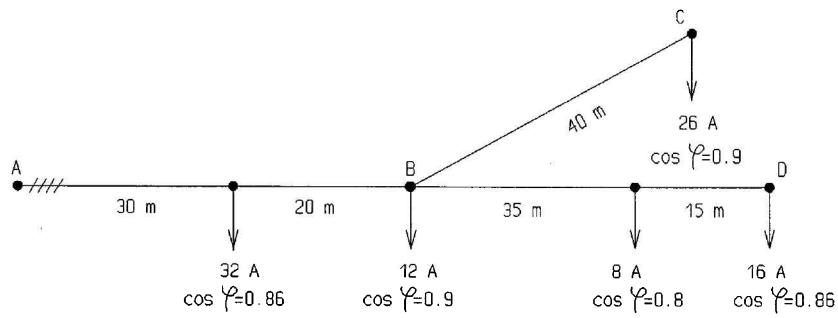


Fig. 2.10

a) El momento eléctrico en los distintos tramos, considerando la intensidad de línea.

$B = \sum (LI_L\cos\varphi)_{AB} = 30 \cdot 32 \cdot 0{,}86 + 50 \cdot (12 \cdot 0{,}9 + 8 \cdot 0{,}8 + 16 \cdot 0{,}86 + 26 \cdot 0{,}9) = 3\,543{,}6 \text{ A} \cdot \text{m}$

$C = \sum (LI_L\cos\varphi)_{BC} = 40 \cdot 26 \cdot 0{,}9 = 936 \text{ A} \cdot \text{m}$

$D = \sum (LI_L\cos\varphi)_{BD} = 35 \cdot 8 \cdot 0{,}8 + 50 \cdot 16 \cdot 0{,}86 = 912 \text{ A} \cdot \text{m}$

© Ediciones Paraninfo

La caída de tensión total: $u = 2 \cdot \frac{400}{100} = 8$ V

La caída de tensión en el tramo AB:

$$u_1 = \frac{u}{1 + \sqrt{\frac{C \cdot L_{BC} + D \cdot L_{BD}}{B \cdot L_{AB}}}} = \frac{8}{1 + \sqrt{\frac{40 \cdot 936 + 50 \cdot 912}{50 \cdot 3\,543,6}}} = 4,75 \text{ V}$$

La caída de tensión en los tramos BC y BD $u_2 = 8 - 4,75 = 3,25$ V

b) La sección en el tramo AB:

$$s_{AB} = \frac{\sqrt{3} \sum (L I_L \cos\varphi)_{AB}}{c u_1} = \frac{\sqrt{3} \cdot 3\,543,6}{56 \cdot 4,75} = 23,07 \text{ mm}^2$$

La sección en el tramo BC:

$$s_{BC} = \frac{\sqrt{3} \sum (L I_L \cos\varphi)_{BC}}{c u_2} = \frac{\sqrt{3} \cdot 936}{56 \cdot 3,25} = 8,9 \text{ mm}^2$$

La sección en el tramo BD:

$$s_{BD} = \frac{\sqrt{3} \sum (L I_L \cos\varphi)_{BD}}{c u_2} = \frac{\sqrt{3} \cdot 912}{56 \cdot 3,25} = 8,68 \text{ mm}^2$$

Es necesario escoger las secciones comerciales más próximas por exceso y comprobar que la intensidad de corriente que circula por cada tramo está permitida por el REBT. Con empleo de estas nuevas secciones las caídas de tensión serán distintas y también el volumen de material conductor.

2.6-2. Calcular la caída de tensión y la sección teórica en los tramos AB, BC y BD de la línea monofásica a 230 V de la figura 2.11, con conductores de cobre, para que el volumen de material sea mínimo. La caída de tensión máxima admisible es del 2% y el factor de potencia común para todas las carga 0,8 inductivo.

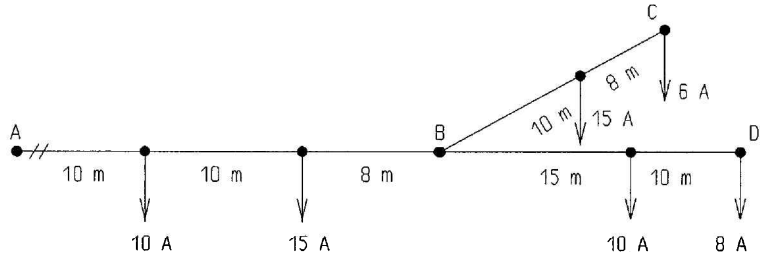


Fig. 2.11

Solución: $u_1 = 2,94$ V; $s_{AB} = 14,5$ mm^2; $s_{BC} = 4,44$ mm^2; $s_{BD} = 6,02$ mm^2

2.6-3. La línea trifásica a 400 V, representada en la figura 2.12, se quiere realizar con conductores unipolares de cobre H07V-U, en instalación empotrada en obra bajo tubo. Calcular la sección de los tramos AD, DH y DF, considerando las caídas de tensión porcentuales indicadas y un factor de potencia común a todas las cargas de 0,8.

© Ediciones Paraninfo

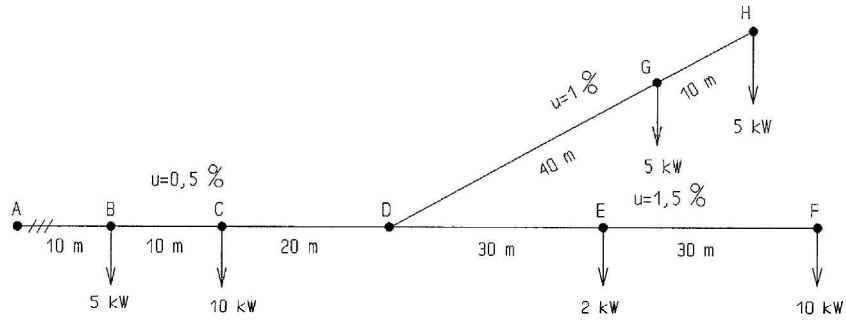


Fig. 2.12

La caída de tensión en el tramo AD:

$$u_1 = \frac{0{,}5 \cdot 400}{100} = 2 \text{ V}$$

Considerando en el punto D toda la carga conectada a este punto fuera del tramo 2+10+5+5=22 kW.

La sección $s_1 = \dfrac{\Sigma (LP)_1}{c u_1 V_L} = \dfrac{10 \cdot 5\,000 + 20 \cdot 10\,000 + 40 \cdot 22\,000}{56 \cdot 2 \cdot 400} = 25{,}22 \text{ mm}^2$

Según la instrucción ITC-BT-19 la sección normalizada inmediatamente superior es de 35 mm², que admite, a la temperatura ambiente de 40 °C, la intensidad de 96 A (tabla 2.10 del libro).

Las intensidad que circula por el tramo AB es la intensidad total

$$I_{L1} = \frac{P_1}{\sqrt{3} \cdot V_L \cdot \cos\varphi} = \frac{(5 + 10 + 22).10^3}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0{,}8} = 66{,}76 \text{ A}$$

Esta intensidad es menor que la permitida por el conductor de 35 mm², por lo que se elige para el tramo AD esta sección.

La caída de tensión en el tramo DH $u_2 = \dfrac{1 \cdot 400}{100} = 4$ V

La sección $s_2 = \dfrac{\Sigma (LP)_2}{c u_2 V_L} = \dfrac{40 \cdot 5\,000 + 50 \cdot 5\,000}{56 \cdot 4 \cdot 400} = 5{,}02 \text{ mm}^2$

Según el REBT instrucción ITC-BT-19, la sección normalizada inmediatamente superior es de 6 mm² que admite una intensidad de 32 A (tabla 2.10 del libro).

Las intensidad que circula por el tramo DG es la intensidad total de la derivación DH.

$$I_{L2} = \frac{P_2}{\sqrt{3} \cdot V_L \cdot \cos\varphi} = \frac{(5 + 5).10^3}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0{,}8} = 18 \text{ A}$$

Esta intensidad es menor que la permitida por el conductor de 6 mm² por lo que se elige para el tramo DH esta sección.

La caída de tensión en el tramo DF $u_3 = \dfrac{1{,}5 \cdot 400}{100} = 6$ V

© Ediciones Paraninfo

La sección $s_3 = \dfrac{\Sigma (LP)_3}{c u_3 V_L} = \dfrac{30 \cdot 2\,000 + 60 \cdot 10\,000}{56 \cdot 6 \cdot 400} = 4{,}91 \text{ mm}^2$

Según el REBT instrucción ITC-BT-19, la sección normalizada inmediatamente superior es de 6 mm² que admite una intensidad de 32 A (tabla 2.10 del libro).

Las intensidad por el tramo DE es la intensidad total de la derivación DF.

$$I_{L3} = \frac{P_3}{\sqrt{3} \cdot V_L \cdot \cos\varphi} = \frac{(2 + 10).10^3}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0{,}8} = 21{,}65 \text{ A}$$

Esta intensidad es menor que la permitida por el conductor de 6 mm² por lo que se elige para el tramo DF esta sección.

2.6-4. La línea monofásica, representada en la figura 2.13, está formada por un cable, con dos conductores de cobre, aislados con polietileno reticulado en instalación superficial. La tensión es de 230 V y las secciones están indicadas. Calcular la caída de tensión en los tramos AD, DG y DF.

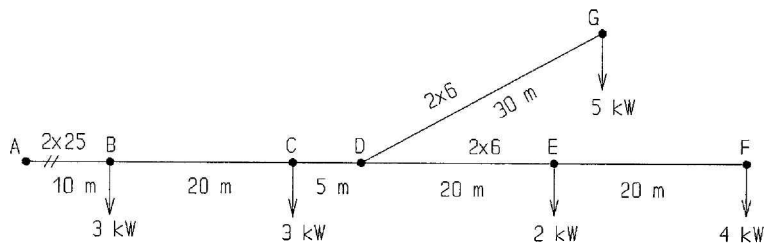


Fig. 2.13

Solución: $u_{AD}=1{,}36\%$; $u_{DG}=1{,}69\%$; $u_{DF}=2{,}25\%$

2.6-5. Una línea de distribución en BT está formada por conductores de aluminio trenzados en haz, con las secciones y disposición indicada en la figura 2.14. Calcular las caídas de tensión en los distintos tramos y la máxima caída de tensión. Tensión de alimentación 380/220 V.

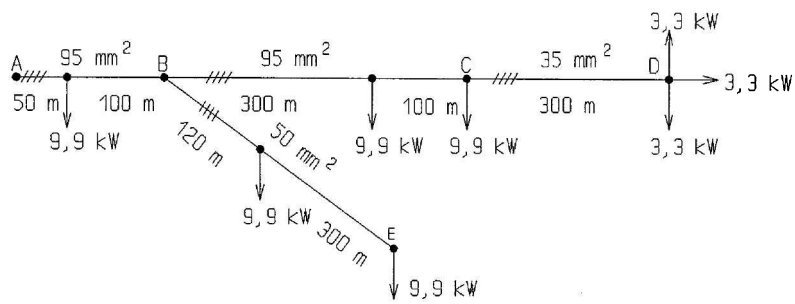


Fig. 2.14

Solución: $u_{AB}=1{,}65\%$; $u_{BC}=2{,}27\%$; $u_{CD}=1{,}68\%$; $u_{BE}=2{,}12\%$; $u_{AD}=5{,}6\%$

© Ediciones Paraninfo

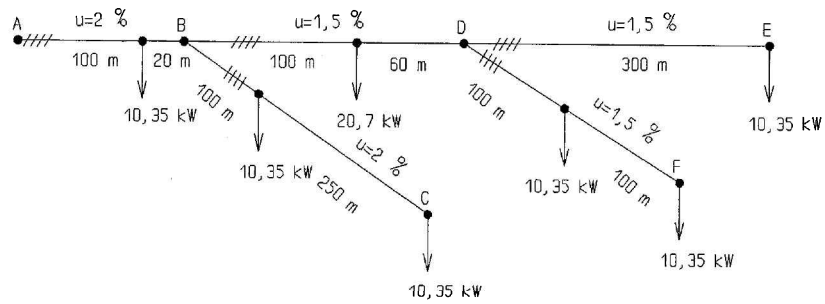


Fig. 2.15

2.6-6. Calcular la sección de los distintos tramos de la línea de distribución trifásica indicada en la figura 2.15. El conductor es de aluminio trenzado en haz, aislado con polietileno reticulado, para instalación al aire con neutro fiador. La tensión de línea es 400 V y la caída de tensión máxima es la indicada en cada tramo. Se considera un factor de potencia unidad para todas las cargas.

Solución: $s_{AB}=s_{BD}=95$ mm^2; $s_{BC}=s_{DE}=s_{DF}=50$ mm^2

2.7. CÁLCULO DE LÍNEAS DE SECCIÓN UNIFORME, ALIMENTADAS POR DOS EXTREMOS A LA MISMA TENSIÓN

Considerando una línea de longitud L, alimentada por sus dos extremos A y A' (fig. 2.16), se procede de la forma siguiente:

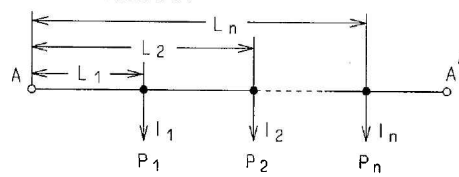


Fig. 2.16

Se halla el *punto de mínima tensión* M (que recibe corriente por los dos lados), el cual divide la línea en dos líneas abiertas de sección uniforme.

Para ello se calcula la carga que soporta cada extremo:

a) En función de la potencia que consumen los receptores:

$$P_{A'} = \frac{\Sigma(PL)}{L} \qquad P_A = \Sigma P - P_{A'}$$

b) En función de la intensidad de corriente $I_{A'} = \dfrac{\Sigma(LI)}{L}$ $\qquad I_A = \Sigma I - I_{A'}$

En corriente alterna se utilizan intensidades activas.

La carga suministrada por un extremo se calcula sumando los momentos de las cargas respecto al otro extremo y dividiendo por la longitud total de la línea.

DEMOSTRACIÓN

Considerando una línea alimentada por los dos extremos A y A' a la misma tensión, con una carga intermedia (fig. 2.17), la caída de tensión total entre A y A´ es nula por estar los dos puntos a la misma

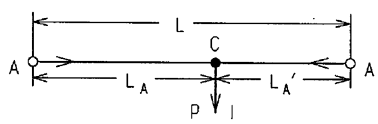


Fig. 2.17

© Ediciones Paraninfo

tensión. Cada extremo suministra una potencia P_A y $P_{A'}$, de forma que la potencia de la carga $P=P_A+P_{A'}$.

$$u = \frac{2L_AP_A}{csV} - \frac{2L_{A'}P_{A'}}{csV} = 0;\ L_AP_A = L_{A'}P_{A'}$$

La potencia suministrada por el extremo A':

$$P_{A'} = P - P_A;\ P_{A'} = P - \frac{L_{A'}P_{A'}}{L_A};\ P_{A'} = \frac{L_AP}{L_A + L_{A'}} = \frac{L_AP}{L}$$

Para una línea con varias cargas $P_{A'} = \frac{\Sigma(LP)}{L};\ P_A = \Sigma P - P_{A'}$

Se calcula la *sección* de una de las líneas abiertas, considerando en ella toda la caída de tensión. Esta sección es la de la línea cerrada.

En estas líneas de corriente alterna, para hallar la intensidad en cada tramo, se suelen simplificar los cálculos considerando las intensidades en fase, teniendo en cuenta el factor de potencia más desfavorable. De esta forma las densidades de corriente calculadas en los conductores serán algo superiores a las verdaderas.

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

2.7-1. Calcular la sección de la línea trifásica de cobre representada en la figura 2.18. Los conductores forman un cable tetrapolar aislado con XLPE, para 1 kV, en instalación interior bajo tubo en montaje superficial. La tensión de línea es 400 V y la caída de tensión máxima admisible 2%. Se considera un factor de potencia común para todas las cargas de 0,8 inductivo.

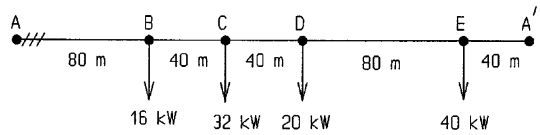


Fig. 2.18

Se calcula la carga que soporta cada extremo en función de la potencia que consumen los receptores:

$$P_{A'} = \frac{\Sigma(LP)}{L} = \frac{80\cdot16\,000 + 120\cdot32\,000 + 160\cdot20\,000 + 240\cdot40\,000}{280} = 64\,000\ \text{W} = 64\ \text{kW}$$

$$P_A = \Sigma P - P_{A'} = 108 - 64 = 44\ \text{kW}$$

El punto de mínima tensión es C, que recibirá desde A una potencia de 28 kW y desde A' una potencia de 4 kW.

Se calcula la sección de una de las líneas abiertas, considerando en ella toda la caída de tensión. Esta sección es la de toda la línea.

Considerando el tramo AC:

La caída de tensión en el tramo $u = \frac{2\cdot400}{100} = 8\ \text{V}$

La sección $s = \frac{\Sigma(LP)}{cuV_L} = \frac{80\cdot16\,000 + 120\cdot28\,000}{56\cdot8\cdot400} = 25{,}9\ \text{mm}^2$

Según la ITC-BT-19 y la norma UNE 20460, la sección normalizada inmediatamente superior es de 35 mm², que admite una intensidad de 110 A (tabla 2.10 del libro).

© Ediciones Paraninfo

La intensidad que circula por el tramo AB es la total de la derivación AC.

$$I_{L1} = \frac{P_1}{\sqrt{3}\cdot V_L\cdot\cos\varphi} = \frac{(16+28).10^3}{\sqrt{3}\cdot 400\cdot 0{,}8} = 79{,}39 \text{ A}$$

Las intensidad por el tramo A'E es la intensidad total de la derivación A'C.

$$I_{L2} = \frac{P_2}{\sqrt{3}\cdot V_L\cdot\cos\varphi} = \frac{(40+20+4).10^3}{\sqrt{3}\cdot 400\cdot 0{,}8} = 115{,}5 \text{ A}$$

Esta intensidad es mayor que la permitida por el conductor de 35 mm² por lo que se elige el conductor de sección 50 mm², que según el REBT instrucción ITC-BT-19 y norma UNE 20460, admite a la temperatura de 40 °C, 133 A (tabla 2.10).

La sección de los conductores activos o de fase de la línea es de 50 mm². La sección del conductor neutro será como mínimo igual a la de las fases, si no se justifica por cálculo la ausencia de corrientes armónicas debidas a cargas no lineales o posibles desequilibrios (ITC-BT-19).

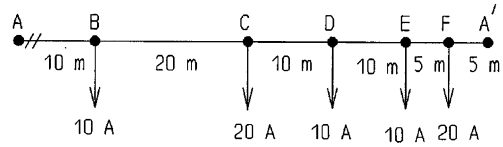


Fig. 2.19

2.7-2. Calcular la sección de la línea monofásica representada en la figura 2.19, con conductores de cobre unipolares HO7V-K, en instalación bajo tubo empotrado en obra. Tensión 230 V y caída de tensión máxima admisible 1,5%. Se considera un factor de potencia común para todas las cargas de 0,8 inductivo.

Solución: 10 mm²

2.7-3. Si la línea trifásica representada en la figura 2.20, es de aluminio, de sección 25 mm². Calcular la caída de tensión, sabiendo que la tensión de alimentación es de 400 V.

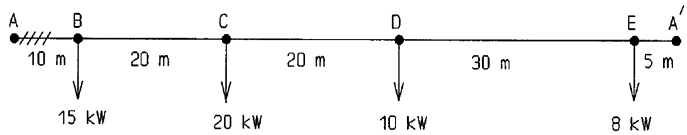


Fig. 2.20

Solución: 0,44%

2.8. CÁLCULO DE LÍNEAS CERRADAS EN ANILLO

Estas líneas cerradas pueden suponerse abiertas en el punto de alimentación. Así se pueden considerar como líneas abiertas alimentadas por los dos extremos a la misma tensión.

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

2.8-1. La línea trifásica cerrada representada en la figura 2.21, está formada por conductores de cobre, tiene de sección 35 mm². La tensión de la línea es de 400 V.

Calcular la caída de tensión.

© Ediciones Paraninfo

Se considera la línea abierta en el punto A.

Se calcula la carga que soporta cada extremo en función de la potencia que consumen los receptores. La carga en el sentido de A a D se denomina $P_{A'}$ y la carga en el sentido de A a B se denomina P_A:

$$P_{A'} = \frac{\Sigma (LP)}{L} = \frac{40 \cdot 15\,000 + 100 \cdot 16\,000 + 140 \cdot 10\,000}{200} = 18\,000 \text{ W} = 18 \text{ kW}$$

$$P_A = \Sigma P - P_{A'} = 41 - 18 = 23 \text{ kW}$$

El punto de mínima tensión es C, que recibirá en el sentido de A a D una potencia de 8 kW y en el sentido de A a B una potencia de 8 kW.

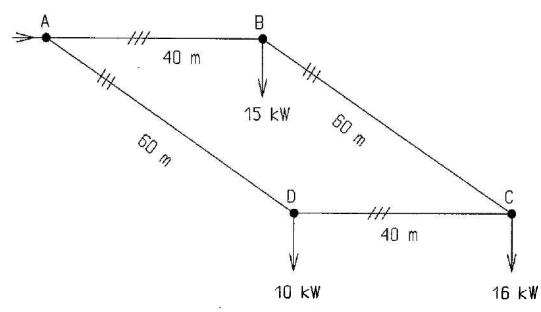


Fig. 2.21

Considerando uno de los tramos abiertos en que queda dividida la línea teniendo en cuenta en ella toda la caída de tensión. Si se escoge el tramo ABC.

La sección $s = \dfrac{\Sigma (LP)}{cuV_L}$

La caída de tensión $u = \dfrac{\Sigma (LP)}{csV_L} = \dfrac{40 \cdot 15\,000 + 100 \cdot 8\,000}{56 \cdot 35 \cdot 400} = 1{,}79 \text{ V}$

En tanto por cien $u = \dfrac{1{,}79 \cdot 100}{400} = 0{,}45\%$

2.8-2. Calcular la sección de la línea trifásica cerrada representada en la figura 2.22. Los conductores son de aluminio, cable RZ en instalación aérea tensada con neutro fiador. La tensión de línea es 400 V y la caída de tensión máxima 1,5%. Se considera la unidad como factor de potencia común para todas las cargas.

Solución: 25 mm²

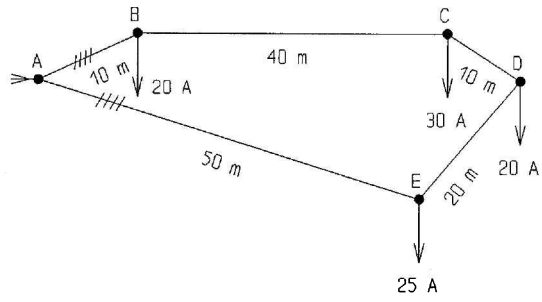


Fig. 2.22

2.9. CÁLCULO DE LÍNEAS DE B.T. POR MEDIO DE ÁBACOS

La sección de una línea monofásica con la caída de tensión en tanto por cien u% es:

$$s = \frac{2 \cdot 100 LP}{cV^2 u\%}$$

© Ediciones Paraninfo

DEMOSTRACIÓN

La caída de tensión $u = \frac{V \cdot u\%}{100}$

Sustituyendo en la fórmula de la sección $s = \frac{2LP}{cuV} = \frac{2 \cdot 100 LP}{cu\% V^2}$

La caída de tensión porcentual $u\% = \frac{200LP}{cV^2 s}$

Si la longitud se expresa en km y la potencia en kW $u\% = \frac{200 \cdot 10^6 LP}{cV^2 s}$

La expresión $k = \frac{2 \cdot 10^8}{cV^2}$ es constante para una tensión y un material conductor.

Al producto LP se le llama momento eléctrico.

La caída de tensión $u\% = \frac{2 \cdot 10^8}{cV^2} \cdot \frac{LP}{s} = k\frac{LP}{s}$

Para una determinada tensión, si en un eje de coordenadas marcamos los momentos y en el otro las caídas de tensión, se obtiene un gráfico o ábaco, con una recta para cada sección (fig. 2.23).

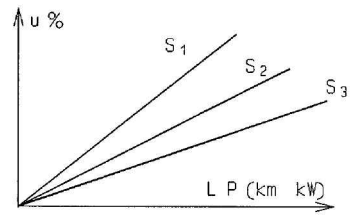


Fig. 2.23

Análogamente para una línea trifásica:

$$u\% = \frac{100 \cdot 10^6}{cV_L^2} \cdot \frac{LP}{s} = \frac{10^8}{cV_L^2} \cdot \frac{LP}{s}$$

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

2.9-1. Calcular por que punto del ábaco de momentos pasará la recta que representa el momento eléctrico en función de la caída de tensión para una línea trifásica de aluminio de sección 50 mm², 400 V, 50 Hz, considerando una caída de tensión del 3%. el ábaco tiene en el eje horizontal los momentos en km·kW y el eje vertical las caídas de tensión en tanto por cien.

La caída de tensión $u\% = \frac{10^8}{c \cdot V_L^2} \cdot \frac{LP}{s}$

El momento eléctrico $LP = u\% \cdot s \cdot \frac{c \cdot V_L^2}{10^8} = \frac{3 \cdot 50 \cdot 35 \cdot 400^2}{10^8} = 8{,}4$ km·kW

La línea pasará por el origen y por el punto: $LP = 8{,}4$ km·kW y $u = 3\%$.

2.9-2. Calcular para qué momento eléctrico una línea monofásica de cobre, de tensión 230 V y sección 16 mm² tiene una caída de tensión del 2%.

Solución: 0,47 km·kW

© Ediciones Paraninfo

2.10. CÁLCULO DE LÍNEAS DE CORRIENTE CONTINUA

El cálculo de la sección en las líneas bifilares (a dos hilos) de corriente continua puede realizarse con las mismas expresiones que para las líneas monofásicas de corriente alterna, teniendo en cuenta que las cargas serían sólo resistivas, por no existir en corriente continua reactancia.

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

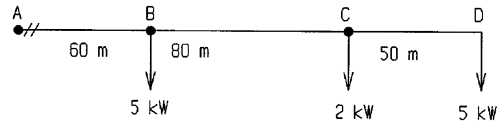


Fig. 2.24

2.10-1. Calcular la sección teórica de la línea bifilar de corriente continua de sección uniforme representada en la figura 2.24. El conductor es de cobre, la tensión es 220 V y la caída de tensión admisible el 2%.

La caída de tensión en la línea:

$$u = \frac{2 \cdot 220}{100} = 4{,}4 \text{ V}$$

La sección del conductor $s = \dfrac{2 \sum (LP)}{cuV}$

La suma de momentos $\sum LP$

$$\begin{array}{r} 5\,000 \cdot 60 = 300\,000 \\ 2\,000 \cdot 140 = 280\,000 \\ 190 \cdot 5\,000 = 950\,000 \\ \hline 1\,530\,000 \end{array} \text{ m·W}$$

La sección $s = \dfrac{2 \sum (LP)}{cuV} = \dfrac{2 \cdot 1\,530\,000}{56 \cdot 4{,}4 \cdot 220} = 56{,}45 \text{ mm}^2$

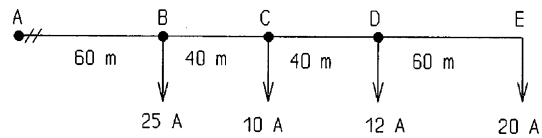


Fig. 2.25

2.10-2. Calcular la sección de los conductores de una línea bifilar de corriente continua de 220 V y longitud 40 m, con una caída de tensión del 1% y que alimenta un receptor que consume 40 A. Los conductores son de cobre.

Solución: 25,97 mm²

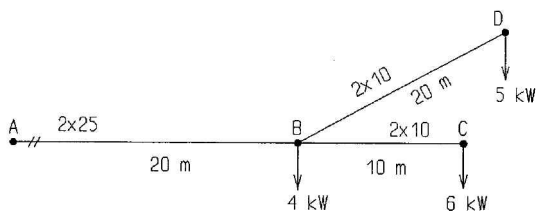


Fig. 2.26

2.10-3. Calcular la caída de tensión en la línea bifilar de corriente continua de la figura 2.25. La tensión nominal es 220 V y el conductor es de cobre con sección 35 mm².

Solución: 3,8%

2.10-4. Calcular la caída de tensión en los tramos AB, BC y BD de la línea de corriente continua indicada en la figura 2.26, con las secciones indicadas. El conductor es de cobre y la tensión 220 V.

Solución: a) u_{AB}=0,89; u_{BC}=0,44%; u_{BD}=0,74%

© Ediciones Paraninfo

2.10-5. Calcular la caída de tensión en los tramos AB, BC y BD de la línea de distribución bifilar de corriente continua con las cargas, longitudes y secciones que indica la figura 2.27. Los conductores son de cobre y la tensión de alimentación 220 V.

Solución: a) $u_{AB}=2,35\%$; $u_{BC}=3,04\%$ $u_{BD}=3,57\%$

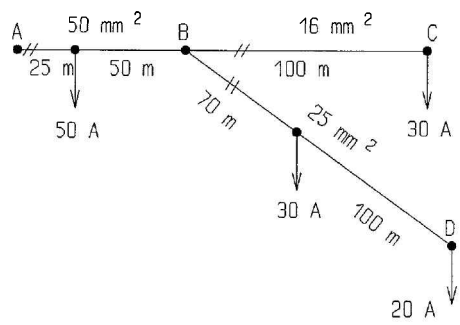


Fig. 2.27

2.10-6. Calcular la caída de tensión en la línea bifilar de corriente continua representada en la figura 2.28, con conductores de cobre de sección 25 mm^2. Tensión 220 V.

Solución: 2,36%

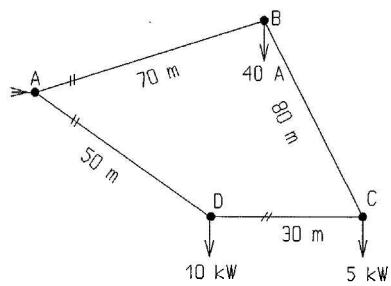


Fig. 2.28

2.11. CÁLCULO ELÉCTRICO DE LÍNEAS DE MEDIA TENSIÓN

En el cálculo de la sección de los conductores se consideran tres criterios:

1) *Calentamiento del conductor*. El cálculo de la sección por este criterio se basa en las tablas facilitadas por el fabricante de conductor que indica la intensidad admisible en régimen permanente según determinadas condiciones y factores de corrección para condiciones distintas.
2) *Caída de tensión en el conductor*. En el cálculo de la caída de tensión en las líneas de M.T. se tienen en cuenta:
   - *Resistencia eléctrica de los conductores*. Generalmente se considera como resistencia longitudinal (Ω/km).
   - *Reactancia inductiva de los conductores*. La intensidad de corriente alterna que recorre los conductores, produce un flujo magnético alterno, que origina en ellos fuerzas electromotrices de autoinducción. Se suelen considerar valores longitudinales de autoinducción (H/km) o reactancia (Ω/km).

   Entre los conductores de la línea o entre un conductor y su pantalla (cables unipolares con pantalla) se produce el efecto de capacidad, que en las líneas de B.T. y en las de M.T. suele despreciarse para el cálculo de la caída de tensión.
3) *Capacidad del conductor para soportar la corriente de cortocircuito*. La intensidad de cortocircuito es varias veces superior a la intensidad de corriente en funcionamiento normal y aunque el tiempo de actuación de las protecciones es pequeño, el calentamiento puede ser excesivo para el conductor. El fabricante suministra tablas o gráficos de intensidad de cortocircuito admisible en los conductores en función de su sección, del aislamiento, incremento de la temperatura admisible y tiempo de duración del cortocircuito.

© Ediciones Paraninfo

El cálculo eléctrico puede realizarse de dos formas:

- *Cálculo preliminar*: Como sección del conductor se escoge la normalizada por exceso correspondiente a la mayor de las calculadas por los tres criterios: máxima intensidad admisible, máxima caída de tensión y máxima intensidad de cortocircuito.
- *Cálculo de comprobación*: Escogida una sección se comprueba que la intensidad en régimen permanente, la caída de tensión y la intensidad de cortocircuito están dentro de los valores admisibles. Es el cálculo más utilizado en instalaciones de M.T.

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

2.11-1. Para la alimentación a 6 kV, 50 Hz, de una instalación trifásica que consume 1 500 kW con factor de potencia 0,8 inductivo, se utilizan cables unipolares de cobre, aislado con etileno propileno (EPR), de tensión 6/10 kV y sección 70 mm^2. Los conductores van colocados horizontalmente sobre bandeja continua, con otra terna de cables unipolares, a una temperatura ambiente de 35°C. Calcular:

a) Intensidad que circula por el cable.

b) Intensidad admisible en el cable si según Reglamento de líneas eléctricas de alta tensión (RLAT), ITC-LAT-06, admite instalado al aire a 40 °C la intensidad de 255 A. El factor de corrección por temperatura es 1,05 y por instalación sobre bandeja 0,90.

a) La intensidad de línea $I_L = \dfrac{P}{\sqrt{3}\, V_L \cos\varphi} = \dfrac{1\,500\,000}{\sqrt{3}\cdot 6\,000\cdot 0{,}8} = 180{,}4$ A

b) La máxima intensidad admisible es $I_{ad} = 255\cdot 1{,}05\cdot 0{,}90 = 240{,}98$ A mayor que la intensidad de consumo de la instalación.

2.11-2. Hallar si una terna de cables unipolares de cobre, de sección 50 mm^2, aislado con polietileno reticulado, 12/20 kV, instalado al aire en bandeja perforada, separado de otra terna de cables, a la temperatura ambiente de 45 °C, puede alimentar por criterio térmico una instalación trifásica que consume 3 MVA a 20 kV.

Según el RLAT, instrucción ITC-LAT-06 la intensidad admisible para este cable, instalado al aire a 40°C es 220 A. El factor de corrección por temperatura es 0,95 y por instalación en bandeja 0,98.

Solución: La intensidad admisible en el cable es 204,82 A, mayor que el consumo de la instalación, que es de 86,6 A, por lo que es válido el conductor.

2.12. CAÍDA DE TENSIÓN EN LAS LÍNEAS DE MEDIA TENSIÓN

■ Impedancia de la línea

Escogido un conductor de determinada sección, se calcula la impedancia Z de la línea en Ω/km

R: Resistencia del conductor a la temperatura de trabajo, en Ω/km (dato del conductor)

X: Reactancia del conductor en Ω/km (dato del cable conductor).

© Ediciones Paraninfo

En las líneas aéreas con conductores unipolares se halla la reactancia calculando el coeficiente de autoinducción.

$$L_k=(k+4{,}6\log\frac{D}{r})\cdot 10^{-4}$$

L_k: Coeficiente de autoinducción de la línea, en H/km.
D: Separación entre conductores (cm).
r: Radio del conductor (cm).
k: Término de valor 0,5 para conductores macizos y variable para conductores cableados en cuerda. Para los cables de aluminio acero utilizados en M.T., vale 0,53 para 6 conductores de aluminio cableados sobre uno de acero, y 0,64 para 30 conductores de aluminio cableados sobre 7 de acero.

Si las separaciones no son iguales se halla la media geométrica:

$$D=\sqrt[3]{D_{12}\cdot D_{23}\cdot D_{31}}$$

La reactancia de la línea por conductor en Ω/km $X=2\pi f L_k$

La impedancia de la línea por conductor en Ω/km $Z=\sqrt{R^2+X^2}$

La impedancia total en Ω, se calcula de la forma $Z_L=Z\cdot L$.

L: Longitud total de la línea en km.

La resistencia total en Ω, $R_L=R\cdot L$

La reactancia total en Ω, $X_L=X\cdot L$

El circuito equivalente de una línea monofásica o de una fase de una línea trifásica con carga equilibrada se representa en la figura 2.29.

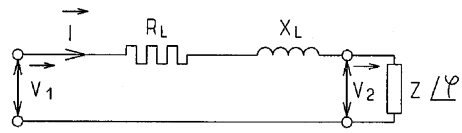


Fig. 2.29

■ Caída de tensión en la línea

La intensidad de la línea I_L (A) según la potencia a transportar:

$$I_L=\frac{S}{\sqrt{3}\cdot V_L}=\frac{P}{\sqrt{3}\,V_L\cos\varphi}$$

S: Potencia aparente a transportar (kVA).
P: Potencia activa a transportar (kW).
V_L: Tensión de línea (kV).
cos φ: Factor de potencia de la línea.

La diferencia de las tensiones de línea entre los dos extremos de la misma se llama caída de tensión, y es consecuencia de la resistencia y reactancia de los conductores.

La caída de tensión de línea en voltios:

$$u=\sqrt{3}\,I_L\,L\,(\mathrm{R}\cos\varphi+\mathrm{X}\,\mathrm{sen}\,\varphi)$$

© Ediciones Paraninfo

DEMOSTRACIÓN

En el diagrama vectorial del circuito equivalente (fig. 2.30) se representa la ecuación vectorial del circuito.

$$\boldsymbol{V}_1 = \boldsymbol{V}_2 + \boldsymbol{R}_L\boldsymbol{I} + \boldsymbol{X}_L\boldsymbol{I}$$

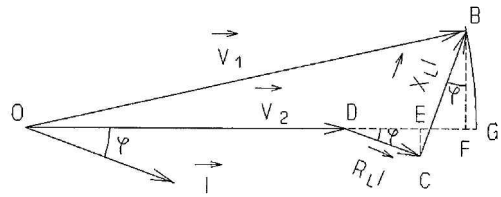


Fig. 2.30

La caída de tensión

$$u = V_1 - V_2 \simeq \overline{DF} = \overline{DE} + \overline{EF} = R_L I\cos\varphi + X_L I sen\,\varphi$$

Utilizando los valores R y X de resistencia y reactancia longitudinales

$$u = RLI\cos\varphi + XLI sen\,\varphi = IL(R\cos\varphi + X sen\,\varphi)$$

En la línea trifásica equilibrada, con valores de línea $u=\sqrt{3}\,I_L L(\mathrm{R}\cos\varphi + \mathrm{X}\,\mathrm{sen}\,\varphi)$

Sustituyendo el valor de la intensidad de línea en función de la potencia:

$$u = \frac{PL}{V_L\cos\varphi}(R\cos\varphi + X\,\mathrm{sen}\varphi) = \frac{PL}{V_L}(R + X\,\mathrm{tg}\varphi)$$

u: Caída de tensión compuesta o de línea (V).

La caída de tensión en tanto por ciento de la tensión de línea:

$$u\% = \frac{PL}{10V_L^2}(R + X\,\mathrm{tg}\varphi)$$

$u\%$: Caída de tensión en tanto por ciento de la tensión de línea (V).

P: Potencia activa a transportar (kW).

V_L: Tensión de línea (kV).

L: Longitud de la línea (km).

R: Resistencia del conductor (Ω/km).

X: Reactancia del conductor (Ω/km),

$\cos\varphi$: Factor de potencia de la línea.

DEMOSTRACIÓN

La caída de tensión porcentual de la tensión de línea:

$$u\% = \frac{100\cdot u}{V_L} = \frac{100\cdot LP}{V_L^2}(R + X\,\mathrm{tg}\varphi)$$

Si la potencia se expresa en kW y la tensión en kV:

$$u\% = \frac{100\cdot L\cdot 1\,000\cdot P}{(1\,000\cdot V_L)^2}(R + X\,\mathrm{tg}\varphi) = \frac{LP}{10V_L^2}(R + X\,\mathrm{tg}\varphi)$$

Mediante esta ecuación se obtienen gráficos o ábacos para calcular la caída de tensión en función del momento eléctrico LP, para diferentes valores de tensión, conductor y factor de potencia.

La caída de tensión, según el Real Decreto 1955/2000, sobre actividades de transporte, distribución, comercialización y autorización de instalaciones eléctricas, en la líneas de suministro de energía no debe sobrepasar el 7 % de la tensión nominal.

© Ediciones Paraninfo

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

2.12-1. Una instalación que consume 1 MW, con un factor de potencia 0,86 se alimenta mediante una línea trifásica de 6 kV, 50 Hz, con un cables unipolares de cobre, sección 70 mm², aislados con XLPE, de longitud 400 m. Calcular la caída de tensión en el conductor, sabiendo que la resistencia longitudinal es de 0,4 Ω/km a la temperatura de trabajo de 90 °C y la reactancia longitudinal 0,1 Ω/km. Dibujar el ábaco de momentos para este conductor.

La tangente del ángulo de desfase entre tensión e intensidad de fase

$$\cos\varphi = 0{,}86; \quad \varphi = 30{,}68°; \quad tg\varphi = 0{,}593$$

La caída de tensión:

$$u\% = \frac{LP}{10V_L^2}(R + X\,\mathrm{tg}\varphi)$$

$$u = \frac{1\,000 \cdot 0{,}4}{10 \cdot 6^2}(0{,}4 + 0{,}1 \cdot 0{,}593) = 0{,}51\,\%$$

La recta que representa a este conductor en el ábaco de momentos se indica en la figura 2.31.

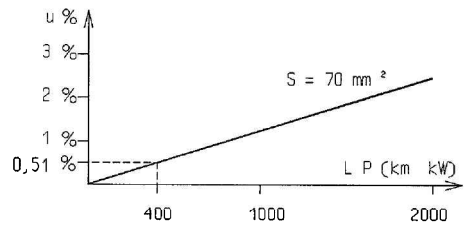


Fig. 2.31

2.12-2. Calcular la longitud máxima de una línea, con cables unipolares de aluminio, de sección 70 mm², aislado con XLPE, 12/20 kV, que alimenta una instalación trifásica a 20 kV, 50 Hz, de consumo 4 MW, con factor de potencia 0,8 inductivo; para que la caída de tensión no sobrepase el 1 %. La resistencia longitudinal de cable a la máxima temperatura de trabajo de 90 °C es de 0,57 Ω/km y la reactancia 0,13 Ω/km.

Solución: 1,5 km

2.12-3. Una línea trifásica de 20 kV, 50 Hz, alimenta con sección uniforme las cargas de la figura 2.32, equilibradas y con factor de potencia 0,8 inductivo. Los conductores son cables unipolares de cobre de resistencia longitudinal 0,47 Ω/km y reactancia 0,15 Ω/km. Calcular la caída de tensión total.

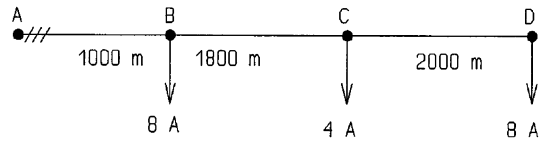


Fig. 2.32

La caída de tensión en una línea de una sola carga:

$$u = \sqrt{3}\, I_L L\,(\mathrm{R}\cos\varphi + \mathrm{X}\,\mathrm{sen}\varphi) = \sqrt{3}\,(RLI_L\cos\varphi) + \sqrt{3}\,(XLI_L\,\mathrm{sen}\varphi)$$

Para líneas de sección uniforme y varias cargas la caída de tensión se halla igual que para líneas de B.T. tomando momentos respecto al origen.

$$u = \sqrt{3}\,\Sigma\,(RLI_L\cos\varphi) + \sqrt{3}\,\Sigma\,(XLI_L\,\mathrm{sen}\varphi)$$

Considerando constantes R, X y φ:

$$u = \sqrt{3}\,R\cos\varphi\,\Sigma\,(LI_L) + \sqrt{3}\,X\,\mathrm{sen}\varphi\,\Sigma\,(LI_L)$$

$$u = \sqrt{3}\cdot 0{,}47\cdot 0{,}8(1\cdot 8 + 2{,}8\cdot 4 + 4{,}8\cdot 8) + \sqrt{3}\cdot 0{,}15\cdot 0{,}6(1\cdot 8 + 2{,}8\cdot 4 + 4{,}8\cdot 8) = 46{,}5\ \mathrm{V}$$

La caída de tensión porcentual $u\% = \dfrac{u\cdot 100}{V_L} = \dfrac{46{,}5\cdot 100}{20\,000} = 0{,}23\,\%$

© Ediciones Paraninfo

2.13. POTENCIA MÁXIMA DE TRANSPORTE

La máxima intensidad de línea $I_{Lmáx}$, se halla según la densidad de corriente o la intensidad de corriente permitida.

La potencia aparente máxima de transporte $S_{máx} = \sqrt{3}\, V_L I_{Lmáx}$

La potencia que puede transportar la línea, dependiendo de su longitud y caída de tensión, se obtiene de la expresión de la caída de tensión.

$$P = \frac{10 V_L^2}{(R + X\text{tg}\varphi)L} u\%$$

Mediante esta ecuación se pueden construir gráficos para hallar la potencia de transporte en función de la longitud de la línea, para distintos conductores, tensión, factor de potencia y caída de tensión.

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

2.13-1. Calcular la potencia máxima, con factor de potencia 0,8 inductivo, que puede transportar una línea trifásica de 6 kV, 50 Hz y longitud 500 m, para que la caída de tensión no exceda del 2%. El conductor es cable tripolar de aluminio, de resistencia longitudinal a la temperatura de trabajo (90 °C) 0,8 Ω/km y reactancia 0,12 Ω/km.

La tangente del ángulo de desfase entre la tensión e intensidad de :

$$\cos\varphi = 0{,}8; \quad \varphi = 36{,}87°; \quad \text{tg}\varphi = 0{,}75$$

La potencia máxima de transporte:

$$P = \frac{10 V_L^2}{(R + X\text{tg}\varphi)L} u\% = \frac{10 \cdot 6^2 \cdot 2}{(0{,}8 + 0{,}12 \cdot 0{,}75)0{,}5} = 1\,618 \text{ kW}$$

2.13-2. Una línea trifásica de 20 kV, 50 Hz, longitud 2 km, alimenta una instalación mediante cables unipolares de cobre de resistencia longitudinal a la temperatura de trabajo de 0,4 Ω/km y reactancia 0,1 Ω/km. Calcular la máxima potencia e intensidad, con factor de potencia 0,9 inductivo, que puede transportar para que la caída de tensión no exceda del 1%.

Solución: 4 460 kW; 143 A.

2.14. PÉRDIDAS DE POTENCIA

La pérdida de potencia en la línea trifásica, por efecto Joule: $P_p = 3 R L I_L^2$

P_p: Pérdida de potencia (W).

R: Resistencia del conductor (Ω/km).

L: Longitud de la línea (km).

I_L: Intensidad de línea (A).

Sustituyendo el valor de la intensidad de línea en función de la potencia de transporte:

$$P_p = \frac{R L P^2}{V_L^2 \cos^2\varphi}$$

© Ediciones Paraninfo

La pérdida en tanto por ciento de la potencia de transporte:

$$P_p\% = \frac{R}{10V_L^2\cos^2\varphi} LP$$

P: Potencia de transporte (kW).

V_L: Tensión de línea (kV).

Mediante esta ecuación se pueden construir gráficas o ábacos para hallar la potencia perdida en función del momento eléctrico LP, para distintos conductores, tensión y factor de potencia de la instalación.

DEMOSTRACIÓN

La intensidad de línea $I_L = \dfrac{P}{\sqrt{3}\,V_L\cos\varphi}$

Sustituyendo en la expresión de la potencia perdida $P_p = \dfrac{3RLP^2}{(\sqrt{3})^2 V_L^2\cos^2\varphi} = \dfrac{RLP^2}{V_L^2\cos^2\varphi}$

La pérdida de potencia porcentual $P_p\% = \dfrac{100\cdot P_p}{P} = \dfrac{100\cdot RLP^2}{PV_L^2\cos^2\varphi} = \dfrac{100RLP}{V_L^2\cos^2\varphi}$

Si la potencia se expresa en kW y la tensión en kV:

$$P_p\% = \frac{100\cdot R\cdot L\cdot 1\,000\cdot P}{(1\,000\cdot V_L)^2\cos^2\varphi} = \frac{RLP}{10V_L^2\cos^2\varphi}$$

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

2.14-1. Calcular la pérdida porcentual de potencia en una línea trifásica a 10 kV, 50 Hz, longitud 2 800 m, que alimenta una potencia de 2 000 kW con factor de potencia 0,85 inductivo. Los conductores son unipolares de aluminio, con resistencia longitudinal a la temperatura de trabajo de 0,4 Ω/km.

La potencia perdida $P_p\% = \dfrac{R}{10V_L^2\cos^2\varphi} LP = \dfrac{0{,}4}{10\cdot 10^2\cdot 0{,}85^2} 2{,}8\cdot 2\,000 = 3{,}1\%$

2.14-2. Calcular la longitud máxima que puede tener una línea trifásica a 6 kV, 50 Hz, para alimentar una potencia de 3 000 kW con factor de potencia 0,8 inductivo, con pérdida máxima de potencia del 2%. El conductor de la línea es un cable tripolar de cobre con resistencia longitudinal 0,34 Ω/km.

Solución: 452 m

2.14-3. Calcular la máxima potencia que puede transportar una línea trifásica a 20 kV, 50 Hz, longitud 5 km, para alimentar una instalación con factor de potencia 0,89 inductivo, con pérdida máxima de potencia del 1%. Los conductores son cables unipolares de aluminio con resistencia longitudinal 0,32 Ω/km.

Solución: 1 980 kW

© Ediciones Paraninfo

2.15. SECCIÓN MÍNIMA DE LOS CONDUCTORES PARA SOPORTAR UN CORTOCIRCUITO

■ Cortocircuito tripolar

Las líneas eléctricas deben poder soportar las corrientes de cortocircuito, de corta duración, porque actuarán los elementos de protección al cabo de pocos segundos. El valor elevado de la intensidad tiene dos efectos:

- Aumentar el calor producido en el cable por unidad de tiempo (proporcional al cuadrado de la intensidad de corriente).
- Aumentar las fuerzas entre conductores, por efecto de aumento del campo magnético que rodea el conductor. En los cables de varios conductores, este esfuerzo lo soporta el propio cableado.

El caso de cortocircuito que se considera en el diseño de las protecciones de la instalación es el cortocircuito trifásico tripolar.

■ Corriente de cortocircuito

Para un tiempo de cortocircuito del orden de 1,5 s se considera la intensidad de línea en régimen permanente para cortocircuito tripolar. Su valor eficaz:

$$I_{cc} = \frac{S_{cc}}{\sqrt{3}\ V_L}$$

I_{cc}: Intensidad eficaz de corriente de fase en el cortocircuito (A).
S_{cc}: Potencia aparente de cortocircuito (VA).
V_L: Tensión de línea (V).

La sección del conductor en función de la intensidad permanente de cortocircuito se calcula teniendo en cuenta:

- El cortocircuito es de muy corta duración.
- La temperatura es la máxima admisible por el aislamiento.
- El calor producido se utiliza en incrementar la temperatura del conductor, no transmitiendo calor alguno al exterior (proceso adiabático).

Según estas condiciones, la sección necesaria para soportar el cortocircuito:

$$s = \frac{I_{cc}\sqrt{t}}{K}$$

s: Sección del conductor (mm^2)
t: Tiempo de duración del cortocircuito (s).
K: Constante que depende del conductor y de las temperaturas al inicio y al final del cortocircuito.

Para instalaciones interiores la intensidad máxima admisible en los conductores (ITC-BT-19) se considera a una temperatura máxima de trabajo según la norma UNE 20460-5-523 de 70°C para cables aislados con termoplásticos (PVC o similares) y de 90°C para aislamiento con termoestables (XLPE, EPR o similares). Considerando como temperaturas finales, 160°C para aislamiento de PVC, y 250°C

© Ediciones Paraninfo

para aislamiento de XLPE o EPR. Admitiendo una duración de cortocircuito no superior a 5 segundos, los valores de K utilizados se indican en la tabla 2.13, para cables de B.T.

Tabla 2.13

CONDUCTOR	AISLAMIENTO	K
Cobre.	PVC	115
	XLPE - EPR	143
Aluminio.	PVC	76
	XLPE - EPR	94

Las compañías suministradoras facilitarán los valores máximos previsibles de la potencias o intensidades de cortocircuito de sus redes de distribución, (artículo 14 del REBT).

Las intensidades máximas de cortocircuito para redes aéreas de B.T. se obtienen según la instrucción ITC-BT-06, y según la ITC-LAT-8 para líneas aéreas de A.T. con cables aislados. Las densidades máximas de corrientes de cortocircuito admisibles en líneas subterráneas de B.T. se obtienen según la instrucción ITC - BT-07, y según la instrucción ITC-LAT-06 para líneas subterráneas de A.T.

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

2.15-1. Una línea trifásica, de tensión 20 kV, 50 Hz, alimenta una instalación utilizando cables unipolares de aluminio aislados con EPR, 12/20 kV. Calcular:

a) Intensidad de cortocircuito si la potencia de cortocircuito en el punto de entronque con la línea de distribución, según la empresa suministradora es de 500 MVA.

c) Sección necesaria para soportar el cortocircuito si su duración (según la empresa suministradora) es de 0,2 s y según la norma UNE 21123 las temperaturas inicial y final de cortocircuito son de 90 °c y 250 °C, con lo que la constante K=94.

La intensidad de cortocircuito $I_{cc}=\dfrac{S_{cc}}{\sqrt{3}\ V_L}=\dfrac{500\,000\,000}{\sqrt{3}\cdot 20\,000}=14\,434$ A

La sección del conductor $s=\dfrac{I_{cc}\sqrt{t}}{K}=\dfrac{14\,434\cdot\sqrt{0,2}}{94}=68,67\ \text{mm}^2$

2.15-2. La intensidad de cortocircuito en un punto de la instalación trifásica de M.T. a 20 kV es 11,547 kA. Calcular:

a) Potencia aparente de cortocircuito.

b) Sección necesaria para soportar el cortocircuito si el tiempo de duración del mismo es 0,2 s, el conductor es cable tripolar de cobre aislado con PVC, de constante K=115.

Solución: a) 400 MVA; b) 45 mm²

2.15-3. Calcular la intensidad de cortocircuito tripolar que puede soportar un cable tripolar de cobre 0,6/1 kV, aislado con XLPE, sección 95 mm², si el tiempo de duración del cortocircuito es de 0,4 segundos.

Solución: 21,48 kA

© Ediciones Paraninfo

PROBLEMAS DE RECAPITULACIÓN

P.2-1. Un cable tetrapolar de cobre con aislamiento de EPR, tensión nominal 1 kV, alimenta a 400 /230V, 50 Hz una instalación que consume 34 kW con un factor de potencia 0,8 inductivo. Calcular:

a) Intensidad que consume la instalación, considerando el consumo equilibrado.

b) Sección necesaria del conductor si el cable está con una parte empotrada bajo tubo en pared aislante térmica y otra parte colocada directamente sobre la pared.

Solución: a) 61,34 A; b) 25 mm^2.

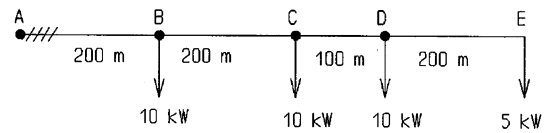


Fig. 2.33

P.2-2. Calcular la sección de los conductores de alimentación de un receptor trifásico equilibrado que consume una intensidad de 45 A con factor de potencia 0,86 inductivo.La línea está formada por tres cables unipolares con conductores de cobre, aislados con PVC para 750 V, en instalación interior bajo tubo empotrado en obra, de longitud 60 m. La tensión de línea es 400 V y la caída de tensión permitida del 1%.

Solución: 25 mm^2

P.2-3. En la línea de distribución trifásica de la figura 2.33, tensión de línea 400 V, 50 Hz, con conductores de aluminio trenzados en haz, expuestos al sol, aislados con XLPE, y neutro fiador. Calcular la sección de los conductores de fase, admitiendo una caída de tensión del 4% y considerando un factor de potencia común para todas las cargas de 0,9 inductivo.

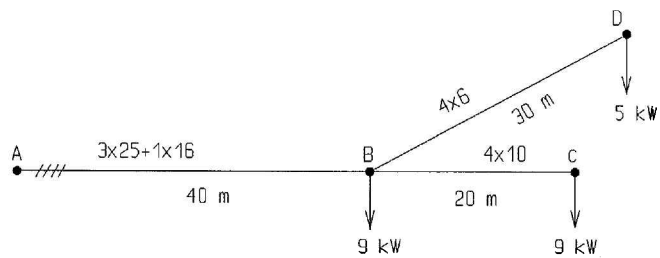


Fig. 2.34

Solución: 95 mm^2

P.2-4. La línea trifásica representada en la figura 2.34, está formada por un cable tetrapolar, con conductores de cobre, aislados con polietileno reticulado para 1 kV, en instalación bajo tubo empotrado en obra. La tensión de alimentación es 400/230 V, 50 Hz y las secciones están indicadas. Calcular la caída de tensión en los distintos tramos.

Solución: u_{AB}=0,41%, u_{BC}=0,2%, u_{BD}=0,28%

P.2-5. Calcular la caída de tensión en la línea trifásica representada en la figura 2.35. El conductor es de cobre, de sección 25 mm^2 y la tensión de alimentación es de 400 V.

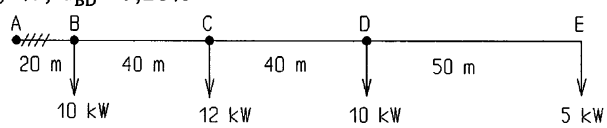


Fig. 2.35

Solución: 1,19%

© Ediciones Paraninfo

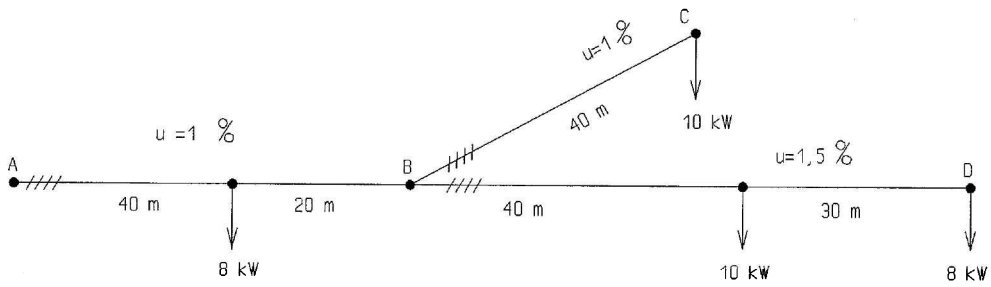


Fig. 2.36

P.2-6. Calcular la sección de los tramos AB, BC y BD de la línea de la figura 2.36, con los valores máximos de caídas de tensión indicados. Los conductores son de cobre en cable tetrapolar, aislado con XLPE, 0,6/1 kV y la instalación es bajo tubo en montaje superficial. La tensión de línea es trifásica de 400/230 V, y se considera un factor de potencia común para todas las cargas de 0,9 inductivo.

Solución: $s_{AB}=25\ mm^2$, $s_{BC}=6\ mm^2$, $s_{BD}=10\ mm^2$

P.2-7. Calcular la sección de la línea trifásica en anillo representada en la figura 2.37. Los conductores son de aluminio, cable tetrapolar, aislado con EPR, 1 kV, en instalación enterrada bajo tubo. La tensión de línea es 400 V y la caída de tensión máxima 1%. Se considera 0,8 como factor de potencia común para todas las cargas.

Solución: 25 mm^2.

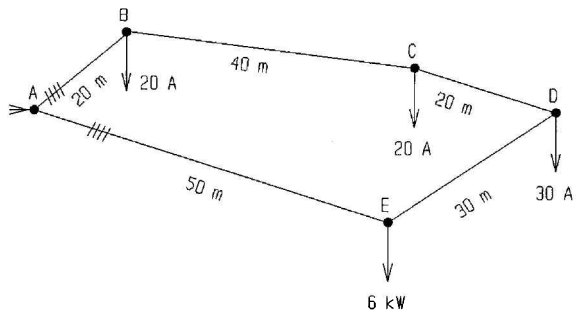


Fig. 2.37

P.2-8. La línea de distribución de corriente continua indicada en la figura 2.38, está formada por conductores de cobre de sección 16 mm^2. La tensión es de 220 V. Calcular la caída de tensión total.

Solución: 2,1%

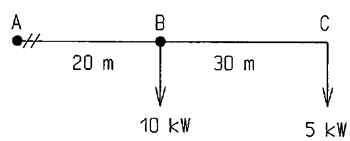


Fig. 2.38

P.2-9. La línea trifásica de 10 kV, 50 Hz, indicada en la figura 2.39, es de sección uniforme. Las cargas son equilibradas y con factor de potencia 0,86 inductivo. El conductor es un cable tripolar de cobre de resistencia longitudinal de 0,4 Ω/km y reactancia 0,1 Ω/km. Calcular la caída de tensión total.

Solución: 0,25%

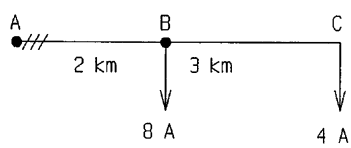


Fig. 2.39

© Ediciones Paraninfo

P.2-10. Calcular la potencia máxima, con factor de potencia 0,9 inductivo, que puede transportar a 600 m una línea trifásica de 20 kV, 50 Hz, para que la caída de tensión no exceda del 1%. Los conductores son cables unipolares de cobre, de máxima resistencia longitudinal a la temperatura de trabajo 0,5 Ω/km y reactancia 0,12 Ω/km.

Solución: 11 945 kW.

P.2-11. Calcular la longitud máxima que puede tener una línea trifásica para alimentar una instalación que consume 4 000 kW con factor de potencia 0,8 inductivo, con pérdida máxima de potencia del 1% a 20 kV, 50 Hz. La línea está formada por cables unipolares de cobre con resistencia longitudinal 0,4 Ω/km.

Solución: 1,6 km.

P.2-12. Una línea trifásica de 20 kV, 50 Hz, alimenta una instalación utilizando cables tripolares de cobre aislados con XLPE, 15/25 kV. Calcular la sección necesaria para soportar el cortocircuito si su duración es de 0,2 s, la constante K del cable es 143 y la potencia de cortocircuito en el punto de entronque con la línea de distribución es de 450 MVA.

Solución: 40,6 mm^2.

© Ediciones Paraninfo

3

LÍNEAS AÉREAS

3.1. LÍNEA ELÉCTRICA AÉREA

Es el conjunto de conductores sujetos en el aire a aisladores y montados sobre soportes a cierta distancia del suelo, que logran el aislamiento necesario entre los conductores y tierra.

3.2. CABLES DE ALUMINIO ACERO UTILIZADOS EN LAS LÍNEAS AÉREAS DE DISTRIBUCIÓN EN MEDIA TENSIÓN.

Los cables más utilizados en las líneas de distribución de tensión nominal 20 kV son los cables de aluminio-acero (fig. 3.1), porque al tener menos peso que el de cobre y más resistencia mecánica debido al alma de acero, puede tenderse con vanos mayores y menos apoyos. Se utilizan también cables aislados (ITC-LAT-08)



Fig. 3.1

a) *Designación*. Se designan por las letras LA (alambres de aluminio y acero galvanizado), seguidas por la sección aparente del cable en mm^2.

b) *Características*. Los más utilizados son los cables LA-30, LA-56, LA-78 y LA-110, deben cumplir la norma UNE 21018, que utiliza una nueva designación. Las características más utilizadas se indican en la tabla siguiente:

Tabla 3.1

CARACTERÍSTICAS	DESIGNACIÓN			
	27-AL1/4-ST1A (LA-30)	47-AL1/8-ST1A (LA-56)	67-AL1/11-ST1A (LA-78)	94-AL1/22-ST1A (LA-110)
Sección aluminio, mm^2.	26,7	46,8	67,4	94,2
Sección acero, mm^2.	4,45	7,79	11,2	22,0
Sección total, mm^2.	31,1	54,6	78,6	116,2
Resistencia eléctrica a 20 °C, Ω/Km.	1,0736	0,6129	0,4256	0,3067
Composición alambres aluminio+acero	6+1	6+1	6+1	30+7
Diámetro aparente del cable mm.	7,14	9,45	11,34	14
Carga mínima de rotura daN.	990	1 640	2 310	4 310
Módulo de elasticidad daN/mm^2.	7 900	7 900	7 900	8 000
Coeficiente de dilatación $°C^{-1}$.	$19,1 \cdot 10^{-6}$	$19,1 \cdot 10^{-6}$	$19,1 \cdot 10^{-6}$	$17,8 \cdot 10^{-6}$
Peso daN/km.	105,9	185,5	266,8	424,8

© Ediciones Paraninfo

3.3. CÁLCULO ELÉCTRICO DE LOS CONDUCTORES EN LAS LÍNEAS AÉREAS DE M.T. CON CABLES DE ALUMINIO ACERO

■ Proceso de cálculo

Se elige el conductor de la línea y después se justifica esta elección con el cálculo de :

- Impedancia de la línea.
- Caída de tensión.
- Potencia de transporte que permite la línea.
- Pérdida de potencia en la línea.

■ Elección de los conductores

Las líneas de M.T. suelen ser de tensión nominal 20 kV y los conductores a emplear de aluminio acero.

La elección del conductor puede realizarse según el ábaco de momentos como el indicado en la figura 3.2.

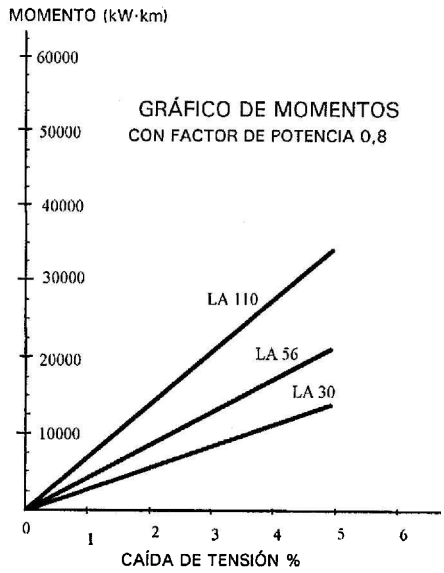


Fig. 3.2

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

3.3-1. Una línea aérea de 20 kV, 50 Hz, con una longitud de 2,5 km está formada por tres conductores LA 110 sujetos a apoyos de forma que la distancia entre ellos es de $D_{12}=1,8$ m, $D_{23}=1,8$ m y $D_{31}=3,6$ m. Calcular:

a) Coeficiente de autoinducción de la línea, si el diámetro del conductor es 14 mm,

b) Reactancia por kilómetro de la línea.

c) Impedancia total, sabiendo que la resistencia del conductor es 0,307 Ω/km.

a) Como se indica en el epígrafe 2.12, la separación media entre los conductores:

$$D=\sqrt[3]{D_{12}\cdot D_{23}\cdot D_{31}}=\sqrt[3]{1,8\cdot 1,8\cdot 3,6}=2,27\ \text{m}$$

El coeficiente de autoinducción:

$$L_k=(0,53+4,6\log\frac{D}{r})\cdot 10^{-4}=(0,53+4,6\log\frac{2,27}{0,007})\cdot 10^{-4}=0,0012\ \text{H/km}$$

b) La reactancia de la línea por conductor en Ω/km:

$$X=2\pi f L_k=2\cdot 3,14\cdot 50\cdot 0.0012=0,377\ \Omega/\text{km}$$

c) La impedancia de la línea por conductor en Ω/km:

$$Z=\sqrt{R^2+X^2}=\sqrt{0,307^2+0,377^2}=0,486\ \Omega/\text{km}$$

La impedancia total: $Z_T=Z\cdot L=0,486\cdot 2,5=1,215\ \Omega$

3.3-2. Una derivación de una línea de 20 kV, 50 Hz, tiene una longitud de 800 m y se realiza con conductor LA 30. Si tiene un coeficiente de autoinducción de 0,0013 H/km y una resistencia media a 20°C de 1,075 Ω/km, calcular la impedancia total de la línea.

Solución: 0,92 Ω

© Ediciones Paraninfo

3.3-3. Calcular la máxima potencia aparente que puede transportar una línea aérea de 20 kV, 50 Hz, con conductores LA 56, de sección 54,6 mm², sabiendo que están formados por 6 hilos de aluminio arrollados sobre uno de acero.

La máxima intensidad de línea $I_{Lmáx}$, según la densidad de corriente permitida (ITC-LAT-07) se halla de acuerdo con la siguiente tabla.

Tabla 3.2

Sección nominal mm²	Densidad de corriente A/mm²		
	Cobre	Aluminio	Aleación de aluminio
10	8,75		
15	7,60	6.00	5.60
25	6,35	5.00	4.65
35	5,75	4.55	4,25
50	5,10	4.00	3.70
70	4,50	3.55	3.30
95	4,05	3.20	3.00
125	3,70	2.90	2.70
160	3,40	2.70	2.50
200	3,20	2.50	2.30
250	2,90	2.30	2.15
300	2,75	2.15	2.00
400	2,50	1.95	1.80
500	2,30	1.80	1.70
600	2,10	1.65	1.55

La sección 54,6 mm² está comprendida entre 50 y 70 mm², por lo que la densidad de corriente estará comprendida entre 4 y 3,55 A/mm².

A la diferencia de 70-50=20 mm² le corresponde una diferencia de densidad de corriente de 3,55-4=-0,45 A/mm². A cada mm² de sección, le corresponde:

$$\frac{-0{,}45}{20} = -0{,}0225 \text{ A/mm}^2$$

Interpolando entre 50 y 54,6 mm², con una diferencia de 4,6 mm², a la sección de 54,6 le corresponde una densidad de corriente de 4-0,0225·4,6=3,8965=3,9 A/mm².

Para cables de aluminio-acero la densidad de corriente correspondiente a su sección total como si fuera de aluminio se multiplica por un coeficiente de reducción según la siguiente tabla.

Tabla 3.3

Composición.	6+1	26+7	30+7	54+7
Coeficiente.	0,937	0,937	0,916	0,95

$$I_{Lmáx} = s \cdot \delta \cdot \alpha = 54{,}6 \cdot 3{,}9 \cdot 0{,}937 = 199{,}52 \text{ A}$$

La potencia aparente máxima de transporte:

$$S_{máx} = \sqrt{3}\, V_L I_{Lmáx} = \sqrt{3} \cdot 20\,000 \cdot 199{,}52 = 6\,911{,}58 \cdot 10^3 \text{ VA} = 6\,911{,}58 \text{ kVA}$$

© Ediciones Paraninfo

3.3-4. En una línea aérea trifásica de 20 kV, 50 Hz y longitud 3 km, se utilizan tres conductores LA 56. La reactancia media es 0,4 Ω/km y la resistencia media 0,613 Ω/km. Calcular la potencia activa máxima de transporte con factor de potencia 0,8 inductivo, para una caída de tensión del 3%.

Solución: 4 381 kW

3.3-5. Para transportar una carga de 600 kW mediante una línea aérea trifásica de 20 kV, 50 Hz y longitud 4 km, se utilizan tres conductores LA 56. Si la reactancia media es 0,4 Ω/km y la resistencia media 0,613 Ω/km, Calcular:

a) Intensidad de línea con factor de potencia 0,8 inductivo.
b) Caída de tensión en la línea.

a) La intensidad de línea: $I_L = \dfrac{P}{\sqrt{3}\, V_L \cos\varphi} = \dfrac{600\,000}{\sqrt{3}\cdot 20\,000\cdot 0{,}8} = 21{,}65 \text{ A}$

b) La caída de tensión:

$$u = \sqrt{3}\, I_L L\,(R\cos\varphi + X\operatorname{sen}\varphi) = \sqrt{3}\cdot 21{,}65\cdot 4\cdot(0{,}613\cdot 0{,}8 + 0{,}4\cdot 0{,}6) = 109{,}56 \text{ V}$$

En tanto por cien: $u\% = \dfrac{109{,}56\cdot 100}{20\,000} = 0{,}548\%$

3.3-6. Calcular que momento eléctrico en km·kW, produciría en una línea de 20 kV, 50 Hz, con conductor LA 30, de reactancia 0,41 Ω/km y resistencia 1,07 Ω/km una caída de tensión del 2%, con un factor de potencia 0,8 inductivo.

Solución: 5 808 km·kW

3.3-7. Para suministro de energía eléctrica con una potencia de 500 kVA a 20 kV, 50 Hz, en una distancia de 2 km, se utiliza conductor LA 30. La cruceta que soporta los conductores hace que la distancia entre estos sea $D_{12}=1{,}6$ m, $D_{23}=1{,}6$ m y $D_{31}=3{,}2$ m. Calcular:

a) Coeficiente de autoinducción de la línea.
b) Impedancia de la línea.
c) Intensidad que circula por la línea según la potencia de transporte.
d) Densidad de corriente en el conductor.
e) Caída de tensión en la línea a plena carga, con factor de potencia 0,8 inductivo.
f) Intensidad máxima que puede circular por la línea, admitiendo una densidad de corriente de 4,55 A/mm^2.
g) Potencia máxima de transporte con factor de potencia 0,8.

Solución: a) $13{,}3\cdot 10^{-4}$ H/km; b) 2,3Ω; c) 14,43 A; d) 0,46 A/mm^2; e) 0,277 %, f) 132,6 A, g) 3 675 kW.

3.3-8. Calcular la potencia perdida en una línea aérea de 20 kV, 50 Hz, formada por conductores LA 110, de resistencia 0,307 Ω/km y longitud 4 km, si se transporta una potencia de 800 kW con factor de potencia 0,86 inductivo.

La potencia perdida $P_p = \dfrac{R L P^2}{V_L^2 \cos^2\varphi} = \dfrac{0{,}307\cdot 4\cdot 800^2}{20^2\cdot 0{,}86^2} = 2\,657 \text{ W}$

© Ediciones Paraninfo

3.3-9. Calcular qué longitud máxima debe tener una línea trifásica de 20 kV, 50 Hz, con conductores LA 56 de resistencia 0,613 Ω/km, por la que circula una intensidad de línea de 80 A con factor de potencia 0,8 inductivo, para que la potencia perdida sea como máximo 2 kW.

Solución: 169,9 m

3.3-10. Calcular el momento eléctrico que en la línea del problema anterior provocará una pérdida de potencia del 2%, con factor de potencia 0,8 inductivo.

Solución: 8 352 km·kW

3.3-11. Una línea trifásica de 1500 m alimenta un centro de transformación de 1 000 kVA a una tensión de 20 kV. El conductor utilizado es LA 56 y la cruceta que soporta los conductores tiene una distancia entre ellos de $D_{12}=2{,}05$ m, $D_{23}=2{,}05$ m y $D_{31}=4$ m. Calcular:

a) Impedancia de la línea.
b) Caída de tensión porcentual en la línea con factor de potencia 0,8 inductivo.
c) Pérdida de potencia en la línea.
d) Densidad de corriente en el conductor.

Solución: a) 1,1 Ω, b) 0,276%, c) 2,3 kW; d) 0,529 A/mm^2

3.4. AISLADORES

Aíslan al conductor que forma la línea del apoyo que lo soporta. Se fabrican en porcelana, vidrio y esteatita con resinas epoxi.

Los aisladores se clasifican en varios tipos:

1) Aisladores fijos, que pueden ser simples (de una pieza) o compuestos (de varias piezas).
2) Aisladores en cadena o suspendidos, que pueden ser de caperuza y badajo (rótula) o aisladores macizos (aisladores tipo motor).
3) Aisladores con montura metálica, que llevan piezas metálicas para sujetar al conductor.
4) Aisladores pasantes, con un agujero longitudinal para pasar el conductor.
5) Aisladores de barra o bastón, que son de gran longitud y sin partes metálicas entre soporte y conductor.
6) Aisladores especiales, que pueden ser antiniebla, de costa y de baño de aceite. Presentan gran dificultad a formar arco eléctrico entre conductor y soporte.

3.5. AISLAMIENTO SUSPENDIDO EN LÍNEAS DE MEDIA TENSIÓN

En las líneas de aéreas de media tensión de 20 kV se utilizan aisladores en forma de campana con caperuza y badajo, como indica la figura 3.3.

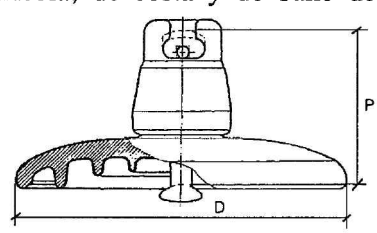


Fig. 3.3

© Ediciones Paraninfo

Los elementos aisladores de vidrio, cumplen la norma UNE-EN 60305, soportan cada uno unos 10 kV. Se consiguen distintos niveles de aislamiento según el tipo de aislador utilizado y el número de ellos que forman la cadena. Los más utilizados para líneas de 20 kV y sus características se indican en la tabla siguiente:

Tabla 3.4

Designación.	Nivel de aislamiento	Diámetro máximo D (mm).	Paso nominal P (mm).	Tensiones soportadas por un elemento	
				A frecuencia industrial bajo lluvia. Valor eficaz (kV)	A impulso tipo rayo. Valor cresta (kV)
U 40 B	1	175	110	33	74
U 70 BS	2	255	127	45	105

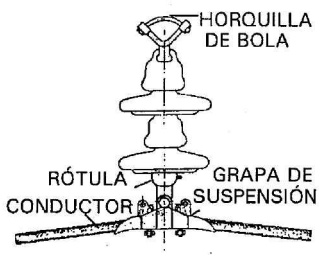


Fig. 3.4

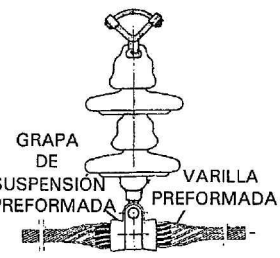


Fig. 3.5

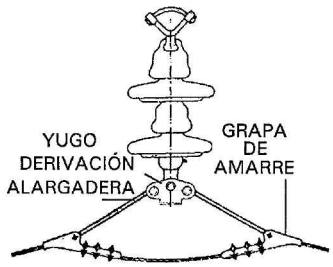


Fig. 3.6

Las cadenas que se forman son de dos tipos:

1) *Cadenas de suspensión*. Están formadas por la horquilla de bola (de acero galvanizado) para unir a la cruceta, por dos aisladores y la grapa de suspensión (acero galvanizado). Esta grapa de suspensión del conductor es distinta según la cadena de suspensión sea de suspensión simple (fig. 3.4), cadena de suspensión cruce (fig. 3.5) o de suspensión derivación (fig. 3.6).
2) *Cadenas de amarre*. Están formadas por la horquilla de bola que une la cadena a la cruceta, tres aisladores y la grapa de amarre, unida al último aislador de la cadena (fig. 3.7) por una rótula larga. Se utiliza en puntos de anclaje o de fin de línea. Se utilizan también con amarre preformado (fig. 3.8).

Actualmente se utilizan también aisladores sintéticos de composite.

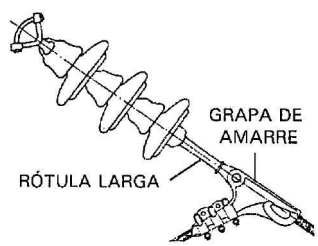


Fig. 3.7

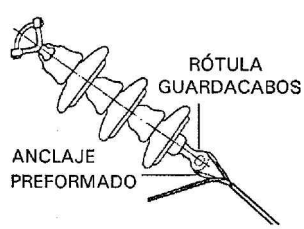


Fig. 3.8

3.6. APOYOS

Son los elementos de la línea aérea que soportan los conductores y demás elementos de la línea separándolos del terreno.

© Ediciones Paraninfo

1) *Según el tipo de material*, pueden ser:
   a) Madera, de pino, abeto o castaño, con tratamiento contra la putrefacción.
   b) Hormigón armado, fabricado con distintas técnicas, preferentemente vibrado.
   c) Metálicos de acero, de forma tubular, de perfiles laminados y de chapa. Actualmente se utilizan también apoyos de fibra de vidrio.
2) *Según la función de los apoyos en la línea*, estos se clasifican en:
   a) Apoyo de suspensión, con cadenas de aislamiento de suspensión.
   b) Apoyo de amarre, con cadenas de aislamiento de amarre.
   c) Apoyo de anclaje, con cadenas de aislamiento de amarre, que proporciona un punto firme a la línea.
   d) Apoyo de principio y fin de línea, con cadenas de aislamiento de amarre, que soportan las tensiones de toda la línea.
   e) Apoyos especiales, de función diferente a los anteriores.
3) *Atendiendo a su posición relativa*, respecto al trazado de la línea:
   a) Apoyo de alineación, usado en un tramo rectilíneo de la línea, con cadenas de suspensión o amarre.
   b) Apoyo de ángulo, usado en un ángulo del trazado de una línea, con cadenas de suspensión o amarre.

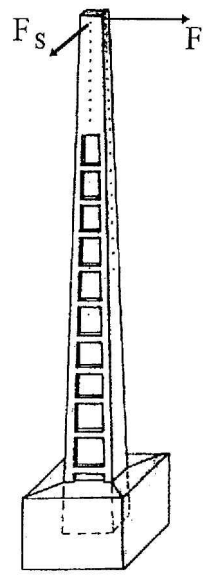


Fig. 3.9

3.7. POSTES DE HORMIGÓN EN MEDIA Y BAJA TENSIÓN

En las líneas de distribución en M.T. y B.T. se suelen utilizar postes de hormigón vibrado macizos y reforzados según la norma UNE 207016 (fig. 3.9).

■ Designación

Se nombran por las letras HV (hormigón vibrado) seguidas del esfuerzo nominal en daN, la letra R (si es poste reforzado) o N (en poste normal) y la altura en metros. Los apoyos de hormigón huecos son normales y se designan por HVH.

Así el poste HV-400-R-11, es el poste de hormigón vibrado de esfuerzo nominal 400 daN, reforzado y de altura 11 m.

■ Esfuerzo nominal

El esfuerzo nominal se identifica por el color de que está pintada la cogolla o punta del poste.

El poste normal soporta el esfuerzo nominal según la dirección principal a 0,25 m por debajo de la cogolla.

El poste reforzado soporta el esfuerzo nominal F según la dirección principal a 0,25 m por debajo de la cogolla o un esfuerzo útil $0{,}9F$ a una distancia de 0,75 m por encima de la cogolla, que representa la posición resultante de los esfuerzos aplicados.

© Ediciones Paraninfo

Estos esfuerzos se consideran con un coeficiente de seguridad de 2,25 y aplicados simultáneamente con el esfuerzo resultante de la presión ejercida por el viento de 100 daN/m^2 en su mismo sentido sobre la superficie libre del poste.

■ **Esfuerzo secundario**

Es el esfuerzo máximo F_s que puede soportar un poste en dirección secundaria aplicado a 0,25 m por debajo de la cogolla con un coeficiente de seguridad igual que para el esfuerzo nominal.

■ **Cimentación**

Se utiliza para la cimentación hormigón con dosificación de 200 kg/m^3 y resistencia mecánica mínima de 120 daN/cm^2. (se utilizan para 1 m^3 de hormigón, 850 dm^3 de grava, 425 dm^3 de arena seca, 200 kg de cemento tipo portland P-350 y el agua necesaria). Los macizos de cimentación, con las dimensiones indicadas en la tabla 3.5, quedan a unos 10 cm por encima del terreno y con una pequeña pendiente como vierte-aguas (fig. 3.10).

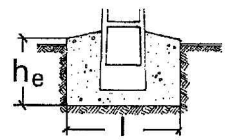


Fig. 3.10

Tabla 3.5

APOYOS	ALTURA TOTAL m	COLOR DE IDENTIFICACIÓN	CIMENTACIÓN EN TERRENO NORMAL	
			LADO l (m)	ALTURA he (m)
HV-160-R	9	NARANJA	0,6	1,2
	11		0,6	1,4
HV-250-R	9	NEGRO	0,6	1,4
	11		0,6	1,5
	13		0,6	1,7
HV-400-R	9	AZUL	0,7	1,4
	11		0,7	1,5
	13		0,7	1,7
HV-630-R	9	ROJO	0,8	1,5
	11		0,8	1,6
	13		0,8	1,7
	15		0,8	1,9
HV-1000-R	9	VERDE	0,8	1,8
	11		0,8	1,9
	13		0,8	1,9
	15		0,8	2

■ **Bornes de puesta a tierra de los apoyos**

El poste lleva en la cara más estrecha dos bornes de puesta a tierra, con tornillos galvanizados. Uno a unos 2,1 m por debajo de la cogolla y otro de 2 m a 2,7 m de la base, según la altura del apoyo.

© Ediciones Paraninfo

■ **Identificación**

Situado aproximadamente a 4 m de la base del poste está colocada una placa de identificación (con el nombre del fabricante, fecha de fabricación, número de serie y designación), y en las líneas M.T. una placa de riesgo eléctrico.

También se utilizan actualmente apoyos huecos de hormigón HVH, con menos peso que los apoyos HV.

3.8. APOYOS METÁLICOS DE CELOSÍA PARA MEDIA TENSIÓN

Se utilizan apoyos de celosía metálica en media tensión, como apoyos de anclaje, de ángulo, de cruce y de fin de línea.

Está formado por perfiles laminados de acero montados en celosía de forma tronco piramidal (norma UNE 207017), unidos a los cuatro montantes por tornillos o soldadura eléctrica (fig. 3.11). Todos los materiales férreos están galvanizados en caliente.

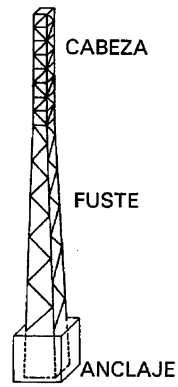


Fig. 3.11

■ **Designación**

Según la norma UNE 207017, se nombran por la letra C seguida del esfuerzo nominal en daN y la altura en metros.

Así el apoyo C-500-12, es el apoyo de celosía de esfuerzo nominal 500 daN, y de altura 12 m.

■ **Esfuerzo nominal**

Es el esfuerzo horizontal que soporta el apoyo en el extremo superior, según la dirección principal y aplicado simultáneamente con la resultante de la presión del viento y con la acción de las cargas verticales del apoyo.

El esfuerzo secundario es el esfuerzo horizontal que soporta el apoyo según la dirección secundaria y aplicado simultáneamente con las cargas verticales especificadas para el apoyo. Estos esfuerzos se consideran con un coeficiente de seguridad de 1,5.

■ **Cimentación**

Se utiliza para la cimentación hormigón con una dosificación de 200 kg/m^3 y resistencia mecánica mínima de 120 daN/cm^2, igual que en apoyos de hormigón. Los macizos de cimentación, con las dimensiones indicadas en la tabla, quedan a unos 10 cm por encima del terreno (20 cm en terrenos de cultivo) y con la parte superior terminada en punta de diamante con una pequeña pendiente como vierte-aguas (fig. 3.12).

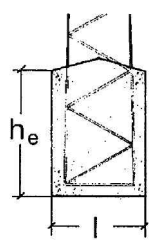


Fig. 3.12

Por encima de la cimentación, en las zonas de pública concurrencia, se utiliza una protección antiescala consistente en una chapa de hierro galvanizado que rodea el apoyo con una altura de unos 2,5 m (fig. 3.13).

Los apoyos metálicos más utilizados y su cimentación se indican en la tabla siguiente:

© Ediciones Paraninfo

Tabla 3.6

APOYO	ALTURA TOTAL m	CIMENTACIÓN EN TERRENO NORMAL	
		LADO l (m)	ALTURA he (m)
C-1000	20	1,5	1,8
C-2000	12	1,1	2,1
	14	1,2	2,2
	16	1,3	2,2
	18	1,4	2,2
	20	1,5	2,2
C-3000	12	1,1	2,4
	14	1,2	2,4
	16	1,3	2,4
	18	1,4	2,5
	20	1,5	2,5
C-4500	12	1,1	2,6
	14	1,2	2,6
	16	1,3	2,7
	18	1,4	2,8
	20	1,5	2,8
C-7000	14	1,8	2,7
	16	1,8	2,8
	18	2	2,8
C-9000	14	1,8	2,9
	16	1,8	3
	18	2	3

La base del apoyo se coloca entre 0,1 m y 0,2 m sobre el fondo de la cimentación.

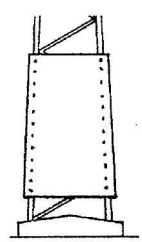


Fig. 3.13

■ **Bornes de puesta a tierra de los apoyos**

El apoyo lleva un taladro a 0,4 m del suelo, en cada uno de los cuatro montantes, para el tornillo de conexión de puesta a tierra.

■ **Placa de riesgo eléctrico**

Situada como mínimo a 2 m del suelo se coloca la placa de riesgo eléctrico.

Se utilizan actualmente apoyos de chapa metálica con la denominación CH.

3.9. CRUCETAS

Sujetan los soportes de los aisladores a los apoyos.

Según el tipo de apoyos, las crucetas son de diversos materiales:

© Ediciones Paraninfo

- En apoyos de madera, se utiliza madera o hierro,
- En apoyos de hormigón, se utiliza acero galvanizado.
- En apoyos metálicos, se utilizan perfiles laminados de acero.

3.10. CRUCETAS PARA APOYOS DE HORMIGÓN EN MEDIA TENSIÓN

Las crucetas utilizadas en postes de hormigón son de varios tipos. Las más utilizadas son de tipo bóveda (fig. 3.14) y de tipo rectas, éstas a su vez son de simple o de doble circuito (fig. 3.15).

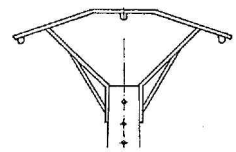


Fig. 3.14

3.11. CRUCETAS PARA APOYOS METÁLICOS EN MEDIA TENSIÓN

Las crucetas utilizadas en apoyos de celosía son de hierro galvanizado y los armados más utilizados son de los tipos:

- Bóveda, utilizada en apoyos de alineación, que puede ser bóveda horizontal (fig. 3.16), utilizada en apoyos de anclaje.
- Horizontal, utilizada en apoyos en ángulo, y cruceta armada en triángulo como indica la figura 3.17.
- Tresbolillo, y para doble circuito, armado en exágono (fig. 3.18).

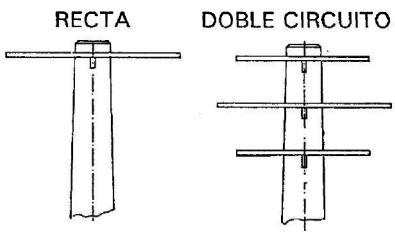


Fig. 3.15

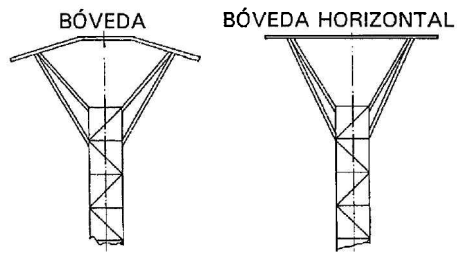


Fig. 3.16

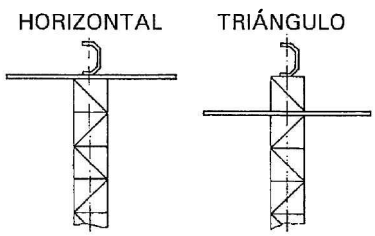


Fig. 3.17

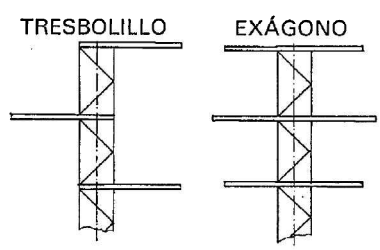


Fig. 3.18

© Ediciones Paraninfo

3.12. HERRAJES

Son los soportes de los aisladores, construidos de acero galvanizado, que sujetan el aislador a la cruceta. En los cables trenzados los herrajes son ganchos de acero galvanizado para amarre o suspensión del haz al apoyo.

La sujeción del herraje se realiza según el tipo de aislador:

Aislador fijo: se une al herraje mediante yeso o cemento, en líneas de media tensión (fig. 3.19) y en baja tensión (fig. 3.20). Estos aisladores rígidos se utilizan en apoyos de madera y están actualmente en desuso.

Aislador de suspensión: se une al herraje mediante horquilla de bola y al conductor mediante rótula, que sostiene la grapa de amarre o de suspensión como indica la figura 3.21.

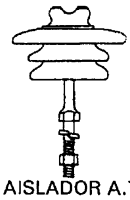

AISLADOR A.T
Fig. 3.19



Fig. 3.20

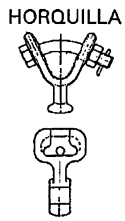


Fig. 3.21

3.13. ANTIVIBRATORIOS

Para reducir la vibración de los conductores en la línea se utilizan elementos antivibratorios:

a) varillas de armar, que son un conjunto de varillas redondas arrolladas en espiral sobre una porción del conductor.
b) Amortiguadores, que consisten en unos contrapesos sujetos al conductor. En la figura 3.22 se representa un amortiguador stockbridge.

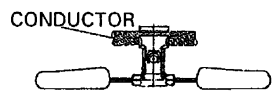
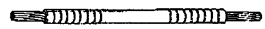


Fig. 3.22

3.14. EMPALMES Y DERIVACIONES EN LAS LÍNEAS AÉREAS DE MEDIA TENSIÓN

Se llama empalme a la unión de conductores que asegura su continuidad eléctrica y mecánica (ITC-LAT-07). Los empalmes no deberán aumentar la resistencia eléctrica del conductor y podrán soportar sin deslizamiento ni rotura el 95% de la carga de rotura del cable empalmado. No se pueden utilizar empalmes por soldadura a tope, ni colocar más de un empalme por vano y conductor excepto caso de reparación de avería.


Fig. 3.23

Se llama conexión a la unión de conductores que asegura su continuidad eléctrica. La conexión no debe aumentar la resistencia eléctrica del conductor y será sin tension mecánica. La unión de conductores de distinta sección o naturaleza se realiza en el puente de conexión de las cadenas horizontales de amarre.

Los empalmes a plena tracción para los cables aluminio acero utilizados en las líneas aéreas de media tensión se hacen mediante un manguito de unión por engastado (fig. 3.23). Se utiliza un manguito de acero para unir el cable de acero y después se coloca el manguito exterior de aluminio.

© Ediciones Paraninfo

Las derivaciones en los cables de aluminio acero se realizan mediante conector a presión o mediante grapa que une por compresión mecánica por medio de tornillos (fig. 3.24).

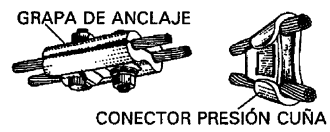


Fig. 3.24

3.15. CÁLCULO MECÁNICO DE CABLES

Un cable que cuelga bajo la acción de su propio peso P está sometido a fuerzas de tracción dirigidas según la tangente a la curva que forma. Considerando un trozo de cable desde el punto más bajo de la curva C hasta otro punto D (fig. 3.25). La tensión en C es una fuerza horizontal T y en D una fuerza T_D tangente al cable en ese punto. Como el trozo de cable está en equilibrio, la suma de todas las fuerzas que actúan sobre él es nula. De aquí se obtienen las siguientes relaciones:

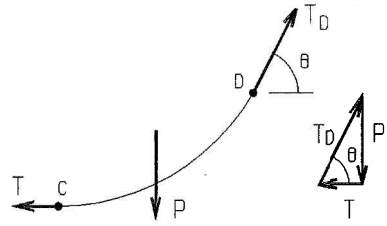


Fig. 3.25

$$T_D=\sqrt{T^2+P^2}\;;\quad T_D\cos\theta=T;\quad T_D\,\mathrm{sen}\,\theta=P;\quad \mathrm{tg}\,\theta=\frac{P}{T}$$

De estas relaciones se deduce que la tensión horizontal T es constante en todos los puntos, y que la tensión T_D es mínima en el punto más bajo y máxima en uno de los dos soportes.

El cable que cuelga por su propio peso está sometido a una carga distribuida a lo largo de su longitud. Si la carga se considera distribuida a lo largo de una línea horizontal, designando por p el peso por unidad de longitud horizontal y tomando el origen de unos ejes de coordenadas en el punto más bajo C del cable (fig. 3.26), la carga total que soporta el cable entre C y otro punto D de coordenadas (x,y) es $P=px$. Las siguientes relaciones definen la tensión y su dirección en D:

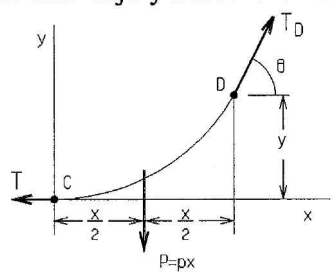


Fig. 3.26

$$T_D=\sqrt{T^2+p^2x^2}\;;\quad \mathrm{tg}\,\theta=\frac{px}{T}$$

Como la porción de cable está en equilibrio, la suma de momentos de las fuerzas que actúan sobre él, respecto a un punto debe ser cero. Tomando momentos respecto a D:

$$px\frac{x}{2}-Ty=0;\quad y=\frac{p}{2T}x^2$$

Ésta es la ecuación de una parábola de eje vertical con vértice en el origen de coordenadas.

© Ediciones Paraninfo

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

3.15-1. Un vano de una línea aérea con conductores LA 30 es de 110 m. El conductor con un peso 0,106 daN/m, que suponemos distribuido sobre la horizontal, está tendido con una tensión de 70 daN. Calcular:

a) Tensión horizontal.

b) Ángulo que forma el conductor con la horizontal en el punto de amarre.

a) El peso de la mitad del cable en el vano: $P = p \cdot x = 0{,}106 \cdot \frac{110}{2} = 5{,}83$ daN

La tensión horizontal es la tensión en el punto más bajo del cable:

$$T = \sqrt{T_D^2 - P^2} = \sqrt{70^2 - 5{,}83^2} = 69{,}76 \text{ daN}$$

b) El ángulo que forma el cable en el punto de amarre:

$$\theta = \text{áng tg}\frac{P}{T} = \text{áng tg}\frac{5{,}83}{69{,}76} = 4{,}78\ ^\circ$$

3.15-2. Un conductor eléctrico que forma parte de una línea aérea, está tendido sobre un vano horizontal de 80 m. El peso del cable es 0,43 daN/m. Si consideramos que el conductor forma una parábola, calcular la tensión a que está sometido en un extremo si la tensión en el punto más bajo es de 260 daN.

Solución: 260,57 daN.

3.16. CÁLCULO DE LA FLECHA

Se llama flecha f a la mayor distancia vertical entre la recta que une los puntos de amarre del conductor con los puntos de apoyo y el conductor (fig. 3.27). La curva que forma el conductor sometido a su propio peso se llama catenaria; pero para simplificar los cálculos en la práctica esta curva se considera una parábola.

Según la ecuación de la parábola del cable, la flecha en tramo horizontal:

$$f = \frac{p \cdot a^2}{8 \cdot T} \quad \text{(m)}$$

p: Peso del conductor con sobrecarga (daN/m).

a: Luz horizontal del vano (m).

T: Tensión horizontal, que permanece constante en cualquier punto de la curva del conductor, e igual a la tensión en el punto más bajo.

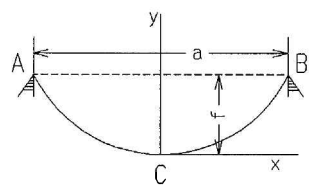


Fig. 3.27

DEMOSTRACIÓN

Considerando el origen de coordenadas en el punto más bajo, la distancia horizontal a un extremo:

$$x = \frac{a}{2}$$

La flecha, igual a la máxima distancia vertical:

$$y = f = \frac{px^2}{2T} = \frac{pa^2}{8T}$$

© Ediciones Paraninfo

Se admite como válido este cálculo para vanos menores de 300 m y con apoyos con desnivel menor del 10%.

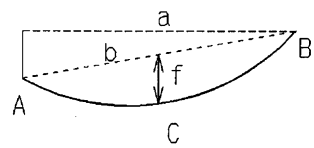


Fig. 3.28

La longitud del cable: $l = a + \frac{8f^2}{3a} = a + \frac{a^3p^2}{24T^2}$

En vanos con apoyos situados a distinto nivel, con luz horizontal a y distancia entre los apoyos b (fig. 3.28), la flecha en el centro del vano se calcula con suficiente aproximación por la fórmula:

$$f = \frac{pab}{8T}$$

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

3.16-1. Un conductor eléctrico LA 56 está tendido en un vano de 100 m, con un flecha de 1,2 m. Si la carga es de 0,186 daN/m y se considera distribuida sobre la horizontal. Calcular:

a) Tensión horizontal.
b) Tensión en un extremo.
c) Longitud del conductor en el vano.

a) De la fórmula de la flecha se obtiene la tensión horizontal:

$$f = \frac{p \cdot a^2}{8 \cdot T}; \quad T = \frac{p \cdot a^2}{8 \cdot f} = \frac{0{,}186 \cdot 100^2}{8 \cdot 1{,}2} = 193{,}75 \text{ daN}$$

b) Considerando la mitad de la parábola que forma el cable, el peso:

$$P = p \cdot \frac{a}{2} = 0{,}186 \cdot 50 = 9{,}3 \text{ daN}$$

La tensión en un extremo: $T_D = \sqrt{T^2 + P^2} = \sqrt{193{,}75^2 + 9{,}3^2} = 194$ daN

c) La longitud del conductor: $l = a + \frac{8f^2}{3a} = 100 + \frac{8 \cdot 1{,}2^2}{3 \cdot 100} = 100{,}04$ m

3.16-2. Un conductor LA 110, de peso 0,425 daN/m, está tendido en un vano horizontal de 120 m con una tensión horizontal de 800 daN. Calcular:

a) Flecha.
b) Tensión máxima.
c) Pendiente en un extremo.
d) Longitud del conductor.

Solución: a) 0,956 m; b) 800,41 daN; c) 1,83°; d) 120,02 m

3.16-3. Un conductor LA 110 está sujeto a un apoyo de alineación por una cadena de suspensión, siendo los vanos contiguos al apoyo de 100 y 80 m. Si la carga que se supone distribuida horizontalmente es de 0,425 daN/m. Calcular:

a) Tensión horizontal, que es igual para los dos vanos, sabiendo que la flecha en el vano de 80 m es de 1,5 m.
b) Flecha en el vano de 100 m.

© Ediciones Paraninfo

c) Tensión máxima en cada vano.

Solución: a) 226,7 daN; b) 2,34 m; c) T_1=227,7 daN, T_2=227,3 daN.

3.17. ECUACIÓN DEL CAMBIO DE CONDICIONES

La ecuación del cambio de condiciones relaciona la tensión mecánica de un cable, en unas condiciones dadas, con la tensión en otras condiciones distintas.

Consideremos un conductor de sección s, colocado en un vano de luz a, siendo p_1 la carga por unidad de longitud. A una temperatura Θ_1 le corresponde una tensión T_1; si varían los valores de p_1 a p_2 y de Θ_1 a Θ_2, se producirá también una nueva tensión mecánica T_2.

La variación de la longitud del conductor $l_1 - l_2 = \frac{a^3 p_1^2}{24 T_1^2} - \frac{a^3 p_2^2}{24 T_2^2}$

Esta variación de longitud es debida a los efectos de dilatación producida por la diferencia de temperaturas, $(\Theta_1 - \Theta_2)$, y de elasticidad del cable debido a la diferencia de tensiones mecánicas, $(T_1 - T_2)$.

La variación de longitud debida a la dilatación, siendo α el coeficiente de dilatación lineal, y considerando la luz del vano a aproximadamente igual a la longitud del cable:

$$a\alpha(\Theta_1 - \Theta_2)$$

La variación de longitud debida a la elasticidad, siendo E el módulo de elasticidad del cable (relación entre la carga o tensión mecánica por unidad de sección y la deformación por unidad de longitud):

$$\frac{a}{sE}(T_1 - T_2)$$

Entonces, la variación de longitud: $\frac{a^3 p_1^2}{24 T_1^2} - \frac{a^3 p_2^2}{24 T_2^2} = a\alpha(\Theta_1 - \Theta_2) + \frac{a}{sE}(T_1 - T_2)$

Esta expresión se llama *ecuación del cambio de condiciones*. Suele expresarse en función de la tensión mecánica, de la temperatura y la carga por unidad de longitud, de la siguiente forma:

$$T_2^2(T_2 + A) = B$$

$$A = \frac{s \cdot E \cdot a^2 \cdot p_1^2}{24 \cdot T_1^2} - T_1 - \alpha \cdot s \cdot E(\Theta_1 - \Theta_2)$$

$$B = \frac{s \cdot E \cdot a^2 \cdot p_2^2}{24}$$

T_1: Tensión inicial (daN).

T_2: Tensión final después de cambio de condiciones (daN).

Θ_1: Temperatura inicial (°C).

Θ_2: Temperatura final (°C).

© Ediciones Paraninfo

p_1: Carga mecánica inicial (daN/m).
p_2: Carga mecánica final (daN/m).
a: Longitud del vano (m).
s: Sección del conductor (mm^2).
E: Módulo de elasticidad (daN/mm^2).
α: Coeficiente de dilatación del conductor ($^oC^{-1}$).

Se obtiene así para cada temperatura, la tensión de tendido, resolviendo la ecuación del cambio de condiciones. Así se confeccionan tablas de tendido para cada conductor, según la longitud del vano y la temperatura.

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

3.17-1. Un cable conductor LA 30 en un vano horizontal, de luz 120 m, se tiende a 15 °C con una tensión mecánica de 71 daN, sin viento en zona B. Calcular:

a) Flecha si la carga está distribuida a lo largo de la horizontal, siendo el peso del conductor $p=0,1059$ daN/m.
b) Tensión a la que estará sometido el cable si la temperatura aumenta a 25 °C sin viento, siendo $E=7\,900$ daN/mm², $\alpha=19,1\cdot10^{-6}$ °C⁻¹ y la sección $s=31,1$ mm².
c) Flecha en este último caso.

a) Considerando la tensión mecánica de tendido aproximadamente igual a la tensión horizontal.

La flecha $f=\dfrac{p\cdot a^2}{8\cdot T}=\dfrac{0,1059\cdot120^2}{8\cdot71}=2,68$ m

b) Para calcular la nueva tensión a la que está sometido el conductor a la temperatura $\Theta_2=25$ °C y sin sobrecarga, se utiliza la ecuación del cambio de condiciones.

$$T_2^2(T_2+A)=B$$

El valor del coeficiente A se calcula por la fórmula:

$$A=\frac{s\cdot E\cdot a^2\cdot p_1^2}{24\cdot T_1^2}-T_1-\alpha\cdot s\cdot E(\Theta_1-\Theta_2)$$

$$A=\frac{31,1\cdot7\,900\cdot120^2\cdot0,1059^2}{24\cdot71^2}-71-19,1\cdot10^{-6}\cdot31,1\cdot7\,900\cdot(15-25)=303,9$$

El valor del coeficiente B:

$$B=\frac{s\cdot E\cdot a^2\cdot p_2^2}{24}=\frac{31,1\cdot7\,900\cdot120^2\cdot0,1059^2}{24}=1653220\simeq165,3\cdot10^4$$

La ecuación del cambio de condiciones toma la forma: $T_2^2(T_2+303,9)=165,3\cdot10^4$

Esta ecuación se resuelve por tanteos, siendo la solución con suficiente aproximación $T_2=66,8$ daN

c)

La flecha con esta tensión: $f_2=\dfrac{p_2\cdot a^2}{8\cdot T}=\dfrac{0,1059\cdot120^2}{8\cdot66,8}=2,85$ m

© Ediciones Paraninfo

3.17-2. Una línea eléctrica aérea con conductor LA 56 tiene un vano horizontal de longitud 100 m, en donde el cable conductor está sometido a una tensión de 143 kp a 20°C sin sobrecarga por viento o hielo. Calcular:

a) La tensión a que estará sometido el cable si la temperatura baja a 5°C sin sobrecarga sobre el conductor, sabiendo que para este cable de sección $s=54{,}6\,mm^2$, el peso $p=0{,}1855$ daN/m, $E=7\,900$ daN/mm^2 y $\alpha=19{,}1\cdot10^{-6}$ °C^{-1}.

b) Flecha del conductor en este caso.

Solución: a) 172,4 daN; b) 1,34 m

3.18. CÁLCULOS MECÁNICOS DE LOS CONDUCTORES DE LA LÍNEA DE M.T.

Las condiciones de cálculo se indican en el Reglamento de líneas de alta tensión RLAT (ITC-LAT-07). El cálculo mecánico se realiza teniendo en cuenta las cargas y sobrecargas que intervienen sobre los elementos que forman la línea aérea.

■ Cargas permanentes

Cargas verticales debidas al peso propio de los elementos que forman la línea: conductores, aisladores, herrajes, apoyos y cimentaciones.

■ Presiones debidas al viento

Se indican las presiones en daN/m^2 sobre los distintos elementos de la línea, considerando un viento de 120 km/h, excepto para líneas de categoría especial. Para líneas de categoría primera, segunda y tercera:

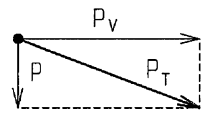


Fig. 3.29

- Sobre cables de diámetro igual o inferior a 16 mm, 60 daN/m^2
- Sobre cables de diámetro superior a 16 mm, 50 daN/m^2

Se calcula la sobrecarga por viento $P_v=p_v\cdot d$ (daN/m)

p_v: Presión del viento (daN/m^2).

d: Diámetro del conductor (m).

El peso del conductor con sobrecarga (fig. 3.29) $P_T=\sqrt{P_v^2+P^2}$ (daN/m)

Siendo P el peso del conductor (daN/m).

■ Sobrecargas motivadas por el hielo

Según la zona, de acuerdo con la altitud:

- Zona A, de altitud sobre el nivel del mar menor de 500 m.
- Zona B, de altitud entre 500 y 1 000 m.
- Zona C, de altitud mayor de 1 000 m.

Se consideran sobrecargas por hielo P_h en las zonas B y C (kaN).



Fig. 3.30

$$P_h=k\sqrt{d} \quad (kaN/m)$$

d: Diámetro del conductor (mm).

k: Constante, de valor 0,18 en zona B y 0,36 en zona C.

El peso con sobrecarga (fig. 3.30) $P_T=P_h+P$ (kp/m).

Siendo P el peso del conductor (daN/m).

© Ediciones Paraninfo

■ **Desequilibrio de tracciones**

En el tensado de los cables conductores de una línea se equilibra la tensión en los vanos contiguos. Si estos vanos no son de la misma longitud, cuando varían las condiciones de sobrecarga o temperatura, variarán los valores de la tensión mecánica, produciéndose un desequilibrio de tracciones que se transmiten al apoyo.

Los valores de tensión de desequilibrio a considerar según el tipo de apoyo para líneas de tensión nominal menor o igual a 66 kV.

Apoyos de alineación y ángulo, el 8% de las tracciones unilaterales de todos los cables.

Apoyos de anclaje, el 50% de las tracciones unilaterales de todos los cables.

Apoyos de fin de línea, el 100% de las tracciones unilaterales de todos los cables.

■ **Rotura de conductores**

En el RLAT (ITC-LAT-07), se consideran los esfuerzos y su punto de aplicación en el apoyo cuando se produce la rotura de un cable.

■ **Esfuerzos resultantes de ángulo**

En los apoyos en ángulo se tiene en cuenta el esfuerzo resultante de las tracciones de los cables que están unidos al apoyo.

■ **Tracción máxima admisible**

Según el RLAT (ITC-LAT-07), la tracción máxima de los conductores no resultará superior a su carga de rotura dividida por 2,5 si se trata de cables (varios alambres trenzados) o dividida por 3 si se trata de alambres (un solo conductor).

La temperatura de hipótesis, para máxima tensión, se escoge de acuerdo con la altitud por donde transcurre el tendido de la línea, según el RLAT (ITC-LAT-07).

Tabla 3.7

Condición	Zona A		Zona B		Zona C	
	Temperatura	Sobrecarga	Temperatura	Sobrecarga	Temperatura	Sobrecarga
Máxima tensión.	-5 °C	Viento	-15 °C	Hielo	-20 °C	Hielo

Se considera la hipótesis de hielo + viento en zona B y C a -20 °C, en las líneas de categoría especial o cuando el proyectista lo considere necesario o la norma particular de la empresa eléctrica lo establezca.

Cuando la tensión mecánica a que está sometido el conductor es elevada, llegan a producirse, por efecto del viento, fenómenos vibratorios que pueden llegar a romperlo. Para evitar estas vibraciones se limita la tensión mecánica. Según el RLAT (ITC-LAT-07) para líneas aéreas con conductores sin aislamiento, se recomienda que a 15 °C de temperatura y sin viento el conductor tenga como máximo una "tensión de cada día" EDS (Every-day-stress) del 15% de su carga de rotura, o que no supere el 22% de su carga de rotura si se realiza un estudio de amortiguamiento y se instalan dispositivos antivibratorios.

© Ediciones Paraninfo

■ Flecha máxima

Las flechas máximas se calculan según las hipótesis fijadas por el RLAT (ITC-LAT-07) para líneas de segunda y tercera categoría.

Tabla 3.8

Condición	Zona A		Zona B		Zona C	
	Temperatura	Sobrecarga	Temperatura	Sobrecarga	Temperatura	Sobrecarga
Máxima flecha	-	-	0 °C	Hielo	0 °C	Hielo
	15 °C	Viento	15 °C	Viento	15 °C	Viento
	50 °C	Ninguna	50 °C	Ninguna	50 °C	Ninguna

■ Vano ideal de regulación

Para el emplazamiento de los apoyos, según las curvas de nivel del terreno por donde discurre la línea, hay que tener en cuenta que las curvas del conductor deben ser porciones de una misma catenaria (fig. 3.31). Los apoyos se van colocando siguiendo las partes elevadas del terreno. Como orientación, en las líneas de M.T. los vanos suelen ser de unos 100 m a 200 m de longitud horizontal o luz.

La igualación de tensiones horizontales en todos los vanos, exige que la línea se dividida en tramos de menos de 3 km, con apoyos de anclaje y cadenas de aisladores de amarre, de manera que la tensión mecánica de los conductores no se transmita de un tramo a otro.

Se procura que todos los tramos tengan longitudes similares, de manera que nunca uno llegue a ser al doble del otro.

Se admite que la tensión a que están sometidos los cables, iguales en todos los vanos que forman un tramo, varían como lo haría el de un vano teórico, llamado "vano ideal de regulación". El vano de regulación a_r en cada tramo para el tendido de la línea se calcula de la forma:

$$a_r = \sqrt{\frac{\Sigma a^3}{\Sigma a}}$$

a: Longitud de cada vano en el tramo considerado.

De forma aproximada y según proyecto tipo de UNESA, se puede admitir como vano de regulación:

$$a_r = \text{vano medio} + \frac{2}{3}(\text{vano máximo} - \text{vano medio})$$

Al tener la misma tensión en todos los vanos del tramo, la relación entre la flecha en un vano f y la flecha del vano de regulación f_r es la relación entre el cuadrado de las longitudes de los vanos:

$$\frac{f}{f_r} = \left[\frac{a}{a_r}\right]^2$$

© Ediciones Paraninfo

■ Parábola de replanteo

La parábola de replanteo del vano de regulación se traza considerando la flecha máxima. Se representa en papel milimetrado y se lleva sobre el perfil de la línea para comprobar que la altura del conductor sobre el terreno no sea, en el punto más desfavorable de cada vano, inferior a 6 m.

Las escalas mínimas que se utilizan para el trazado en plano de la línea son según el RLAT (ITC-LAT-09):

- Horizontal 1:2 000
- Vertical: 1:500

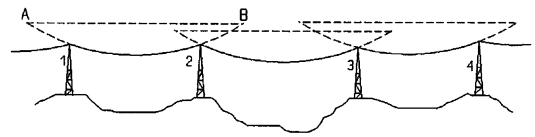


Fig. 3.31

Se situarán en el plano en planta todos los todos los servicios que existen en una franja de 50 m de anchura a cada lado del eje de la línea, tales como carreteras,ferrocarriles, etc.

■ Tensión de tendido

La línea está dividida en tramos definidos por los apoyos de anclaje. Para el tendido de la línea es necesario hallar el vano ideal de regulación en cada tramo y la tensión mecánica con que debe tenderse el cable.

Para el cálculo de las tablas de tendido se conoce la tensión mecánica en la hipótesis más desfavorable. Aplicando la ecuación de cambio de condiciones puede calcularse la tensión mecánica y la flecha para distintos vanos de regulación y temperaturas (se suelen realizar para temperaturas de 5 °C a 50 °C). El tendido debe realizarse en días sin viento, por lo que en el cálculo no intervienen sobrecargas, siendo la temperatura la única variable. En la tabla 3.9 se representa la tabla de tendido para conductor LA 30 en zona A, con tense máximo 336 daN, con vanos y flechas en metros.

Tabla 3.9. Tabla de tendido de conductor LA 30 en zona A con tense máximo 336 daN

Vanos	Tabla de tendido																						Tensión máxima	
	50 °C		40 °C		35 °C		30 °C		25 °C		20 °C		15 °C		10 °C		5 °C		0 °C		15 °C+v		-5 °C+v	
	f	T	f	T	f	T	f	T	f	T	f	T	f	T	f	T	f	T	f	T	f	T	f	T
50	0,4	77	0,3	103	0,3	119	0,2	138	0,2	158	0,2	180	0,2	202	0,2	225	0,1	247	0,1	271	0,5	267	0,4	336
70	0,8	79	0,7	96	0,6	107	0,6	120	0,5	135	0,4	152	0,4	171	0,3	191	0,3	212	0,3	234	1,0	279	0,8	336
80	1,1	79	0,9	93	0,8	102	0,8	113	0,7	125	0,6	140	0,6	156	0,5	174	0,5	193	0,4	213	1,2	285	1,1	336
90	1,4	80	1,2	91	1,1	98	1,0	107	0,9	117	0,9	128	0,8	142	0,7	157	0,6	174	0,6	192	1,5	290	1,3	336
100	1,7	80	1,5	90	1,4	95	1,3	102	1,2	110	1,1	119	1,0	130	0,9	142	0,9	156	0,8	172	1,9	294	1,6	336
110	2	80	1,8	88	1,8	93	1,7	99	1,6	105	1,5	112	1,4	121	1,3	131	1,2	142	1,1	154	2,2	298	2,0	336
120	2,4	80	2,2	87	2,1	91	2,0	96	1,9	101	1,8	107	1,7	114	1,6	121	1,5	130	1,4	140	2,6	302	2,4	336
130	2,8	81	2,6	87	2,5	90	2,4	94	2,3	98	2,2	103	2,1	108	2,0	114	1,9	121	1,8	129	3,1	305	2,8	336
140	3,3	81	3,1	86	3,0	89	2,9	92	2,8	96	2,6	100	2,5	104	2,4	109	2,3	114	2,2	120	3,5	308	3,2	336
150	3,7	81	3,5	85	3,4	88	3,3	91	3,2	94	3,1	97	3,0	101	2,9	105	2,8	109	2,7	114	4,0	310	3,7	336
175	5,1	81	4,9	85	4,8	86	4,7	88	4,6	91	4,4	93	4,3	95	4,2	98	4,1	101	4,0	104	5,4	315	5,0	336
200	6,6	81	6,4	84	6,3	85	6,2	87	6,1	88	6,0	90	5,9	92	5,8	94	5,6	95	5,5	98	6,9	319	6,6	336

© Ediciones Paraninfo

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

3.18-1. Una línea eléctrica a 20 kV discurre a una altitud de unos 800 m con una longitud de 3 km. Se utiliza conductor LA 30. Calcular:

a) Coeficiente de seguridad si se utiliza como tense máximo 336 daN.
b) Sobrecarga por viento.
c) Sobrecarga por hielo.
d) Calcular la flecha máxima a 50°C, sin viento, en un tramo de alineación de vano máximo horizontal 110 m y vano medio 80 m. El tense máximo se considera a -15°C con sobrecarga de hielo.
e) Parábola de replanteo.

Los datos necesarios del conductor son:

- Carga mínima de rotura del cable: 990 daN.
- Sección del conductor: 31,1 mm^2.
- Diámetro del conductor: 7,14 mm.
- Peso: 105,9 daN/km=0,1059 daN/m.
- Módulo de elasticidad: E=7 900 daN/mm^2.
- Coeficiente de dilatación: $\alpha=19{,}1\cdot10^{-6}\ °C^{-1}$.

a) El coeficiente de seguridad $\dfrac{990}{336}=2{,}95$

b) La sobrecarga debida a la presión del viento en sentido horizontal:

$$P_v=p_v\cdot d=60\cdot0{,}00714=0{,}4284 \text{ daN/m}$$

La carga del conductor con la sobrecarga debida al viento:

$$P_T=\sqrt{P_v^2+P^2}=\sqrt{0{,}1059^2+0{,}4284^2}=0{,}441 \text{ daN/m}$$

c) La sobrecarga debida al hielo: $P_h=k\sqrt{d}=0{,}18\sqrt{7{,}14}=0{,}481$ daN/m

La carga del conductor con la sobrecarga debida al hielo:

$$P_T=P_h+P=0{,}1059+0{,}481=0{,}5869 \text{ daN/m}$$

d) Para el cálculo de la flecha se halla la tensión a 50 °C a que está sometido el conductor por la ecuación del cambio de condiciones.

El vano de regulación:

$$a_r=\text{vano medio}+\frac{2}{3}(\text{vano máximo}-\text{vano medio})=80+\frac{2}{3}(110-80)=100 \text{ m}$$

La ecuación del cambio de condiciones $T_2^2(T_2+A)=B$

El valor del coeficiente A:

$$A=\frac{s\cdot E\cdot a^2\cdot p_1^2}{24\cdot T_1^2}-T_1-\alpha\cdot s\cdot E(\Theta_1-\Theta_2)$$

$$A=\frac{31{,}1\cdot7\,900\cdot100^2\cdot0{,}5869^2}{24\cdot336^2}-336-19{,}1\cdot10^{-6}\cdot31{,}1\cdot7\,900\cdot(-15-50)=281{,}36$$

El valor del coeficiente B:

$$B=\frac{s\cdot E\cdot a^2\cdot p_2^2}{24}=\frac{31{,}1\cdot7\,900\cdot100^2\cdot0{,}1059^2}{24}=1\,148\,069\simeq114{,}8\cdot10^4$$

La ecuación del cambio de condiciones toma la forma $T_2^2(T_2+281{,}36)=114{,}8\cdot10^4$

© Ediciones Paraninfo

Esta ecuación se resuelve por tanteos, siendo la solución con suficiente aproximación $T_2=58,1$ daN.

La flecha con esta tensión en el vano máximo:

$$f_2=\frac{p_2\cdot a^2}{8\cdot T}=\frac{0,1059\cdot 110^2}{8\cdot 58,1}=2,76 \text{ m}$$

e) La parábola de replanteo tiene la ecuación que corresponde con la tensión sin sobrecarga para la flecha máxima.

$$y=\frac{px^2}{2T}=\frac{0,1059x^2}{2\cdot 58,1}=9,11\cdot 10^{-4}x^2$$

3.18-2. Un cable LA 56 en un vano horizontal de 100 m, en una altitud de 400 m sobre el nivel del mar, a la temperatura de 15°C con viento tiene de flecha 1,6 m. Calcular:

a) Peso del conductor con sobrecarga.

b) Tensión del cable.

Solución: a) 0,597 daN/m; b) 466 daN

3.18-3. Calcular la carga unitaria del conductor LA 56, si sometido a una tracción de 456 daN en un vano de 120 m, si la flecha es de 2,4 m.

Solución: 0,608 daN/m.

3.18-4. Un tramo recto de un línea aérea trifásica de 20 kV, 50 Hz, se encuentra situada a una altitud de 1 050 m sobre el nivel del mar. Consta de cuatro vanos, de longitudes: 100-90-110 y 100 m. La línea está formada por cable LA 56 de las siguientes características: sección s=54,6 mm², diámetro 9,45 mm, carga de rotura 1 640 daN, peso 0,1855 daN/m, módulo de elasticidad E=7 900 daN/mm² y coeficiente de dilatación $\alpha=19,1\cdot 10^{-6}$ °C^{-1}.

El tendido de la línea se realiza sin viento y a una temperatura de 30 °C. Calcular:

a) Vano de regulación.

b) Peso con sobrecarga de hielo.

c) Coeficiente de seguridad 3 si el tense máximo a -20 °C es 556 daN.

d) Tense a la temperatura de tendido.

e) Flecha en el vano de regulación.

f) Flecha de tendido en el vano de 110 m.

a) El vano de regulación: $a_r=\sqrt{\frac{\Sigma a^3}{\Sigma a}}=\sqrt{\frac{100^3+110^3+90^3+100^3}{100+110+90+100}}=100,75$ m

b) En la zona C la sobrecarga de hielo $P_h=k\sqrt{d}=0,36\sqrt{9,45}=1,107$ daN/m

La carga del conductor con la sobrecarga debida al hielo:

$$P_T=P_h+P=0,1855+1,107=1,293 \text{ daN/m}$$

c) El coeficiente de seguridad $m=\frac{1\,640}{556}=2,95$

d) El tense a la temperatura de tendido se calcula por la ecuación del cambio de condiciones:

© Ediciones Paraninfo

$$T_2^2(T_2+A)=B$$

El valor del coeficiente A:

$$A=\frac{s\cdot E\cdot a^2\cdot p_1^2}{24\cdot T_1^2}-T_1-\alpha\cdot s\cdot E(\Theta_1-\Theta_2)$$

$$A=\frac{54{,}6\cdot 7\,900\cdot 100{,}75^2\cdot 1{,}293^2}{24\cdot 556^2}-556-19{,}1\cdot 10^{-6}\cdot 54{,}6\cdot 7\,900\cdot(-20-30)=842{,}54$$

El valor del coeficiente B:

$$B=\frac{s\cdot E\cdot a^2\cdot p_2^2}{24}=\frac{54{,}6\cdot 7\,900\cdot 100{,}75^2\cdot 0{,}1855^2}{24}=6\,277\,496\simeq 627{,}75\cdot 10^4$$

La ecuación del cambio de condiciones toma la forma $T_2^2(T_2+842{,}54)=627{,}75\cdot 10^4$

Esta ecuación se resuelve por tanteos, siendo la solución con suficiente aproximación $T_2=82{,}4$ daN.

e) La flecha en el vano de regulación $f_r=\frac{p_2\cdot a_r^2}{8\cdot T_2}=\frac{0{,}1855\cdot 100{,}75^2}{8\cdot 82{,}4}=2{,}86$ m

f) La flecha en el vano de 110 m $f=f_r\cdot\left(\frac{a}{a_r}\right)^2=2{,}86\cdot\left(\frac{110}{100{,}75}\right)^2=3{,}41$ m

3.18-5. Un cable conductor LA 56 en un vano de 110 m, tiene de flecha en tramo horizontal 1,7 m en zona B a 15°C. Calcular:

a) Tensión horizontal si la carga es el propio peso del cable de valor 0,19 daN/m, distribuida según la horizontal.
b) Tensión en un extremo del cable.
c) Sobrecarga por viento a 15°C, siendo el diámetro del cable $d=9{,}45$ mm.
d) Tensión de tendido a 15 °C con viento, siendo para el cable $s=54{,}6$ mm^2, $E=7\,900$ daN/mm^2, $\alpha=19{,}1\cdot 10^{-6}$ °C^{-1}.
e) Flecha a 15 °C con viento.

Solución: a) 169,04 daN; b) 169,4 daN; c) 0,598 daN/m; d) 394,8 daN; e) 2,29 m.

3.18-6. El conductor del problema anterior si halla sometido a sobrecarga por hielo a 0 °C. Calcular:

a) Sobrecarga por hielo.
b) Tensión a 0 °C.
c) Flecha a 0 °C con hielo.

Solución: a) 0,743 daN/m; b) 500 daN; c) 2,25 m.

3.18-7. Un conductor LA 30 en zona A se tiende con EDS 7 en un tramo con vano de regulación 90 m. Calcular:

a) Tensión de tendido a 30 °C.
b) Flecha a esa temperatura en el vano de regulación.

Los datos necesarios del conductor son:

- Carga mínima de rotura del cable: 990 daN.

© Ediciones Paraninfo

- Sección del conductor: 31,1 mm^2
- Diámetro del conductor: 7,14 mm.
- Peso: 105,9 daN/km=0,1059 daN/m.
- Módulo de elasticidad: E=7 900 daN/mm^2.
- Coeficiente de dilatación: $\alpha=19{,}1\cdot10^{-6}$ °C^{-1}.

a) La tensión EDS a 15 °C sin sobrecarga $T_1 = \frac{7}{100}\cdot990 = 69{,}3$ daN

La tensión mecánica a la temperatura de tendido se calcula por la ecuación del cambio de condiciones:

$$T_2^2(T_2+A)=B$$

El valor del coeficiente A:

$$A=\frac{s\cdot E\cdot a^2\cdot p_1^2}{24\cdot T_1^2}-T_1-\alpha\cdot s\cdot E(\Theta_1-\Theta_2)$$

$$A=\frac{31{,}1\cdot7\,900\cdot90^2\cdot0{,}1059^2}{24\cdot69{,}3^2}-69{,}3-19{,}1\cdot10^{-6}\cdot31{,}1\cdot7\,900\cdot(15-50)=288{,}58$$

El valor del coeficiente B:

$$B=\frac{s\cdot E\cdot a^2\cdot p_2^2}{24}=\frac{31{,}1\cdot7\,900\cdot90^2\cdot0{,}1059^2}{24}=929\,936\simeq93\cdot10^4$$

La ecuación del cambio de condiciones toma la forma $T_2^2(T_2+288{,}58)=93\cdot10^4$

Esta ecuación se resuelve por tanteos, siendo la solución con suficiente aproximación $T_2=52{,}2$ daN.

e) La flecha en el vano de regulación $f_r=\frac{p_2\cdot a_r^2}{8\cdot T_2}=\frac{0{,}1059\cdot90^2}{8\cdot52{,}2}=2{,}05$ m

3.19. CÁLCULO DE APOYOS EN LAS LÍNEAS DE M.T.

■ Hipótesis de cálculo

Según el RLAT (ITC-LAT-07) se consideran en el cálculo de apoyos varias hipótesis, según sea necesario considerar la sobrecarga por viento (1ª hipótesis), la sobrecarga por hielo (2ª hipótesis), el desequilibrio de tracciones (3ª hipótesis) o la rotura de conductores (4ª hipótesis).

En las líneas de tensión nominal hasta 66 kV, con cables conductores de aluminio-acero, que tienen carga de rotura inferior a 6 600 daN, se prescinde de la 4ª hipótesis en los apoyos de alineación y de ángulo si se verifican simultáneamente las condiciones siguientes:

- Que los conductores tengan un coeficiente de seguridad mínimo de 3.
- Que el coeficiente de seguridad de los apoyos y cimentaciones en la 3ª hipótesis sea el correspondiente a las hipótesis normales (1ª y 2ª hipótesis).
- Que los apoyos de anclaje se coloquen como máximo cada 3 km.

■ Esfuerzo en punta

Los apoyos a utilizar en las líneas aéreas de M.T. están normalizados y quedan definidos por el esfuerzo nominal y la altura. Como apoyos de alineación se suelen

© Ediciones Paraninfo

utilizar apoyos de hormigón y como apoyos de ángulo, anclaje y final de línea apoyos metálicos.

Si el esfuerzo nominal de un apoyo es F y su altura H, a otra altura h (fig. 3.32) es capaz de soportar un esfuerzo F_1, de forma que:

$$F_1 = \frac{F \cdot H}{h}$$

El cálculo de los apoyos consiste en considerar para cada tipo las hipótesis reglamentarias y hallar el esfuerzo máximo a que van a estar sometidos en la hipótesis más desfavorable. Se elige el apoyo cuyo esfuerzo nominal sea superior a ese esfuerzo máximo útil en punta. El esfuerzo útil necesario depende del tipo de apoyo.

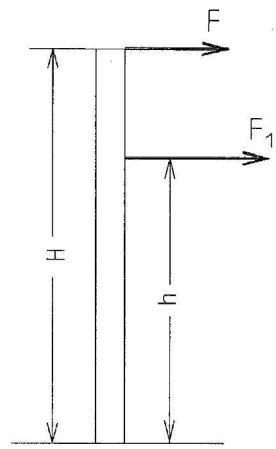


Fig. 3.32

Al proyectar una línea se suelen utilizar los apoyos normalizados por la empresa distribuidora de energía eléctrica propietaria de la línea a la que se efectúa la conexión. Para evitar el mantenimiento y conservación de la nueva línea, ésta se suele ceder a la empresa distribuidora.

3.20. APOYOS DE ALINEACIÓN

Considerando un apoyo de alineación de una línea trifásica con cruceta tipo bóveda (fig. 3.3), la disposición de los conductores es la de los vértices de un triángulo isósceles, siendo h_1 la altura de dos de los puntos de sujeción a la cruceta y h_2 la del vértice superior.

■ **Esfuerzo transversal**

El esfuerzo transversal, perpendicular a la dirección de la línea, que el apoyo soporta, es debido a la acción del viento sobre los conductores, aisladores y sobre el propio apoyo.

Se llama *eolovano* a_e a la semisuma de las longitudes a_1 y a_2 de los vanos que concurren en el apoyo. Éste soporta la acción del viento sobre la suma de los semivanos contiguos:

$$a_e = \frac{1}{2}(a_1 + a_2)$$

La fuerza del viento sobre un conductor en el apoyo $F_v = p_v \cdot a_e \cdot d$

F_v: Fuerza del viento sobre en daN sobre un conductor.

p_v: Presión del viento (daN/m^2).

a_e: Luz del eolovano (m).

d: Diámetro de los conductores (m).

El esfuerzo resultante F_T en punta, despreciando la acción del viento sobre los aisladores y cruceta:

© Ediciones Paraninfo

$$F_T = \frac{F_v(2h_1 + h_2)}{H}$$

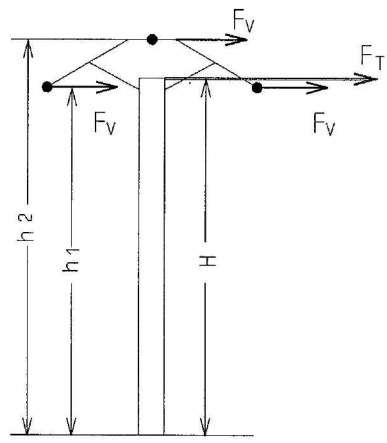


Fig. 3.33

■ **Esfuerzo longitudinal**

El esfuerzo en punta F_L en sentido de la dirección de la línea se calcula considerando el desequilibrio de tracciones reglamentario. Siendo $T_{máx}$ la tensión mecánica máxima del conductor, para cadenas de aislamiento de suspensión:

$$F_L = \frac{8}{100}\frac{T_{máx}(2h_1 + h_2)}{H}$$

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

3.20-1. Un apoyo de alineación con cruceta tipo bóveda tiene vanos contiguos de 100 y 80 m de luz. El apoyo es de hormigón HV 400 R11, con altura de empotramiento 1,4 m. Las alturas del punto de amarre de la cadena de aisladores a la cruceta sobre la cogolla del poste son de 1,15 m y 1,55 m. El conductor es LA 30, de diámetro 7,14 mm. Calcular:

a) Eolovano.
b) Fuerza del viento sobre cada conductor.
c) Esfuerzo en punta en sentido transversal, considerando solamente la fuerza del viento sobre los conductores.
d) Tense máximo con coeficiente de seguridad 3,5, sabiendo que la carga mínima de rotura para el conductor es de 990 daN.
e) Esfuerzo en punta en sentido longitudinal.

a) El eolovano $a_e = \frac{1}{2}(a_1 + a_2) = \frac{80 + 100}{2} = 90$ m

b) La fuerza del viento sobre los conductores:

$$F_v = p_v \cdot a_e \cdot d = 60 \cdot 7{,}14 \cdot 10^{-3} \cdot 90 = 38{,}556 \text{ daN}$$

c) La altura del apoyo sobre el terreno $H = 11 - 1{,}4 = 9{,}6$ m
La altura de los puntos de amarre de las cadenas de aisladores que soportan los conductores:

$$h_1 = H + 1{,}15 = 9{,}6 + 1{,}15 = 10{,}75 \text{ m}$$
$$h_2 = H + 1{,}55 = 9{,}6 + 1{,}55 = 11{,}15 \text{ m}$$

El esfuerzo en punta en sentido transversal:

$$F_T = \frac{F_v(2h_1 + h_2)}{H} = \frac{38{,}556 \cdot (2 \cdot 10{,}75 + 11{,}15)}{9{,}6} = 131{,}1 \text{ daN}$$

d) El tense máximo $T_{máx} = \frac{990}{3{,}5} = 283$ daN

e) El esfuerzo en punta en sentido longitudinal:

$$F_u = \frac{8}{100}\frac{T_{máx}(2h_1 + h_2)}{H} = 0{,}08 \cdot \frac{283 \cdot (2 \cdot 10{,}75 + 11{,}15)}{9{,}6} = 77 \text{ daN}$$

© Ediciones Paraninfo

3.20-2. Calcular el esfuerzo horizontal debido a la acción del viento sobre cada conductor LA 56, en un apoyo que está entre dos vanos de 120 y 130 m de luz.
Solución: 70,875 daN.

3.21. APOYOS EN ÁNGULO

Utilizados para sostener los conductores en los vértices de los cambios de alineación.

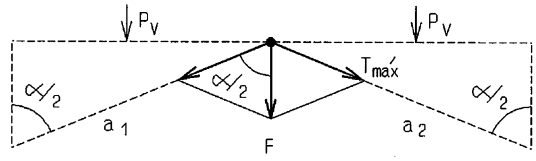


Fig. 3.34

Si el ángulo que forman las alineaciones es α (fig. 3.34), la fuerza máxima (daN) horizontal a soportar por el apoyo considerando las dos tensiones iguales.

$$F=2T_{máx}\cos\frac{\alpha}{2}$$

F: Esfuerzo resultante sobre el apoyo (daN).
$T_{máx}$: Tensión máxima según la hipótesis considerada (daN).
α: Ángulo que forman los vanos que concurren en el apoyo.

■ Esfuerzo transversal

Considerando la acción del viento sobre los conductores de los vanos contiguos y suponiendo la presión del viento en la dirección del esfuerzo resultante:

$$F_v = p_v \cdot \frac{1}{2}(a_1 + a_2)\cdot d \cdot sen\frac{\alpha}{2} = p_v \cdot a_e \cdot d \cdot sen\frac{\alpha}{2}$$

En el apoyo en ángulo suele utilizarse cruceta recta, con lo que el punto de sujeción a la cruceta estará a una altura h.

Esfuerzo en punta en el sentido transversal $F_T = \dfrac{(2T_{máx}\cos\frac{\alpha}{2} + p_v \cdot a_e \cdot d \cdot sen\frac{\alpha}{2})3h}{H}$

■ Esfuerzo longitudinal

Según el desequilibrio de tracciones indicado reglamentariamente, para cruceta recta con cadena de aisladores de amarre (ITC-LAT-07):

$$F_L = \frac{15}{100}\frac{T_{máx}\cdot 3\cdot h}{H}$$

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

3.21-1. Se utiliza como apoyo en ángulo el poste de celosía C-2 000-12, con empotramiento de 1,8 m y cruceta tipo bóveda horizontal. El cable conductor es LA 30 y el cambio de dirección en el ángulo es de 30° (ángulo de la línea 150°). Los vanos contiguos al apoyo son de 80 y 90 m. Calcular:

a) Coeficiente de seguridad, considerando un tense máximo de 330 daN y sabiendo que la carga mínima de rotura del cable es de 990 daN.
b) Esfuerzo resultante sobre el apoyo debido a las tensiones que se consideran iguales a la máxima.

© Ediciones Paraninfo

c) Esfuerzo debido a la acción del viento sobre los conductores, en la dirección de la resultante de las tensiones.
d) Esfuerzo en punta en sentido transversal, considerando la acción del viento sobre los conductores y el esfuerzo resultante de las tensiones. Distancia de la cruceta sobre la punta del poste 1,1 m.
e) Esfuerzo en punta en sentido longitudinal con cadenas de aislamiento de amarre.

a) El coeficiente de seguridad $\frac{990}{330} = 3$

b) El esfuerzo debido a las tensiones de los conductores:

$$F = 2T_{máx}\cos\frac{\alpha}{2} = 2 \cdot 330 \cdot \cos 75° = 170{,}8 \text{ daN}$$

c) El eolovano: $a_e = \frac{1}{2}(a_1 + a_2) = \frac{80 + 90}{2} = 85$ m

El esfuerzo debido a la acción del viento sobre los conductores:

$$F_v = p_v \cdot a_e \cdot d \cdot sen\frac{\alpha}{2} = 60 \cdot 85 \cdot 7{,}14 \cdot 10^{-3} \cdot sen 75° = 35{,}17 \text{ daN}$$

d) La altura del apoyo sobre el terreno $H = 12 - 1{,}8 = 10{,}2$ m
La altura de los puntos de amarre de las cadenas de aisladores que soportan los conductores:

$$h = H + 1{,}11 = 11{,}31 \text{ m}$$

El esfuerzo en punta en sentido transversal:

$$F_T = \frac{(2T_{máx}\cos\frac{\alpha}{2} + p_v \cdot a_e \cdot d \cdot sen\frac{\alpha}{2})3h}{H} = \frac{(170{,}8 + 35{,}17) \cdot 3 \cdot 11{,}31}{10{,}2} = 685{,}15 \text{ daN}$$

e) El esfuerzo en punta en sentido longitudinal:

$$F_L = \frac{15}{100}\frac{T_{máx} 3 \cdot h}{H} = 0{,}15 \cdot \frac{330 \cdot 3 \cdot 11{,}31}{10{,}2} = 164{,}7 \text{ daN}$$

3.21-2. Calcular la fuerza horizontal debido a las tensiones de los cables que debe poder soportar un apoyo en el punto en el que la línea trifásica con conductores LA 56 cambia de dirección con un ángulo de 30 °C. El coeficiente de seguridad utilizado es de 3,5 y la carga de rotura del conductor es de 1 640 daN.
Solución: 727,7 daN.

3.21-3. Una línea de M.T. con conductor La 56 forma un ángulo de 160° en un punto en el que se utiliza un apoyo C-2 000-14, con cruceta recta y empotramiento de 2 m. Los vanos contiguos al apoyo son de 120 y 100 m. Calcular:
a) Esfuerzo en punta en sentido transversal. Se considera la acción del viento sobre los conductores y el esfuerzo resultante de las tensiones. Diámetro del conductor 9,45 mm, carga mínima de rotura 1 640 daN y coeficiente de seguridad 3. La altura de la cruceta sobre el extremo del apoyo es de 1,11 m.
b) Esfuerzo en punta en sentido longitudinal, con cadenas de aislamiento de amarre.
Solución: a) 824 daN; b) 268,76 daN.

© Ediciones Paraninfo

3.22. APOYOS DE ANCLAJE

■ Esfuerzo transversal

Es el mismo que en el apoyo en alineación o en ángulo, según que el apoyo esté en alineación recta o en un cambio de dirección de la línea.

■ Esfuerzo longitudinal

Según el RLAT se considera por desequilibrio de tracciones el 50% de las tracciones unilaterales. Para cruceta recta:

$$F_L = \frac{50}{100}\frac{T_{máx}\cdot 3\cdot h}{H}$$

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

3.22-1. Un apoyo de anclaje en una alineación recta es de celosía de C-2 000-12 con cruceta tipo bóveda recta horizontal y empotramiento 1,8 m. Los vanos contiguos son de 100 y 120 m. El conductor el LA 56 de diámetro 9,45 mm. Calcular:

a) Fuerza del viento sobre cada conductor.

b) Esfuerzo resultante transversal en punta considerando la fuerza del viento sobre los conductores y sabiendo que la cruceta está a una altura de 1,11 m sobre el extremo del apoyo.

c) Esfuerzo en punta en sentido longitudinal considerando una carga mínima de rotura del cable de 1 640 daN y coeficiente de seguridad 3,5.

a) El eolovano $a_e = \frac{1}{2}(a_1 + a_2) = \frac{120 + 100}{2} = 110$ m

El esfuerzo debido a la acción del viento sobre cada conductor:

$$F_v = p_v \cdot a_e \cdot d = 60 \cdot 110 \cdot 9{,}45 \cdot 10^{-3} = 62{,}4 \text{ daN}$$

b) La altura del apoyo sobre el terreno $H = 12 - 1{,}8 = 10{,}2$ m

La altura de los puntos de amarre de las cadenas de aisladores que soportan los conductores:

$$h = H + 1{,}11 = 11{,}31 \text{ m}$$

El esfuerzo en punta en sentido transversal:

$$F_T = \frac{F_v \cdot 3h}{H} = \frac{62{,}4 \cdot 3 \cdot 11{,}31}{10{,}2} = 207{,}6 \text{ daN}$$

c) El tense máximo $T_{máx} = \frac{1640}{3{,}5} = 469$ daN

El esfuerzo en punta en sentido longitudinal:

$$F_L = \frac{50}{100}\frac{T_{máx} 3\cdot h}{H} = 0{,}5 \cdot \frac{469 \cdot 3 \cdot 11{,}31}{10{,}2} = 780 \text{ daN}$$

3.22-2. Calcular el esfuerzo en punta en sentido longitudinal que soporta un apoyo de anclaje en una línea aérea trifásica con 3 conductores LA 110, con cruceta recta a la altura del extremo del apoyo. La carga de rotura del conductor es 4 310 daN y el coeficiente de seguridad utilizado 3.

Solución: 2 155 daN.

© Ediciones Paraninfo

3.23. APOYOS DE FIN DE LÍNEA

Utilizado para poder soportar el tiro de la línea.

■ **Esfuerzo transversal**

Es el mismo que en el apoyo en alineación, teniendo en cuenta que el viento solo actúa sobre uno de los semivanos y que la cruceta suele ser recta.

■ **Esfuerzo longitudinal**

Según el RLAT se considera por desequilibrio de tracciones el 100% de las tracciones unilaterales. Para cruceta recta:

$$F_L = \frac{T_{máx} \cdot 3 \cdot h}{H}$$

La fuerza máxima a soportar por el apoyo se considera el tense máximo de los conductores.

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

3.23-1. En el extremo de un línea con alineación recta de vano de regulación 100 m, se coloca un apoyo de fin de línea C-2 000-12, con cruceta de bóveda recta y empotramiento 2,2 m. El conductor es LA 30 de diámetro 7,14 mm y carga mínima de rotura 990 daN. Calcular:

a) Esfuerzo en punta en sentido transversal, considerando la acción del viento sobre los conductores. Altura de la cruceta sobre el extremo del apoyo 1,1 m.

b) Esfuerzo en punta en sentido longitudinal, considerando la tensión máxima 336 daN.

a) El esfuerzo debido a la acción del viento sobre los conductores en el semivano:

$$F_v = p_v \cdot \frac{a_e}{2} \cdot d = 60 \cdot \frac{100}{2} \cdot 7{,}14 \cdot 10^{-3} = 21{,}42 \text{ daN}$$

La altura del apoyo sobre el terreno $H = 12 - 2{,}2 = 9{,}8$ m

La altura de la cruceta sobre el terreno $h = H + 1{,}1 = 10{,}9$ m

El esfuerzo en punta en sentido transversal:

$$F_T = \frac{F_v \cdot 3h}{H} = \frac{21{,}42 \cdot 3 \cdot 10{,}9}{9{,}8} = 71{,}47 \text{ daN}$$

b) El tense máximo $T_{máx} = 336$ daN

El esfuerzo en punta en sentido longitudinal:

$$F_L = \frac{T_{máx} 3 \cdot h}{H} = \frac{336 \cdot 3 \cdot 10{,}9}{9{,}8} = 1\,121{,}14 \text{ daN}$$

3.23-2. Calcular la fuerza máxima en sentido longitudinal que debe poder soportar un apoyo de fin de línea, con cruceta recta situada a la altura del extremo del apoyo, para una línea trifásica a 20 kV con conductores LA 56, utilizando un coeficiente de seguridad de 3,5. La carga mínima de rotura del cable conductor es 1 640 daN.

Solución: 1 406 daN.

© Ediciones Paraninfo

3.24. CARGAS VERTICALES SOBRE LOS APOYOS

Sobre los apoyos actúan verticalmente además de su propio peso, el de conductores, aisladores y crucetas.

El esfuerzo vertical que los conductores transmiten al apoyo se calcula por el *gravivano*.

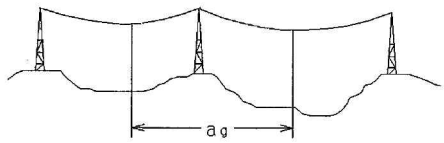


Fig. 3.35

Se llama *gravivano* a la longitud a_g que hay que considerar para determinar las cargas verticales que le transmiten los conductores al apoyo. Esta longitud es la distancia horizontal entre los puntos vértices de las curvas (catenarias) que forman los conductores del los vanos contiguos al apoyo considerado, como indica la figura 3.35.

En las líneas de B.T y M.T. no se suelen calcular las cargas verticales sobre los apoyos, porque éstos resisten, trabajando a compresión, cargas mucho más grandes que las que se originan en la línea.

3.25. DISTANCIAS DE SEGURIDAD

Las distancias se calculan según el RLAT:

1) *Distancias de los conductores al terreno* (ITC-LAT-07). Es la mínima altura h_{min} en metros que corresponde a la máxima flecha:

$$h_{mín}=5{,}3+Del$$

D_{el}: Distancia mínima de aislamiento en el aire (0,22 m, para tensión más elevada de la red 24 kV).

La altura mínima es de 6 m. En lugares de difícil acceso esta altura puede ser reducida en un metro. Esta distancia afecta a la altura del apoyo.

2) *Distancia de los conductores entre sí* (ITC-LAT-07).

La separación mínima entre conductores $D_{mín} = k\sqrt{f_{máx} + L_{cad}} + k' D_{pp}$

$D_{mín}$: Distancia entre conductores (m).

$f_{máx}$: Flecha máxima (m).

L_{cad}: Longitud de la cadena de suspensión en metros. En cadenas de amarre o en aisladores rígidos $L_{cad}=0$.

D_{pp}: Distancia mínima de aislamiento en el aire (0,25 m, para tensión más elevada de la red 24 kV).

k: Coeficiente que depende de la oscilación de los conductores con el viento. Para tensión nominal menor o igual a 30 kV, valor máximo $k= 0{,}65$.

Esta distancia afecta a las dimensiones de la cruceta.

k´: Coeficiente de la tensión de la línea, $k'=0{,}75$ para categoría no especial.

3) *Distancia entre los conductores y los apoyos* (ITC-LAT-07).

La distancia mínima $d_{mín}$ (m) entre los conductores y los apoyos: $d_{mím}=D_{del}$

© Ediciones Paraninfo

Con un mínimo de 0,2 m. En el caso de cadenas de suspensión se debe calcular la distancia con la oscilación de la cadena; pero escogiendo crucetas normalizadas por la empresa distribuidora se cumple la distancia mínima.

4) *Distancias en cruzamientos* (ITC-LAT-07), para tensión nominal hasta 45 kV.
   - Con líneas eléctricas y de telecomunicación (mínimo 2 m): $1{,}5+D_{el}$
   - Con carreteras y ferrocarriles sin electrificar (mínimo 7 m): $6{,}3+D_{el}$
   - Con ferrocarriles electrificados, tranvías o trolebuses (mínimo 4 m): $3{,}5+D_{el}$
   - Con teleféricos y cables transportadores (mínimo 5 m): $4{,}5+D_{el}$
   - Con ríos y canales: Gálibo $+2{,}3+D_{el}$
5) *Distancias en paso por zonas* (ITC-LAT-07).
   - Con bosques, árboles y masas de arbolado (mínimo 2 m): $1{,}5+D_{el}$
   - Con edificios, construcciones y zonas urbanas (mínimo 5 m): $3{,}3+D_{el}$

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

3.25-1. Una línea eléctrica de 20 kV, 50 Hz, discurre por una zona de altitud 800 m, con conductor LA 56. Calcular:

a) Distancia mínima de los conductores al terreno.
b) Distancia mínima de los conductores entre sí en apoyos de alineación, de longitud de la cadena de aisladores 0,6 m y flecha máxima 3,1 m.
c) Distancia mínima entre los conductores y el apoyo.

a) La distancia mínima al terreno:

$$h_{mín} = 5{,}3 + D_{el} = 5{,}3 + 0{,}22 = 5{,}52 \text{ m}$$

Se escoge como altura mínima sobre el terreno de 6 m.

b) La distancia mínima entre conductores:

$$D_{mín} = k\sqrt{f_{máx} + L_{cad}} + k' D_{pp} = 0{,}65\sqrt{3{,}1 + 0{,}6} + 0{,}75 \cdot 0{,}25 = 1{,}44 \text{ m}$$

c) La distancia mínima de los conductores al apoyo:

$$d_{mín} = D_{el} = 0{,}22 \text{ m}$$

3.25-2. Calcular la distancia mínima entre conductores en un apoyo de amarre de una línea aérea de 20 kV, con conductor LA 56 y flecha máxima 3,1 m.

Solución: 1,33 m.

3.26. CABLES AISLADOS DE ALUMINIO TRENZADOS EN HAZ UTILIZADOS EN LAS LÍNEAS AÉREAS DE BAJA TENSIÓN

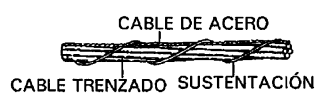


Fig. 3.36

Los cables más utilizados en las líneas de distribución de baja tensión son los cables de aluminio trenzados en haz, en línea tensada (con el neutro de aleación de aluminio), sobre fiador independiente de acero galvanizado (fig. 3.36) o línea posada (fig. 3.37). La acometida suele ser tensada y posada sobre fachada (fig. 3.38). Sección mínima 16 mm^2 (ITC-BT-06).

© Ediciones Paraninfo

■ **Designación**

Este tipo de cables, se designan por la letra R (aislamiento de polietileno reticulado), Z (cable trenzado en haz), seguida de la tensión nominal 0,6/1kV (tensión a tierra/tensión entre conductores de fase) y, a continuación, el número de conductores por la sección nominal de los conductores de fase; (si hay conductor neutro de sección reducida se indica ésta después del signo /). Cumplirán la norma UNE 21030.

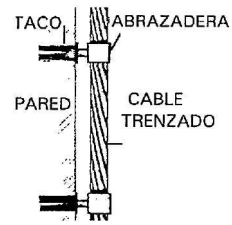


Fig. 3.37

Así, el conductor RZ 0,6/1 kV 3×95 Al /54,6 Alm; significa: conductor aislado con polietileno reticulado, trenzado en haz, de tensión nominal de aislamiento 0,6/1 kV, tres conductores de fase de aluminio de 95 mm² cada uno y un conductor neutro, que sirve de fiador, de sección 54,6 mm² de aleación de aluminio (Almelec).

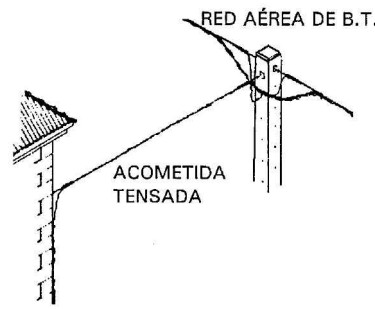


Fig. 3.38

■ **Características**

Los conductores más utilizados son de aluminio y algunas de sus características son las que se indican en el cuadro siguiente:

Tabla 3.10

Características	Cable RZ 0,6/1 kV			
	3×25/54,6 Alm	3×50/54,6 Alm	3×95/54,6 Alm	3×150/80 Alm
Sección conductor de fase mm².	25	50	95	150
Carga mínima de rotura daN.	300	600	1140	1800
Peso daN/m.	0,57	0,77	1, 32	1,698
Intensidad admisible a 40 °C A.	100	150	230	301
Intensidad de cortocircuito admisible para una duración de 0,5 s, (kA).	3,3	6,6	12,5	19,8
Resistencia a 20 °C Ω/km.	1,20	0,64	0,32	0,206

Las características del neutro fiador de almelec son: sección 54,6 mm², resistencia a 20 °C 0,63 Ω/km y carga de rotura 1 660 daN.

3.27. SUJECIONES Y ACCESORIOS EN LAS LÍNEAS AÉREAS DE BAJA TENSIÓN

■ **Sujeción**

Las líneas de B.T. con conductores RZ se sujetan mediante:

- Conjuntos soporte de alineación, con portante de neutro fiador (fig. 3.39) o con suspensión preformada para cable fiador de acero (fig. 3.40). La suspensión preformada para cable fiador de acero (de diámetro 6 mm) se hace con varillas de acero galvanizado. Para neutro fiador la suspensión se hace con varillas de acero aluminizado, recubiertas de aislante neopreno.

© Ediciones Paraninfo

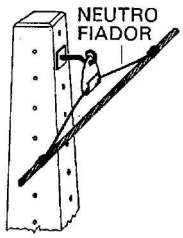


Fig. 3.39

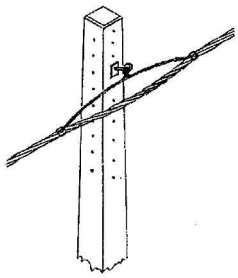


Fig. 3.40

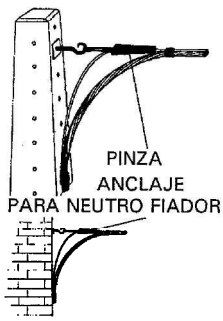


Fig. 3.41

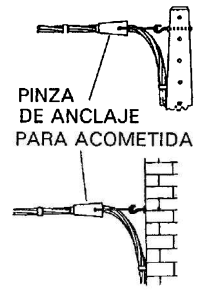


Fig. 3.42

- Conjuntos de amarre, para poste o pared. Son de diversos tipos. En la figura 3.41 se representa el conjunto de amarre con pinza anclaje para neutro fiador. La pinza de anclaje es de acero y aleación de aluminio, con las mordazas de plástico (poliamida) El amarre de acometidas se realiza con pinza de anclaje para acometidas (fig. 3.42).

■ **Protección de paso aéreo a subterráneo**

En líneas de B.T. y acometidas en poste o fachada se realiza con tubo plástico rígido, hasta una altura de unos 3 m, con capuchón de protección.

3.28. EMPALMES Y CONEXIONES

Se utilizan varios procedimientos:

a) Unión por soldadura.
b) Unión por compresión mecánica, mediante tornillos.
c) Unión por engastado (punzonado o compresión).



Fig. 3.43

3.29. EMPALMES Y DERIVACIONES EN LAS LÍNEAS AÉREAS DE BAJA TENSIÓN

Según la instrucción ITC-BT-06, los empalmes y conexiones de conductores aislados se realizarán con accesorios adecuados resistentes a la intemperie. Las derivaciones se realizarán en la proximidad de los soportes de la línea y no originarán tracción mecánica sobre la misma.

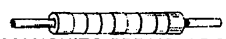


Fig. 3.44

Los empalmes en las líneas aérea de baja tensión con conductores de aluminio trenzados en haz utilizan manguitos de aleación de aluminio para empalme por compresión mediante punzonado (fig. 3.43), con grasa neutra y cinta aislante selladora. El empalme puede ser para conductores de igual o de distinta sección.

El empalme a plena tracción del neutro, que hace de cable fiador y soporta el peso del cable, se realiza mediante un manguito de aleación de aluminio preaislado para empalme a plena tracción por compresión (fig. 3.44).

© Ediciones Paraninfo

Las derivaciones en las líneas aéreas de baja tensión, con conductores de aluminio trenzados en haz se realizan de varias formas:

- Cuña a presión, de aleación de aluminio (fig. 3.45).
- Conector por compresión, de aleación de aluminio (fig. 3.46).
- Grapas de aleación de aluminio (fig. 3.47).

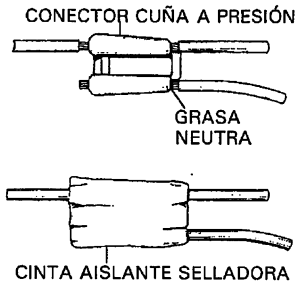


Fig. 3.45

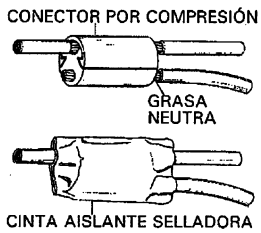


Fig. 3.46

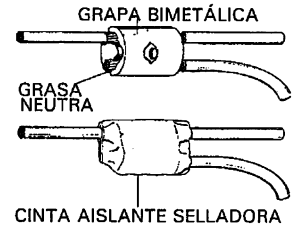


Fig. 3.47

Para la realización de estas derivaciones se utiliza grasa neutra y cinta aislante selladora.

3.30. DERIVACIONES PARA ACOMETIDAS

En las derivaciones para acometidas aéreas, además de grapas de derivación se utilizan conectores de perforación (fig. 3.48), de aleación de aluminio. Para derivaciones a varias acometidas se utiliza caja derivación exterior de poliéster reforzado con fibra de vidrio (fig. 3.49).

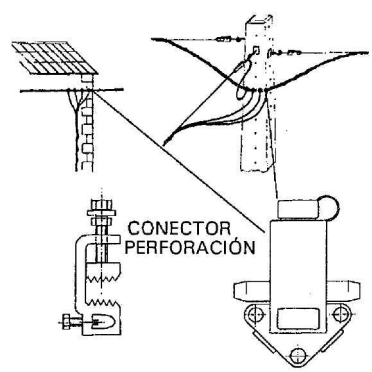


Fig. 3.48

Las acometidas de las líneas de B.T. terminan en las *cajas generales de protección*, de material plástico con fusibles. De estas cajas parte la línea repartidora.

- Designación. Según las letras CGP, seguidas de dos números. El primero indica el esquema eléctrico (fig. 3.50) y el segundo indica la intensidad nominal de la base de los fusibles.
- Constitución: Las cajas generales de protección son de material aislante y autoextinguible con cierre y precintado, las entradas y salidas para instalación a intemperie se realizan por la parte inferior. El neutro es seccionable mediante pletina y los fusibles, que se utilizan para los

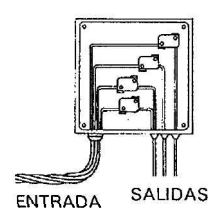


Fig. 3.49

© Ediciones Paraninfo

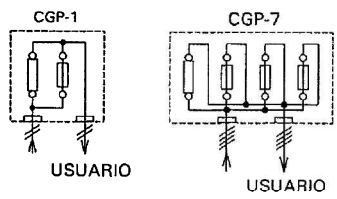


Fig. 3.50

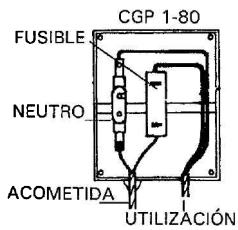


Fig. 3.51

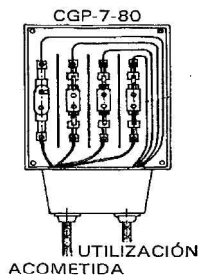


Fig. 3.52

conductores de fase, son cilíndricos para bases de intensidad nominal 40 y 80 A, y de cuchilla para intensidad nominal de 100, 160, 250 y 400 A. Los bornes de conexión son bimetálicos, para conectar conductores de cobre o de aluminio. Las cajas pueden ir montadas en el exterior, con grado de protección IP437 y en el interior con grado de protección IP417. Cada caja tiene una placa identificativa, con el nombre del fabricante, la intensidad y la tensión nominal (440 V), designación, año de fabricación y referencia del fabricante.

- Según la conexión las cajas generales de protección pueden ser monofásicas (fig. 3.51), trifásicas (fig. 3.52) y trifásicas con varias salidas.

3.31. TOMAS DE TIERRA EN LAS LÍNEAS DE B.T.

El neutro se debe conectar a tierra como mínimo cada 500 m (ITC-BT-06) a lo largo de la red. Se suele conectar la toma de tierra en los puntos de derivación y los últimos 200 m de cada derivación.

3.32. CÁLCULO ELÉCTRICO EN LAS LÍNEAS DE DISTRIBUCIÓN EN BAJA TENSIÓN

En el cálculo eléctrico, se suele tener en cuenta solamente la resistencia de los conductores. Para mayor exactitud en los cálculos, en líneas largas se ha de tener en cuenta la reactancia (aproximadamente 0,1 Ω/km). Las líneas de distribución aéreas con conductores trenzados en haz se calculan teniendo en cuenta consumos equilibrados. En caso de desequilibrio se considera para el cálculo el consumo de la fase más cargada como consumo de todas las fases, con lo que la sección está calculada por exceso; pero eso permite que la línea soporte futuras ampliaciones.

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

3.32-1. Se proyecta una red aérea de distribución en B.T. a 400/230 V, para electrificación rural con conductores trenzados en haz, del tipo RZ 0,6/1 kV 3x95 Al+54,6 Alm; RZ 0,6/1 kV 3x25 Al+54,6 Alm y RZ 0,6/1 kV 3x50 Al+54,6 Alm, con apoyos de alineación tipo HV-250-R-11; apoyos en ángulo y fin de línea HV-630-R-11. Vano medio 45 m. La excavación de la cimentación será de 1,6 m de altura. Los cables serán

© Ediciones Paraninfo

amarrados en todos los apoyos. El conductor neutro se conectará a tierra en el primer apoyo de la salida del transformador. La toma de tierra del neutro se realiza, mediante conector bimetálico (Cu-Al), con cable RV 0,6/1 kV 50 mm² de cobre, bajo tubo rígido de PVC de diámetro 50 mm. El cable de tierra es de cobre sin aislamiento, de sección 50 mm²; conectado, mediante soldadura de alto punto de fusión, a pica difusora de acero cobreado de diámetro 14 mm.

El esquema unifilar es el representado en la figura 3.53. Se ha considerado para cada abonado una potencia de 6,9 kW trifásica. Calcular la caída de tensión en los distintos tramos según la tabla:

TRAMO	MOMENTO	Nº ABONADOS	CONDUCTOR	CAÍDA DE TENSIÓN PARCIAL	CAÍDA DE TENSIÓN TOTAL

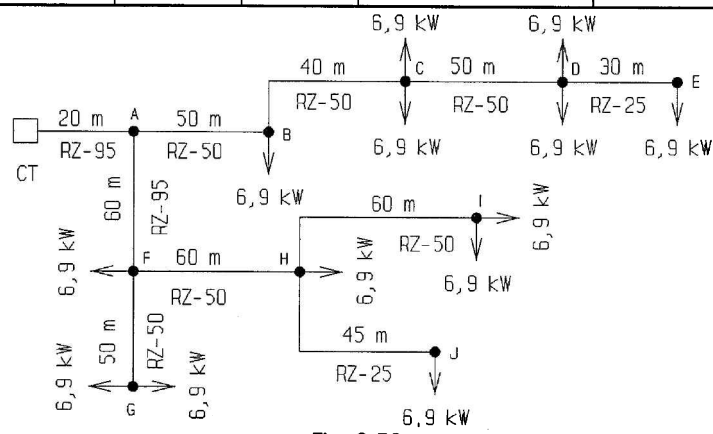


Fig. 3.53

Se calcula cada tramo de forma independiente, teniendo en cuenta la carga que soporta, por la fórmula:

$$u = \frac{LP}{csV_L}$$

La tensión de línea $V_L = 400$ V y la conductividad para el aluminio $c = 35 \dfrac{\text{m}}{\Omega\,\text{mm}^2}$

La caída de tensión se puede calcular también directamente en tanto por cien, con la longitud en km y la potencia en kW, según la fórmula, deducida en el capítulo anterior, epígrafe 2.9:

$$u\% = \frac{10^8}{cV_L^2} \cdot \frac{LP}{s} = \frac{10^8}{35 \cdot 400^2} \cdot \frac{LP}{s} = 17{,}9 \cdot \frac{LP}{s}$$

Para el momento del tramo CT-A, con toda la potencia de la instalación;
$P = 13 \cdot 6{,}9 = 89{,}7$ kW. La longitud $L = 20$ m $= 0{,}02$ km.
El momento $LP = 0{,}02 \cdot 89{,}7 = 1{,}794$ km·kW

La caída de tensión parcial en el tramo $u\% = 17{,}9 \cdot \dfrac{LP}{s} = 17{,}9 \dfrac{1{,}794}{95} = 0{,}34\%$

La caída de tensión total en un punto se obtiene sumando las caídas de tensión parciales en los distintos tramas, desde CT hasta el punto. Así se indica en la tabla:

© Ediciones Paraninfo

Tabla 3.11

TRAMO	MOMENTO km·kW	Nº ABONADOS	CONDUCTOR	CAÍDA DE TENSIÓN PARCIAL %	CAÍDA DE TENSIÓN TOTAL %
CT-A	1,794	13	RZ 95	0,34	0,34
A-B	2,07	6	RZ 50	0,74	1,08
B-C	1,38	5	RZ 50	0,49	1,57
C-D	1,035	3	RZ 50	0,37	1,94
D-E	0,207	1	RZ 25	0,15	2,09
A-F	2,898	7	RZ 95	0,55	0,89
F-G	0,69	2	RZ 50	0,25	1,14
F-H	1,656	4	RZ 50	0,59	1,48
H-I	0,828	2	RZ 50	0,30	1,78
H-J	0,31	1	RZ 25	0,22	1,7

3.32-2. La línea aérea de la figura 3.54 está construida con conductores de aluminio trenzados en haz con las secciones indicadas. Se considera un consumo trifásico equilibrado. La tensión es de 400/230 V, 50 Hz. Calcular la caída de tensión en los puntos G, D, F y E.

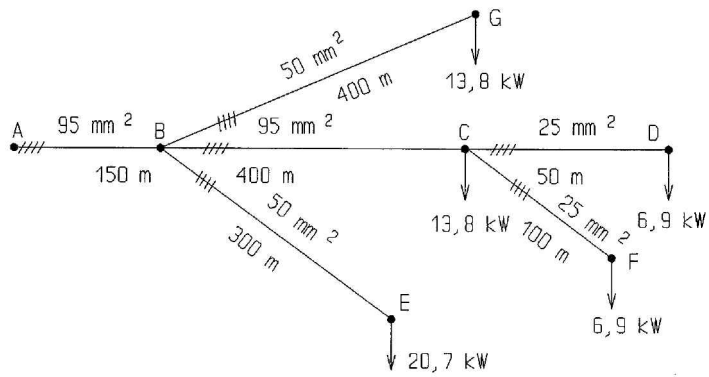


Fig. 3.54

Solución: $u_{AG}=3,74\%$; $u_{AD}=4,09\%$; $u_{AF}=4,33\%$; $u_{AE}=3,98\%$

3.33. CÁLCULO MECÁNICO DE CABLES AISLADOS DE ALUMINIO TRENZADOS EN HAZ EN LÍNEAS AÉREAS DE BAJA TENSIÓN

■ Conductores

Los conductores RZ 0,6/1 kV, normalizados para líneas de distribución en B.T. con conductores trenzados, según el proyecto tipo UNESA, se indican en la tabla:

Tabla 3.12

Denominación	3x25/54,6 Alm	3x50/54,6 Alm	3x95/54,6 Alm	3x150/95 Al+22 Ac
Diámetro del haz (mm)	31,09	36,85	45,05	47,44
Peso (kp/m)	0,585	0,810	1,320	2,202

A efectos de cálculo se considera como diámetro del haz, 2,5 veces el diámetro del conductor de fase (ITC-BT-06). Con los valores indicados por la norma UNE 21030, el diámetro del haz resulta ligeramente inferior al del proyecto UNESA.

© Ediciones Paraninfo

Las características de mecánicas de los fiadores se indican en la tabla 3.13.

Tabla 3.13

Material	Sección nominal (mm^2)	Carga de rotura (daN)	Coeficiente de dilatación lineal ($°C^{-1}$)	Módulo de elasticidad (daN/mm^2)
Almelec	54,6	1 660	$23 \cdot 10^{-6}$	6 200
Almelec	80	2 000	$23 \cdot 10^{-6}$	6200
Acero	22 ·	2800	11,5	18500

▪ Hipótesis de cálculo

Como tensión máxima del haz en las condiciones más desfavorables se escoge un coeficiente de seguridad mínimo de 2,5, con lo que será como máximo 664 daN para el neutro de almelec y de 1 120 daN para el fiador de acero, para las hipótesis más desfavorables de la tabla siguiente, según la instrucción ITC-BT-06:

Tabla 3.14

Condición	Zona A (Altitud < 500 m)		Zona B (Altitud entre 500 y 1 000 m)		Zona C (Altitud > 1 000 m)	
	Temperatura	Sobrecarga (daN/m)	Temperatura	Sobrecarga (daN/m)	Temperatura	Sobrecarga (daN/m)
Máxima tensión	15 °C	Viento de 50	15 °C	Viento de 50	15 °C	Viento de 50
	0 °C	Viento de 50/3	0 °C	Hielo de $0{,}06\sqrt{d}$	0 °C	Hielo de $0{,}12\sqrt{d}$

▪ Sobrecargas

Las sobrecargas se calculan según la altitud del terreno donde se sitúa la línea:

1) Zona A (viento).

Se calcula la sobrecarga por viento $P_v = p_v \cdot d$ (daN/m)

p_v: Presión del viento (daN/m^2): 50 daN/m^2 a 15 °C o 50/3 daN/m^2 a 0 °C

d: Diámetro del haz de conductores (m)

El peso del conductor con sobrecarga $P_T = \sqrt{P_v^2 + P^2}$ (daN/m)

Siendo P: Peso del conductor (daN/m).

2) Zona B y C (Hielo).

Se calcula la sobrecarga por hielo $P_h = k\sqrt{d}$ (daN/m)

d: Diámetro del haz de conductores (mm)

k: Constante, de valor 0,06 en zona B y 0,12 en zona C.

El peso con sobrecarga de hielo $P_T = P_h + P$ (daN/m)

▪ Flecha máxima

Según el Reglamento electrotécnico para baja tensión (ITC-BT-06), la flecha máxima de los conductores se calcula según las siguiente hipótesis:

a) Mayor valor resultante de la comparación de las dos hipótesis según la zona.

b) Hipótesis de temperatura (válida para las tres zonas), considerando los conductores sometidos a la acción de su propio peso a la temperatura máxima previsible (no inferior a 50°C), teniendo en cuenta las condiciones climatológicas y de servicio de la línea.

© Ediciones Paraninfo

■ Tablas de tendido

Las tablas de tenses y flechas de tendido según los vanos y el conductor se realizan aplicando los valores correspondientes de las diversas hipótesis a la ecuación del cambio de condiciones. En la siguiente tabla se representa la tabla de tendido para conductor RZ 0,6/1 kV 3x95 Al/54,6 Alm, según proyecto UNESA, para una tensión máxima en zona A de 315 daN, con vanos y flechas en metros.

Tabla 3.15. Tabla de tendido para conductor RZ 0,6/1 kV 3x95 Al/54,6 Alm con tense máximo 315 daN

Vanos	Tensiones máximas				Tabla de tendido															
	15 °C + v		0 °C + v/3		0 °C		5 °C		10 °C		15 °C		20 °C		30 °C		40 °C		50 °C	
	T	f	T	f	T	f	T	f	T	f	T	f	T	f	T	f	T	f	T	f
10	284	0,11	315	0,06	308	0,05	275	0,06	244	0,07	216	0,08	191	0,09	152	0,11	125	0,13	106	0,16
15	315	0,23	297	0,14	282	0,13	257	0,14	235	0,16	215	0,17	198	0,19	170	0,22	149	0,25	133	0,28
20	315	0,41	250	0,30	229	0,29	215	0,31	203	0,33	192	0,34	182	0,36	166	0,39	152	0,43	142	0,47
25	315	0,65	225	0,53	202	0,51	194	0,53	187	0,55	180	0,57	174	0,59	164	0,63	155	0,67	147	0,70
30	315	0,93	212	0,81	187	0,79	182	0,81	178	0,83	174	0,86	170	0,88	162	0,91	156	0,95	150	0,99
35	315	1,27	204	1,14	179	1,13	176	1,15	173	1,17	170	1,19	167	1,21	162	1,25	157	1,29	152	1,33
40	315	1,66	199	1,53	174	1,52	172	1,54	169	1,56	167	1,58	165	1,60	161	1,64	157	1,68	154	1,72
50	315	2,59	193	2,46	169	2,45	167	2,47	166	2,49	164	2,51	163	2,53	160	2,57	158	2,61	156	2,65
60	315	3,65	190	3,60	166	3,59	165	3,61	164	3,63	163	3,65	162	3,67	160	3,71	158	3,75	157	3,79
70	315	5,08	188	4,95	164	4,93	163	4,95	163	4,97	162	5,00	161	5,02	160	5,06	159	5,10	157	5,14
80	315	6,63	187	6,50	163	6,49	162	6,51	162	6,53	161	6,55	161	6,57	160	6,61	159	6,65	158	6,69

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

3.33-1. Calcular el peso del conductor con sobrecarga a 15 °C en un cable RZ 0,6/1 kV 3×50 Al/54,6 Alm en una instalación a 300 m sobre el nivel del mar. Diámetro máximo del conductor aislado, según UNE 21030, 12,3 mm.

La sobrecarga debida al viento $P_v = p_v \cdot d = 50 \cdot 2{,}5 \cdot 0{,}0123 = 1{,}5375$ daN/m

El peso del conductor con sobrecarga:

$$P_T = \sqrt{P_v^2 + P^2} = \sqrt{1{,}5375^2 + 0{,}810^2} = 1{,}7378 \text{ daN/m}$$

3.33-2. Calcular el peso del cable RZ 0,6/1 kV 3x95 Al/54,6 Alm en una instalación aérea en una zona situada a 600 m sobre el nivel del mar, teniendo en cuenta la sobrecarga por hielo. Diámetro máximo del conductor aislado, según UNE 21030, 16,1 mm.

Solución: 1,7 daN/m.

3.33-3. La tensión de tendido en un vano horizontal de 40 m con cable de aluminio trenzado en haz RZ 0,6/1 kV 3×95 Al/54,6 Alm es de 167 daN. Calcular la flecha.

La flecha en tramo horizontal $f = \dfrac{p \cdot a^2}{8 \cdot T} = \dfrac{1{,}32 \cdot 40^2}{8 \cdot 167} = 1{,}58$ m

© Ediciones Paraninfo

3.33-4. Observada la flecha en un tramo horizontal de 35 m a 15 °C en una zona situada a 700 m sobre el nivel de mar, con cable RZ 0,6/1 kV 3×50 Al/54,6 Alm, resulta ser de 0,88 m. Calcular la tensión de tendido.

Solución: 141 daN.

3.34. CÁLCULO DE LOS APOYOS EN LÍNEAS AÉREAS DE BAJA TENSIÓN

La resistencia mecánica del apoyo está dada por la fuerza horizontal "esfuerzo útil" que es capaz de resistir aplicada al punto de instalación de amarre, con el coeficiente de seguridad reglamentario y deducida la fuerza de la presión del viento sobre el propio apoyo.

Los apoyos, que generalmente están normalizados, quedan definidos por el esfuerzo nominal o "esfuerzo libre en punta" y el esfuerzo secundario, además de la altura.

Se utilizan en B.T. postes de hormigón armado vibrado. De forma excepcional se utilizan en B.T. apoyos metálicos galvanizados.

■ Altura del apoyo

Las alturas de los apoyos se fijan teniendo en cuenta la topografía del terreno y las flechas según los vanos. La longitud total del apoyo se fija después de definida la altura libre necesaria y la cimentación, según los esfuerzos a que está sometido.

■ Esfuerzos que actúan sobre los apoyos

El REBT indica las hipótesis a tener en cuenta para el cálculo mecánico de apoyos (ITC-BT-06).

Para conductores RZ sobre apoyos de hormigón, donde los vanos son cortos y la sujeción al apoyo muy simple, se puede prescindir, por su poca influencia, de las cargas verticales y de las diferencias de tenses (según proyecto UNESA).

- *Apoyos de alineación.* Se tiene en cuenta la sobrecarga de 50 daN/m^2, debido a la presión del viento sobre el cable, considerando la semisuma de los vanos.
- *Apoyos de ángulo.* Considerando iguales las tensiones en los dos lados del apoyo, la resultante de estas tensiones en el plano horizontal produce un esfuerzo resultante sobre el apoyo (fig. 3.55).

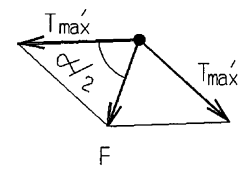


Fig. 3.55

El esfuerzo resultante se calcula según la fórmula: $F=2T_{máx}\cos\frac{\alpha}{2}$

F: Esfuerzo resultante sobre el apoyo (daN).

$T_{máx}$: Tensión máxima según la hipótesis considerada (daN).

α: Ángulo que forman los vanos que concurren en el apoyo.

Este esfuerzo se incrementa si se considera la acción del viento sobre los semivanos contiguos al apoyo.

© Ediciones Paraninfo

- *Apoyos de fin de línea.* Se tiene en cuenta el tense máximo elegido para el cable y el esfuerzo útil mínimo del apoyo se determina en función de este tense:

$$F = T_{máx}$$

- *Apoyos de derivación.* El esfuerzo útil se calcula hallando la resultante de las tensiones de los cables que se amarran al apoyo. Si se considera la presión del viento sobre los semivanos que concurren en el apoyo, este esfuerzo hay que componerlo con la resultante de las tensiones del cable.

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

3.34-1. Calcular la fuerza resultante sobre un apoyo en el que una línea con cable RZ 0,6/1 kV 3×50 Al/54,6 Alm, forma una ángulo de 130°. En la línea se considera un tense máximo de 315 daN y se desprecia la acción del viento sobre el cable.

La fuerza resultante $F = 2T_{máx}\cos\frac{\alpha}{2} = 2 \cdot 315 \cdot \cos 65° = 266$ daN

3.34-2. Calcular el esfuerzo útil mínimo del apoyo de final de línea para cable RZ 0,6/1 kV 3×95 Al/54,6 Alm, si el tendido se realiza admitiendo el tense máximo con el coeficiente de seguridad 5.

Solución: 332 daN.

3.35. CRUZAMIENTOS, PROXIMIDADES Y PARALELISMOS EN LAS LÍNEAS DE B.T.

Las líneas deben cumplir las condiciones marcadas por la instrucción ITC-BT-06 y las disposiciones legales que otros organismos competentes pueden imponer cuando sus instalaciones quedan afectadas por las líneas eléctricas.

En el cruzamiento con la línea aérea de A.T. la línea de B.T. debe pasar por debajo, con una distancia mínima vertical D en metros entre conductores de:

$$D = 1{,}5 + \frac{U + L_1 + L_2}{100}$$

U: Tensión nominal de la línea de A.T. (kV).

L_1: Distancia horizontal entre el punto de cruce y el apoyo más próximo de la línea de A.T. (m).

L_2: Distancia horizontal entre el punto de cruce y el apoyo más próximo de la línea de B.T. (m).

En vías con circulación rodada la distancia mínima del suelo a la línea es de 6 m y de 4 m en los demás casos (para conductores aislados).

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

3.35-1. Calcular la distancia entre una línea de B.T. y una línea de M.T. de 20 kV, si la distancia entre el punto de cruce y el apoyo más próximo de B.T. es de 10 m y con el apoyo más próximo de A.T. es de 40 m.

La distancia $D = 1{,}5 + \frac{U + L_1 + L_2}{100} = 1{,}5 + \frac{20 + 40 + 10}{100} = 2{,}2$ m

© Ediciones Paraninfo

3.34-2. Una línea aérea de 400/230 V se cruza con otra de 20 kV en un punto en el que el apoyo más próximo de la línea de M.T. está a 50 m y el de la línea de B.T. a 15 m. Calcular la distancia mínima entre las dos líneas.

Solución: 2,35 m

3.36. CIMENTACIONES

Sobre al apoyo actúan fuerzas exteriores que tienden a volcarlo. Este momento de vuelco está contrarrestado por las fuerzas estabilizadoras que el terreno transmite al apoyo empotrado, originando un momento estabilizador.

La cimentación de los apoyos de hormigón y metálicos, se realiza mediante un macizo de hormigón de forma prismática y sección cuadrada (fig. 3.56).

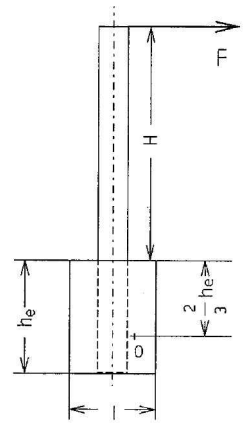


Fig. 3.56

- La *altura mínima de empotramiento* suele calcularse:

$$h_e = \frac{H_t}{15} + 0{,}5$$

h_e: Altura de empotramiento (m).

H_t: altura total del poste (m).

- El *momento de vuelco* M_v (m·kN), aplicado al punto O de giro del macizo viene dado por:

$$M_v = F\left(H + \frac{2}{3}h_e\right)$$

F: Fuerza en la cogolla del apoyo en kiloNewton (kN).

H: Altura útil del apoyo (m).

h_e: Profundidad de empotramiento (m).

- El *momento estabilizador* es el resultado del momento estabilizador del terreno y del bloque de hormigón que forma el empotramiento M_0, además del momento estabilizador del las cargas verticales M_b.

El momento estabilizador del terreno y del bloque de hormigón M_0, en metros·kiloNewton (m.kN), por el método suizo:

$$M_0 = 1{,}39 \cdot K_T \cdot l \cdot h_e^4 + 8{,}8 \cdot l^3 \cdot h_e$$

K_T: Coeficiente de compresibilidad del terreno a la profundidad de 2 m en daN/cm^3, según la clase de terreno en daN/cm^3 (ITC-LAT-07, tabla 10).

l: Lado de la base de hormigón (m).

El momento estabilizador M_b (m.kN), de las cargas verticales:

$$M_b = 0{,}4 \cdot p_c \cdot l$$

p_c: Peso del apoyo, cruceta, aisladores y conductor en kN.

El momento de vuelco debe ser menor que el momento estabilizador total. Con un coeficiente de seguridad mínima 1,5 para hipótesis normales, (RLAT, ITC-LAT-07), se verifica:

$$\frac{M_0 + M_b}{M_v} \geq 1{,}5$$

© Ediciones Paraninfo

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

3.36-1. En una línea de M.T. se utiliza como apoyo de alineación el poste de hormigón HV-400-R de altura total 13 m. Calcular:

a) Altura aproximada de empotramiento.

b) Momento de vuelco, considerando el máximo esfuerzo soportado por el apoyo.

c) Momento estabilizador para terreno normal ($K_T = 12$ daN/cm^3), utilizando como lado de la base de hormigón en la cimentación 1 m y considerando el peso del apoyo, crucetas, aisladores y conductores 2 100 daN = 21 kN.

d) Coeficiente de seguridad.

a) La altura mínima de empotramiento:

$$h_e = \frac{H_t}{15} + 0{,}5 = \frac{13}{15} + 0{,}5 = 1{,}37\ \text{m} \approx 1{,}4\ \text{m}$$

b) La altura del poste sobre el terreno $H = 13 - 1{,}4 = 11{,}6$ m
El momento de vuelco:

$$M_v = F\left(H + \frac{2}{3}h_e\right) = 4 \cdot (11{,}6 + \frac{2}{3} \cdot 1{,}4) = 50{,}1\ \text{m·kN}$$

c) El momento estabilizador del terreno y bloque de hormigón:

$$M_0 = 1{,}39 \cdot K_T \cdot l \cdot h_e^4 + 8{,}8 \cdot l^3 \cdot h_e = 1{,}39 \cdot 12 \cdot 1 \cdot 1{,}4^4 + 8{,}8 \cdot 1 \cdot 1{,}4 = 76{,}4\ \text{m·kN}$$

El momento estabilizador de las cargas verticales:

$$M_b = 0{,}4 \cdot p_c \cdot l = 0{,}4 \cdot 21 = 8{,}4\ \text{m·kN}$$

El momento estabilizador total $M_e = M_0 + M_b = 76{,}4 + 8{,}4 = 84{,}8$ m·kN

d) El coeficiente de seguridad al vuelco $\dfrac{M_0 + M_b}{M_v} = \dfrac{84{,}8}{50{,}1} = 1{,}69 > 1{,}5$

3.36-2. Un apoyo de una línea de M.T. está empotrado 2 m en un macizo de hormigón y tiene una altura sobre el terreno de 11 m. Calcular:

a) Momento de vuelco para una fuerza horizontal en el extremo del apoyo de 630 daN.

b) Momento estabilizador del terreno, de $K_T = 12$ daN/cm^3, y del bloque de hormigón, siendo el lado de la base cuadrada del macizo de hormigón 1 m.

c) Momento estabilizador de las cargas verticales debidas al apoyo, cruceta, aisladores y conductor, de peso 2 200 daN.

d) Coeficiente de seguridad al vuelco.

Solución: a) 7,77 m·kN; b) 284,5 m·kN; c) 8,8 m·kN; d) 3,77

3.37. PUESTA A TIERRA DE LOS APOYOS

Los apoyos metálicos y de hormigón se conectan a tierra por los bornes que contienen al efecto, mediante conductor de tierra y picas (fig. 3.57). El conductor de tierra es de cobre sin aislamiento de 50 mm^2 de sección, su tendido se hace por una zanja de profundidad unos 0,8 m y se une a la pica por una grapa de conexión. La pica de tierra es cilíndrica lisa; la más utilizada es de acero cobreado de 2 m de longitud y 14 mm de diámetro, pudiendo prolongarse mediante tramos roscados.

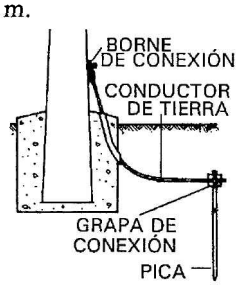


Fig. 3.57

© Ediciones Paraninfo

La resistencia a tierra no debe ser superior a 20 Ω. En zonas de pública concurrencia se utiliza una toma de tierra en anillo, con cable enterrado a la distancia de 1 m de las aristas del empotramiento.

Las autoválvulas y los herrajes de las líneas de M.T. así como el neutro de las líneas de baja tensión se conectan también a tierra (fig. 3.58).

Las derivaciones para toma de tierra en redes de baja tensión se realizan con conector o grapa bimetálicos (fig. 3.59).

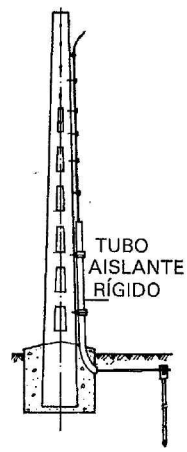


Fig. 3.58

3.38. CIMENTACIÓN Y ELEVACIÓN DE APOYOS

a) La *excavación* (cilíndrica o prismática) se hace habitualmente de forma mecánica, mediante excavadoras o perforadoras

b) La *elevación* de los apoyos puede hacerse:
   - En apoyos de madera o de hormigón, manualmente mediante caballetes y pértigas; pero habitualmente se realiza mediante grúas autopropulsadas.
   - La elevación de apoyos formados por estructuras metálicas, puede realizarse: montando la estructura en el suelo y elevándola completa mediante pluma y torno, con uno de los extremos sujeto a la cimentación, o haciendo la elevación de la estructura metálica que forma el apoyo montándola por tramos.

   Después de la elevación del apoyo se procede al compactado del terreno extraído y al hormigonado.



Fig. 3.59

3.39. TENDIDO DE CABLES

En cables de poco peso y vanos pequeños, con conductor RZ para B.T., el tendido se efectúa desenrollando la bobina a mano.

En cables de gran diámetro y vano amplio, el tendido se realiza:

a) Desenrollado sin tensión mecánica: las bobinas van montadas en un vehículo, de forma que al moverse éste el cable queda tendido en el suelo por gravedad; posteriormente se suben los conductores al punto de sujeción. No es válido este tensado para crucetas de bóveda.

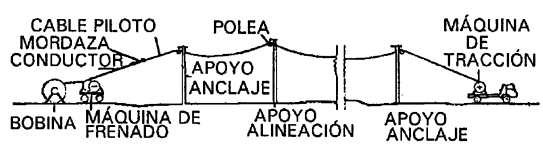


Fig. 3.60

b) Desenrollado con tensión mecánica: las bobinas se sostienen fijas y se tira del cable mediante cabrestante.

© Ediciones Paraninfo

El tendido se realiza después de 15 días como mínimo de la cimentación de los apoyos.

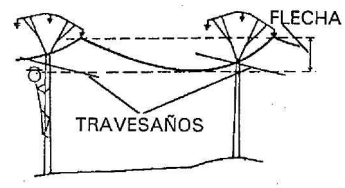


Fig. 3.61

3.40. TENSADO DE CABLES

Se realiza:

a) *Manualmente*, en líneas de poco peso y pequeños vanos, realizándose el tendido vano a vano mediante un tensor de palanca.

b) *Mecánicamente*, en líneas con grandes vanos y cables de mucho peso, mediante cabrestante y máquina freno, sujetos los cables a las crucetas mediante poleas (fig. 3.60).

La tensión mecánica del cable será según las tablas de tendido de acuerdo con la temperatura ambiente y se observa mediante dinamómetro o mediante observación ocular de la flecha (fig. 3.61).

3.41. INSTALACIÓN DE LÍNEAS AÉREAS DE MEDIA TENSIÓN CON CONDUCTORES DE ALUMINIO ACERO

La secuencia de operaciones, después de la colocación y cimentación de apoyos es la siguiente:

1) Colocar sobre las crucetas las cadenas de aisladores, colgando de éstas unas poleas de aluminio, de diámetro 25 a 30 veces el diámetro del cable.
2) Tender el cable conductor.
   - Antes del tendido del conductor se colocan protecciones provisionales de madera en cruces con carreteras, ferrocarriles, otras líneas, etc. de forma que los conductores queden, durante el tendido, por encima de las protecciones. Suelen ser de madera.
   - El cable guía, sujeto a la máquina de tracción arrastra al conductor sobre las poleas. Cuando el conductor ha pasado por todas las poleas, en el primer apoyo del tramo se retira la polea y se coloca la grapa de amarre.
   - En el tendido, los empalmes del conductor deben ir en los puentes de las grapas de amarre de los apoyos de ángulo o anclaje.
3) Tensar el cable según la tensión de tendido y el vano de regulación observando la flecha.
4) Sacar las poleas de tendido y sujetar el conductor a los aisladores, mediante grapas.

3.42. INSTALACIÓN DE LÍNEAS AÉREAS DE BAJA TENSIÓN

■ Red tensada sobre apoyos

Se utilizan apoyos de hormigón, según la siguiente tabla:

© Ediciones Paraninfo

Tabla 3.17

Conductor	Tensión máxima (daN)	Vano máximo (m)	Apoyo fin de línea resistencia (daN)/altura (m)
RZ 0,6/ 1kV 3×25 Al/54,6 Alm	315	45	400/9
RZ 0,6/ 1kV 3×50 Al/54,6 Alm	500	50	630/9
RZ 0,6/ 1kV 3×95 Al/54,6 Alm	500	50	630/9
RZ 0,6/ 1kV 3×95 Al/80 Alm	500	50	1000/9
RZ 0,6/ 1kV 3×150 Al/95 Al	500	50	1 000/9

Los apoyos de alineación tendrán de resistencia mínima 160 daN.

Secuencia de montaje de los conductores:

- Sujetar a los apoyos los ganchos y anclajes previstos.
- Realizar el tendido del cable. Se recomienda la utilización de poleas de madera o aluminio de diámetro mínimo 23 veces el de los cables con ancho y profundidad de la garganta no inferiores a 1,5 veces el diámetro del haz de cables.
- Efectuar el tense del cable según la tabla de tendido y el vano de regulación.
- Separar del haz los fiadores o neutros portantes para realizar, a continuación el amarre (el amarre debe ser 24 horas después del tendido para que se igualen las tensiones en los vanos por las oscilaciones del cable).

■ **Red posada sobre fachada**

Secuencia de montaje de los conductores:

- Realizar los taladros para los soportes con intervalos de 50 a 70 cm, como mínimo a 30 cm de la techumbre o esquina del edificio.
- Colocar los soportes sobre la pared del edificio.
- Efectuar el tendido del cable, situándolo en los soportes y cerrando éstos a continuación.

3.43. SEÑALIZACIÓN DE SEGURIDAD EN LAS LÍNEAS AÉREAS

Consiste en la colocación de indicadores de peligro en cada apoyo de las líneas de primera categoría y en las que pasen por zonas muy frecuentadas.

En las proximidades de los aeropuertos se pintan de rojo y blanco los apoyos y se colocan en los conductores lámparas de descarga para señalización nocturna.

3.44. APERTURA DE CALLES EN ZONAS DE ARBOLADO PARA LÍNEAS DE MEDIA TENSIÓN

Para evitar interrupciones del servicio y los posibles incendios producidos por el contacto de ramas o troncos de árboles en los conductores de la línea, cuando la línea pasa por zonas de bosque o arbolado se establece, mediante la indemnización correspondiente, una zona de tala de árboles, corte de ramas y desbrozado. La zona es una calle con ancho la servidumbre de vuelo de la línea más la distancia de seguridad a ambos lados de la misma (mínimo 2 m), según ITC-LAT-07.

© Ediciones Paraninfo

PROBLEMAS DE RECAPITULACIÓN

P.3-1. Una derivación trifásica de longitud 1 200 m alimenta un centro de transformación de 630 kVA a una tensión de 20 kV. El conductor utilizado es LA 56 y la cruceta que soporta los conductores tiene una distancia entre ellos de $D_{12}=2$ m, $D_{23}=2$ m y $D_{31}=4$ m. Calcular:

a) Reactancia de la línea.
b) Impedancia de la línea.
c) Caída de tensión porcentual en la línea a plena carga con factor de potencia 0,8 inductivo.
d) Pérdida de potencia en la línea.
e) Densidad de corriente en el conductor.

Solución: a) 0,493 Ω; b) 0,885 Ω; c) 0,14 %; d) 730 W; e) 0,33 A/mm^2.

P.3-2. Un cable conductor LA 56 está tendido en un vano horizontal de 80 m, en zona A y sin viento, con una flecha de 1 m. Si la carga es de 0,189 daN/m y se considera distribuida sobre la horizontal. Calcular:

a) Tensión horizontal.
b) Tensión en un extremo.
c) Longitud del conductor en el vano.

Solución: a) 151,2 daN; b) 151,4 daN; c) 80,03 m.

P.3-3. Una línea eléctrica a 20 kV, con cable conductor LA 56, discurre a una altitud de unos 600 m con una longitud de 4 km. Calcular:

a) Sobrecarga por viento.
b) Sobrecarga por hielo.
c) Tense a 50 °C, sin viento, en un tramo de alineación de vano máximo horizontal 100 m y vano medio 70 m. El tense máximo de 415 daN se considera a -15 °C con sobrecarga de hielo.
d) Flecha máxima con el tense anterior.

Solución: a) 0,5966 daN/m; b) 0,7385 daN/m; c) 86,6 daN; d) 2,68 m.

P.3-4. Un apoyo de alineación con cruceta tipo bóveda tiene vanos contiguos de 120 y 90 m de luz. El apoyo es de hormigón HV 400 R11, con altura de empotramiento 1,5 m. Las alturas del punto de amarre de la cadena de aisladores a la cruceta sobre la cogolla del poste son de 1,15 m y 1,55 m. El conductor es LA 56, de diámetro 9,45 mm. Calcular:

a) Fuerza del viento sobre cada conductor.
b) Esfuerzo en punta en sentido transversal, considerando solamente la fuerza del viento sobre los conductores.
c) Tense máximo con coeficiente de seguridad 3,2, sabiendo que la carga mínima de rotura para el conductor es de 1 640 daN.
d) Esfuerzo en punta en sentido longitudinal.

Solución: a) 59,54 daN; b) 202,75 daN; c) 513 daN; d) 140 daN.

© Ediciones Paraninfo

P.3-5. Una línea aérea trifásica de 20 kV, con conductor LA 30 forma un ángulo de 110° en un punto en el que se utiliza un apoyo C-2 000-12, con empotramiento de 2,2 m y cruceta recta, de altura sobre la punta del poste de 1 m. Los vanos contiguos al apoyo son de 100 y 70 m. Calcular el esfuerzo en punta en sentido transversal, considerando la acción del viento sobre los conductores y la tensión debida a las tracciones que se consideran iguales a la máxima. Diámetro del conductor 7,14 mm, carga mínima de rotura 990 daN y coeficiente de seguridad 3.

Solución: a) 1 350 daN.

P.3-6. Calcular el esfuerzo en punta en sentido longitudinal que soporta un apoyo de anclaje en una línea aérea trifásica con cable conductor LA 56, y cruceta recta a la altura del extremo del apoyo. La carga de rotura del conductor es 1 640 daN y el coeficiente de seguridad utilizado 3.

Solución: 820 daN.

P.3-7. Calcular la caída de tensión más desfavorable en la línea aérea de la figura 3.62, construida con conductores de aluminio trenzados en haz con las secciones indicadas. Se considera el consumo como instalación trifásica equilibrada. La tensión es de 400/230 V.

Solución: $u_{AD}=5,12\%$

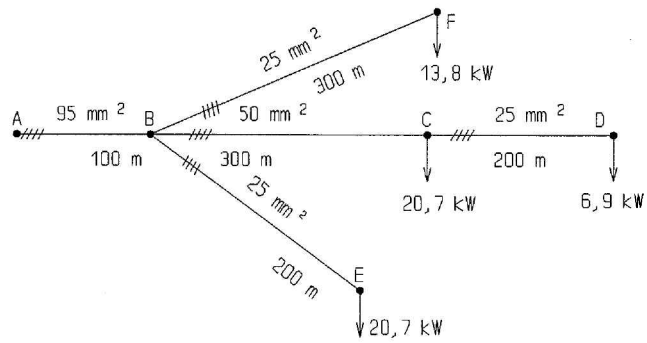


Fig. 3.62

P.3-8. Una instalación aérea de B.T. situada en una zona de altitud 700 m sobre el nivel del mar, está sometida a sobrecarga por hielo. Calcular el peso unitario del cable trenzado RZ 0,6/1 kV 3×50 Al/54,6 Alm. Diámetro máximo del conductor aislado 12,3 mm.

Solución: 1,14 daN/m.

P.3-9. Una línea aérea de B.T. con cable RZ 0,6/1 kV 3×95 Al/54,6 Alm, forma una ángulo de 120°. Calcular la fuerza resultante sobre el apoyo en ángulo, sabiendo que se considera un tense máximo de 400 daN y se desprecia la acción del viento sobre el cable.

Solución: 400 daN.

P.3-10. En una línea aérea de M.T. se utiliza como apoyo de alineación el poste de hormigón HV-630-R de altura total 13 m y altura de empotramiento 1,8 m. Calcular:

a) Momento de vuelco.

b) Momento estabilizador para terreno normal ($K_T=12$ daN/cm^3), utilizando como lado de la base de hormigón 1 m y considerando el peso de las cargas verticales 2 300 daN.

c) Coeficiente de seguridad.

Solución: a) 78,1 m·kN; b) 200 m·kN; c) 2,56.

© Ediciones Paraninfo

4 LÍNEAS SUBTERRÁNEAS

4.1. LÍNEAS SUBTERRÁNEAS

Se utilizan en líneas de distribución en M.T. para núcleos urbanos y en líneas de B.T.

4.2. CABLES SUBTERRÁNEOS

Los conductores eléctricos son de cobre recocido o aluminio semiduro, cableados a base de hilos redondos (cuerda) para conductores unipolares. Para secciones iguales o mayores a 50 mm^2 en cables multipolares se utilizan cuerdas sectoriales. La resistividad del aluminio es 1,64 veces mayor que la del cobre; pero a igualdad de resistencia eléctrica entre conductores el peso del aluminio es la mitad del de cobre.

La disposición de los cables de M.T. es la siguiente: el conductor recubierto de una capa semiconductora revestido de aislante, con una pantalla de cobre, un relleno y una armadura metálica; todo ello protegido por una cubierta.

El cable puede ser unipolar (de una sola alma) y multipolar (de varias almas, con su propio aislante y pantalla). El cable multipolar sin pantallas sólo se utiliza para tensiones hasta 15 kV (cables de campo no radial). Los aislantes empleados son: papel impregnado y termoplásticos (PVC) hasta 20 kV; termoestables (EPR, HEPR y XLPE) hasta 100 kV.

Se utilizan aislantes especiales en cables antillama y en cables resistentes a ambientes determinados. Para evitar la penetración de la humedad se utilizan cintas higroscópicas sobre el conductor y sobre la pantalla.

Las *pantallas*, realizadas habitualmente con hilos de cobre, mallas de cobre o hojas de aluminio, tienen por objeto mejorar las distribución del campo eléctrico en el cable y evitar influencias de éste con campos eléctricos exteriores. Para mejorar la distribución del campo eléctrico se utilizan también capas semiconductoras entre el conductor y el aislante, y entre éste y la pantalla.

Las *armaduras*, realizadas habitualmente de fleje de acero, van colocadas sobre al aislamiento para protección mecánica del cable conductor.

Las *cubiertas* de los cables protegen las armaduras metálicas contra la corrosión y la acción de agentes químicos. Si la armadura es de plomo la cubierta no es necesaria. Actualmente la mayoría de las cubiertas se hacen de materiales termoplásticos, PVC y poliolefina termoplástica (Z1)

© Ediciones Paraninfo

4.3. CABLES AISLADOS SUBTERRÁNEOS PARA MEDIA TENSIÓN

En las líneas subterráneas de media tensión se utilizan varios tipos de cables:

- **Cables de aislamiento seco**

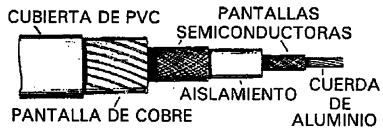


Fig. 4.1

El cable más utilizado es de aluminio.

1) *Composición.* Cuerda de hilos de aluminio recubierto de pantalla semiconductora, aislamiento plástico, pantalla semiconductora, pantalla de cobre y cubierta de PVC (fig. 4.1) o de poliolefina termoplástica (Z1).
2) *Designación.* Se designan por tres letras (la primera indica el aislamiento, la segunda la pantalla y la tercera el material de la cubierta), seguidas por la tensión nominal, la composición del cable con su sección y la sección de la pantalla (ver tabla 1.3 del libro).
   Así el cable RHV 12/20 kV 1x240 k Al+H 16, es el cable con aislamiento de polietileno reticulado (R), pantalla (H), cubierta de PVC (V), tensión nominal 12/20 kV, conductor compacto (k) unipolar de 240 mm^2 de sección, aluminio y sección de la pantalla 16 mm^2.
3) *Características.* Las principales características de estos conductores:

Tabla 4.1 Cables de aluminio de tensión 12/20 kV aislados con XLPE.

CARACTERÍSTICAS	Sección nominal (mm^2).			
	95	150	240	400
Espesor nominal de aislamiento (mm).	5,5	5,5	5,5	5,5
Diámetro exterior aproximado (mm).	30	33	37	47
Número de alambres del conductor.	15	15	30	53
Radio mínimo de curvatura (mm).	420	480	560	680
Nivel de aislamiento a impulsos (kV).	125	125	125	125
Intensidad admisible, 3 unipolares al aire a 40 °C (A).	255	335	455	610
Intensidad admisible, 3 unipolares enterrados a 25 °C (A).	205	260	345	445
Intensidad admisible, 3 unipolares entubados a 1 m (A).	190	245	280	320
Intensidad admisible en cortocircuito con duración 0,1 s (kA).	28,3	44,7	71,5	119,2
Resistencia máxima a 20 °C (Ω/km).	0,320	0,206	0,125	0,078
Capacidad (μF/km).	0,235	0,257	0,310	0,360
Reactancia inductiva (Ω/km).	0,119	0,110	0,104	0,097

La temperatura máxima de trabajo de estos cables es de 90 °C y en cortocircuito de duración inferior a 5 s 250 °C.

Actualmente se utilizan cables con protección a la penetración de agua y no propagadores de llama o de incendio como el designado por RHZ1-2OL-(AS) 12/20 kV 1x240 k Al+H16: Cable unipolar con conductor compacto de aluminio de 240 mm^2 de sección, tensión 12/20 kV, aislado con polietileno reticulado, cubierta de poliolefina, doble obturación frente al agua,no propagador de incendio, sección de la pantalla 16 mm^2.

© Ediciones Paraninfo

Se utiliza también el cable con aislamiento de etileno propileno de alto módulo como el designado por HEPRZ1 12/20 kV 1x150 Al+H16: Cable unipolar con conductor compacto de aluminio de 150 mm^2 de sección, tensión 12/20 kV, aislado con etileno propileno de alto módulo, cubierta de poliolefina, sección de pantalla 16 mm^2. Las características de estos conductores se indican en la tabla siguiente:

Tabla 4.2 Cables de aluminio de tensión 12/20 kV con aislamiento HEPR.

CARACTERÍSTICAS	Sección nominal (mm^2).			
	50	150	240	400
Intensidad admisible, 3 unipolares al aire a 40 °C (A).	180	360	495	660
Intensidad admisible, 3 unipolares enterrados a 25 °C (A).	145	275	365	470
Intensidad admisible, 3 unipolares entubados a 1m (A).	135	255	345	450
Resistencia máxima a 90 °C (Ω/km).	0,822	0,265	0,162	0,102
Capacidad (μF/km).	0,206	0,368	0,453	0,536
Reactancia inductiva (Ω/km).	0,133	0,112	0,105	0,098

La temperatura máxima de trabajo de estos cables es de 105 °C

- **Cables de papel impregnado**

1) *Composición*. Cable trifásico con conductores de cobre o aluminio, aislados con papel aceitado (fig. 4.2), cubierta común de plomo y cubierta exterior de PVC.

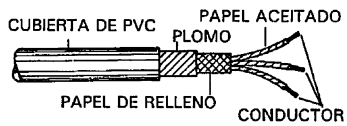


Fig. 4.2

2) *Designación*. Se designan por tres letras (la primera indica el aislamiento de papel (P), la segunda la cubierta de plomo (P) y la tercera la cubierta exterior (V), seguidas por la tensión nominal y la composición del cable con su sección y material conductor.

Así el cable PPV 12/15 kV 3x95 Cu, es el cable con aislamiento de papel impregnado, cubierta de plomo y cubierta exterior de PVC, 12/15 kV de tensión nominal, tripolar de cobre de 95 mm^2 de sección.

Estos cables están en desuso y no se utilizan en nuevas instalaciones.

4.4. CÁLCULO DE LÍNEAS SUBTERRÁNEAS DE MEDIA TENSIÓN

Los cables de M.T. en distribución trifásica designan su *tensión* por dos cifras separadas por una barra, U_0/U. La primera tensión U_0 indica el valor eficaz de la tensión simple fase-tierra de la red eléctrica, que corresponde a la tensión entre el conductor y la pantalla del cable. La segunda tensión U, indica el valor eficaz de la tensión compuesta de la línea. La tensión nominal del cable para M.T. se elige según la tensión máxima de la red y su sistema de puesta a tierra (UNE 211435).

Según un eventual funcionamiento de una fase a tierra, las redes se clasifican en tres categorías (ITC-LAT-06):

- Categoría A: Los defectos a tierra se eliminan antes de un minuto.
- Categoría B: Los defectos a tierra no deberían exceder de una hora.
- Categoría C: Red no incluida en las categorías anteriores.

© Ediciones Paraninfo

La elección de la tensión de aislamiento del cable para redes de categoría C requiere un aislamiento y un coste más elevado, pero permite la utilización del cable con una fase a tierra más que por períodos breves de tiempo. En las líneas de M.T., de tensión nominal 20 kV, se utilizan cables de tensión nominal 12/20 kV en las redes de categoría A o B, y de tensión 15/25 kV en redes de categoría C.

La *intensidad admisible en régimen permanente* (ITC-LAT-06), se indica para 40 °C al aire y 25 °C de temperatura ambiente del terreno en instalación enterrada. a una profundidad de 1 m y resistivaidad térmica del terreno 1,5 K·m/W. Si las condiciones de instalación son distintas se utilizan factores de corrección.

La elección de la *sección* del cable de M.T. se realiza calculando:

- Intensidad de corriente que circula por el conductor.
- Intensidad de cortocircuito a que está sometido el conductor. (La sección necesaria para poder soportar el cortocircuito se estudió en el epígrafe 2.15).
- Caída de tensión en el conductor. (La caída de tensión en M.T. se estudió en el epígrafe 2.12).

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

4.4-1. Una línea subterránea trifásica, de tensión 20 kV alimenta un centro de transformación con un transformador de 400 kVA a una distancia de 350 m. Se utilizan cables unipolares tipo DHV 12/20 kV 1x95 k Al, que admiten en instalación enterrada 200 A. Calcular:

a) Intensidad de línea para funcionamiento a plena carga del transformador.
b) Intensidad de cortocircuito si la potencia de cortocircuito en el punto de entronque con la línea de distribución, según la empresa suministradora es de 450 MVA.
c) Sección necesaria para soportar el cortocircuito si su duración (según la empresa suministradora) es de 0,2 s y la constante K del cable según el fabricante es de 94.
d) Caída de tensión a plena carga en la línea , con un factor de potencia 0,8 inductivo, si la resistencia del cable es de 0,32 Ω/km y la reactancia 0,119 Ω/km.

a) Intensidad de línea a plena carga en el primario $I_{L1}=\dfrac{S_n}{\sqrt{3}\,V_L}=\dfrac{400}{\sqrt{3}\cdot 20}=11{,}55$ A

b) La intensidad de cortocircuito:

$$I_{cc}=\frac{S_{cc}}{\sqrt{3}\,V_L}=\frac{450\cdot 10^6}{\sqrt{3}\cdot 20\cdot 10^3}=12\,990\text{ A}=12{,}99\text{ kA}$$

c) La sección necesaria para soportar el cortocircuito:

$$s=\frac{I_{cc}\sqrt{t}}{K}=\frac{12\,990\cdot\sqrt{0{,}2}}{94}=61{,}8\text{ mm}^2$$

d) La caída de tensión de línea:

$$u=\sqrt{3}\,I_{L1}\,L\,(R\cos\varphi+X\operatorname{sen}\varphi)=\sqrt{3}\cdot 11{,}55\cdot 0{,}35\cdot(0{,}32\cdot 0{,}8+0{,}119\cdot 0{,}6)=2{,}29\text{ V}$$

En tanto por cien $u\%=\dfrac{2{,}29\cdot 100}{20\cdot 10^3}=0{,}011\%$

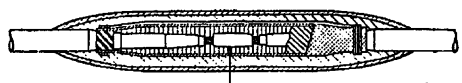
© Ediciones Paraninfo

4.4-2. Una línea subterránea, con cables unipolares RHV 12/20 kV 1×150 k Al alimenta a 20 kV, un transformador de 1000 kVA, a una distancia del punto de entronque con la línea de distribución en M.T. de 560 m. Calcular:

a) Sección necesaria para soportar el cortocircuito, si en el punto de entronque la potencia de cortocircuito es de 300 MVA. La duración del cortocircuito se considera 0,3s y la constante K del cable 94.

b) Caída de tensión en la línea a plena carga, con factor de potencia 0,8 inductivo, si la resistencia de la línea es 0,21 Ω/km y la reactancia 0,11 Ω/km.

Solución: a) 50,46 mm^2; b) 6,55 V.



MANGUITO EMPALME POR COMPRESIÓN

Fig. 4.3

4.5. EMPALME, DERIVACIÓN Y TERMINAL

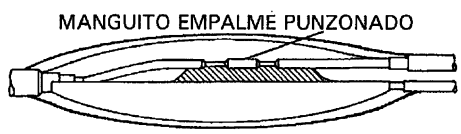
Se utilizan kits que contienen los elementos de montaje con sus accesorios y la información técnica.

Los empalmes y derivaciones se realizaban en cajas metálicas (de hierro en trifásica y de plomo en monofásica). Actualmente se realizan en cajas de plástico.

La unión de una línea aérea con otra subterránea se hace en caja terminal de interior o de intemperie.

4.6. EMPALMES SUBTERRÁNEOS EN MEDIA TENSIÓN

a) *Empalme con cable de aislamiento seco*. Para el cable RHV se utiliza manguito de empalme por compresión con aplicación de distintas cintas conductoras y aislantes para la reconstrucción del aislamiento del conductor (fig. 4.3).



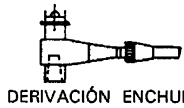
MANGUITO EMPALME PUNZONADO

Fig. 4.4

Se utilizan actualmente los empalmes con piezas premoldeadas. Formados por un conjunto de piezas que constituyen un "kit" de empalme. Después de unir el cable con un manguito, al retirar el núcleo interior del cuerpo del empalme de caucho-silicona, éste se contrae realizando el sellado del cable. Este empalme con cuerpo retráctil en frío se utiliza hasta 36 kV para cables con aislamiento seco.

b) *Empalme mixto*. Para conexión de cable tripolar con aislamiento de papel impregnado con tres cables unipolares de aislamiento seco (fig. 4.4), suele hacerse con vertido de resina en frío.

c) *Conectores enchufables*. Empalme premoldeado que facilita la unión de un cable aislado a otro cable o a un terminal de un equipo eléctrico (fig. 4.5). En estos conectores se distinguen cuatro partes: conductor, apantallamiento interno, aislamiento y apantallamiento externo.



DERIVACIÓN ENCHUFABLE

Fig. 4.5

© Ediciones Paraninfo

Con estos conectores se pueden montar distintos tipos de derivaciones y se utilizan mucho para la conexión del cable al terminal del transformador, formado por un pasatapas también enchufable. La instalación de los conectores puede ser en el interior o en el exterior, sin necesidad de herramientas especiales, encintado o material de relleno. Se utilizan hasta una tensión de 24 kV.

4.7. TERMINALES DE CABLES SUBTERRÁNEOS PARA MEDIA TENSIÓN

El manguito terminal es el elemento utilizado para conectar los extremos de los cables subterráneos a los equipos eléctricos o a las líneas. hay que distinguir que los terminales sean para recinto interior o para exterior, destinados a la conexión de líneas aéreas con subterráneas.

Los terminales son distintos según sean para cable de aislamiento seco o para cables de papel impregnado. Todos llevan un cono deflector (componente del terminal que unido a la pantalla o envolvente metálica del cable, en el punto donde esta termina, reduce el gradiente de potencial en ese punto).

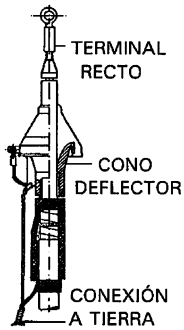


Fig. 4.6

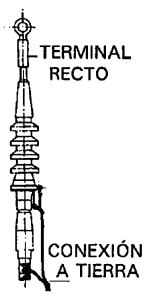


Fig. 4.7

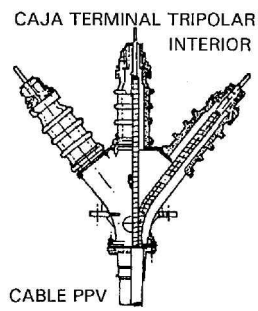


Fig. 4.8

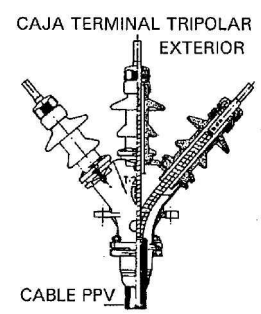


Fig. 4.9

Los terminales más utilizados, según el tipo de cable, son:

- Cable de aislamiento seco. Se utilizan terminales preformados, sin aislamiento de porcelana (fig. 4.6). El terminal exterior lleva aletas (fig. 4.7) para aumentar la longitud de la línea de fuga de una descarga de contorneo del terminal.
- Cables de papel impregnado, en los que se necesita aportación de calor. Las cajas terminales constan de aisladores de porcelana rellenos de mezcla aislante según el tipo de aislamiento del cable (fig. 4.8). En los terminales de exterior el aislador de porcelana dispone de aletas para alargar la línea de fuga de una descarga de contorneo del aislador (fig. 4.9).

Actualmente se utilizan *terminales retráctiles en frío* hasta tensiones de 45 kV, mediante una pieza de caucho-silicona, que se realizan de la forma siguiente:

© Ediciones Paraninfo

- En cable de aislamiento seco la instalación se realiza una vez pelada la cubierta y la pantalla de cobre. Se coloca la pieza terminal y se retira la cinta de su núcleo, con lo que la pieza se retrae adaptándose al cable y garantizando un cierre estanco. En terminales de exterior se sellan los extremos de la pieza con cinta de silicona.
- En cable de aislamiento de papel impregnado se utilizan también terminales retráctiles, convirtiendo previamente el aislante de la terminación a seco mediante cinta aislante y tubo termorretráctil de polivinilo (se retrae al aplicarle una fuente de calor). A continuación se sigue el mismo proceso que para el cable de aislamiento seco.

4.8. CABLES SUBTERRÁNEOS PARA LÍNEAS DE BAJA TENSIÓN

Se utilizan, generalmente, conductores de aluminio con aislamiento plástico de polietileno reticulado XLPE o etileno propileno EPR.

1) *Composición*: Cuerda de aluminio, aislamiento de XLPE o EPR y cubierta exterior de PVC o Z1 (fig. 4.10). Sección mínima 16 mm^2 (ITC-BT-07).
2) *Designación*: Se designan con dos letras (la primera indica el aislamiento R o D y la segunda la cubierta exterior V), seguidas por la tensión nominal, composición del cable, sección y material conductor. Así el cable RV 0,6/1 kV 1x95 Al, es el conductor de aislamiento de XLPE, cubierta de PVC, tensión nominal 0,6/1 kV, unipolar de aluminio con 95 mm^2 de sección.

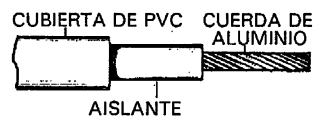


Fig. 4.10

3) *Características*: Las principales características de los conductores más utilizados, con aislamiento de XLPE, son las indicadas en la tabla siguiente:

Tabla 4.3

CARACTERÍSTICAS	RV 0,6/1 kV				
	1x25 Al	1x50 Al	lx95 Al	lxl50 Al	lx240 Al
Sección nominal (mm^2).	25	50	95	150	240
Número mínimo de alambres del conductor.	6	6	15	15	30
Espesor radial de aislamiento (mm).	0,9	1,1	1,2	1,4	1,7
Diámetro exterior aproximado (mm).	11,1	13,7	17,8	21,8	27,1
Intensidad admisible, 3 cables al aire y 40 °C (A).	88	125	200	290	390
Intensidad admisible, 3 cables enterrados a 0,7 m y 25 °C (A).	95	135	200	260	340
Intensidad admisible, 3 cables bajo tubo a 0,7 m y 25 °C (A).	82	115	175	230	305
Intensidad admisible en cortocircuito con duración de 0,5 s (kA).	3,5	6,85	12,95	20,4	32,5
Resistencia máxima a 20 °C (Ω/km).	1,2	0,64	0,32	0,206	0,125

Se utilizan también cables trifásicos con conductor de cobre o aluminio, aislados con XLPE o EPR y cubierta de PVC o poliolefina Z1.

© Ediciones Paraninfo

4.9. CÁLCULO DE LÍNEAS SUBTERRÁNEAS DE BAJA TENSIÓN

En el cálculo de líneas subterráneas de B.T. se suele considerar solamente la resistencia de los conductores. En cálculos de más exactitud no se debe despreciar las reactancias de autoinducción (aproximadamente 0,08 Ω/km)y de capacidad de los cables. El cálculo se realiza por caída de tensión, considerando la intensidad admisible en los conductores enterrados según la instrucción ITC-BT-07 para conductores de cobre o aluminio (tabla 2.3 del libro).

Los conductores son unipolares o multipolares, de tensión nominal no inferior a 1 000 V y sección no inferior a 6 mm^2 para el cobre y 16 mm^2 para el aluminio, según la instrucción ITC-BT-07. En esta instrucción se indica la sección mínima del neutro para distribución a cuatro conductores.

Cuando la intensidad a transportar sea superior a la admisible por un solo conductor se puede instalar más de un conductor por fase, del mismo material, sección y longitud, según la instrucción ITC-BT-07, que indica también la condiciones de la instalación y distancias de cruzamientos, proximidades y paralelismos con otras instalaciones y vías de comunicación.

La sección del conductor para soportar una intensidad de cortocircuito I_{cc} admitida en estos conductores de tensión 0,6/1 kV, para una duración del mismo no superior a 5 s y de modo que la temperatura no alcance más de 250 °C, se puede calcular, de acuerdo con las normas UNE, según se estudió en el epígrafe 2.15:

$$s = \frac{I_{cc}\sqrt{t}}{K}$$

La sección del conductor a utilizar debe ser superior a la sección necesaria para soportar el cortocircuito.

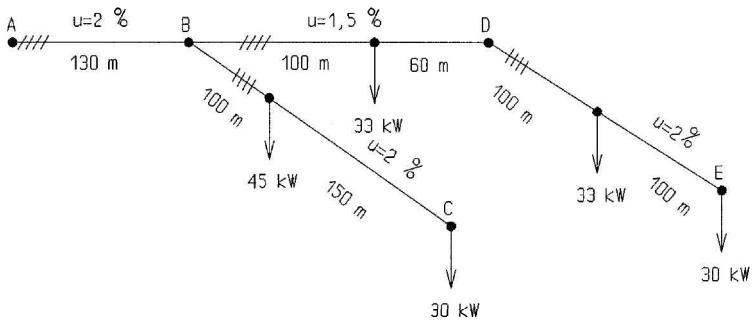


Fig. 4.11

En las instalaciones interiores o receptoras de B.T. muy alejadas del centro de transformación no se suele calcular el cortocircuito, porque se considera que la temperatura no alcanza valores peligrosos en el tiempo que tardan en actuar las protecciones.

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

4.9-1. Calcular la sección de los distintos tramos de la línea de distribución trifásica indicada en la figura 4.11. La línea está formada por cables unipolares con conductores de aluminio aislados con XLPE 0,6/1 kV, para instalación enterrada bajo tubo. La tensión de línea es 400 V y la caída de tensión máxima es la indicada en cada tramo. Se considera un factor de potencia unidad para todas las cargas y la temperatura de 25 °C.

© Ediciones Paraninfo

La caída de tensión en el tramo AB $u_1 = \frac{2 \cdot 400}{100} = 8$ V

Considerando en el punto B toda la carga conectada a este punto fuera del tramo 33+33+30+30+45=171 kW.

La sección: $s_1 = \frac{LP_1}{cu_1 V_L} = \frac{130 \cdot 171\,000}{35 \cdot 8 \cdot 400} = 198{,}5 \text{ mm}^2$

Según la instrucción ITC-BT-07 la sección normalizada inmediatamente superior a la calculada es 240 mm², que admite, a la temperatura ambiente de 25 °C, la intensidad de 305 A bajo tubo (tabla 2.3 del libro).

La intensidad que circula por el tramo AB es la intensidad total:

$$I_{L1} = \frac{P_1}{\sqrt{3} \cdot V_L \cdot \cos\varphi} = \frac{171.10^3}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 1} = 246{,}8 \text{ A}$$

Esta intensidad es menor que la permitida por el conductor de 240 mm² por lo que se elige para el tramo AB esta sección 3×240+1×120.

La caída de tensión en el tramo BD $u_2 = \frac{1{,}5 \cdot 400}{100} = 6$ V

La sección $s_2 = \frac{\Sigma (LP)_2}{cu_2 V_L} = \frac{100 \cdot 33\,000 + 160 \cdot 63\,000}{35 \cdot 8 \cdot 400} = 158{,}8 \text{ mm}^2$

Según el REBT (ITC-BT-07), la sección normalizada inmediatamente superior es de 240 mm², que admite una intensidad de 305 A bajo tubo (tabla 2.3 del libro).

La mayor intensidad que circula por el tramo BD es la intensidad total que parte de B hacia D.

$$I_{L2} = \frac{P_2}{\sqrt{3} \cdot V_L \cdot \cos\varphi} = \frac{96.10^3}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 1} = 138{,}6 \text{ A}$$

Esta intensidad es menor que la permitida por el conductor de 240 mm², por lo que se elige para el tramo BD esta sección 3x240+1x120.

La caída de tensión en el tramo DE $u_3 = \frac{2 \cdot 400}{100} = 8$ V

La sección $s_3 = \frac{\Sigma (LP)_3}{cu_3 V_L} = \frac{100 \cdot 33\,000 + 200 \cdot 30\,000}{35 \cdot 8 \cdot 400} = 83 \text{ mm}^2$

Según el REBT (ITC-BT-07), la sección normalizada inmediatamente superior es de 95 mm², que admite una intensidad de 175 A bajo tubo (tabla 2.3 del libro).

La mayor intensidad que circula por el tramo DE es la intensidad total de la derivación.

$$I_{L3} = \frac{P_3}{\sqrt{3} \cdot V_L \cdot \cos\varphi} = \frac{63 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 1} = 90{,}9 \text{ A}$$

Esta intensidad es menor que la permitida por el conductor de 95 mm², por lo que se elige para el tramo DE esta sección 3×95+1×50.

La caída de tensión en el tramo BC $u_3 = \frac{2 \cdot 400}{100} = 8$ V

© Ediciones Paraninfo

La sección $s_4 = \dfrac{\Sigma(LP)_4}{cu_3 V_L} = \dfrac{100 \cdot 45\,000 + 250 \cdot 30\,000}{35 \cdot 8 \cdot 400} = 107{,}13 \text{ mm}^2$

Según el REBT (ITC-BT-07), la sección normalizada inmediatamente superior es de 150 mm², que admite una intensidad de 230 A bajo tubo (tabla 2.3 del libro).

La mayor intensidad que circula por el tramo BC es la intensidad total de la derivación.

$$I_{L4} = \frac{P_4}{\sqrt{3} \cdot V_L \cdot \cos\varphi} = \frac{75 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 1} = 108{,}3 \text{ A}$$

Esta intensidad es menor que la permitida por el conductor de 150 mm², por lo que se elige para el tramo BC esta sección $3 \times 150 + 1 \times 95$.

4.9-2. La línea trifásica de distribución en B.T. representada en la figura 4.12, está formada por un cable tetrapolar con conductores de aluminio, aislados con polietileno reticulado, 0,6/1 kV, en instalación enterrada bajo tubo. La tensión es de 400/230 V y las secciones están indicadas en la figura. Calcular la caída de tensión desde al origen a los puntos E, D y G, considerando la temperatura máxima de trabajo (90ºC).

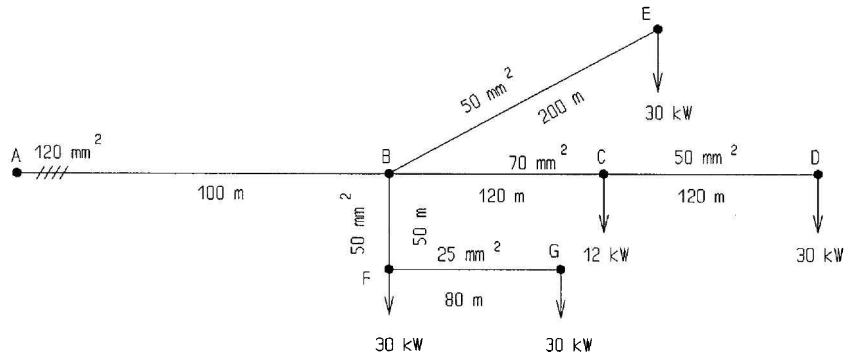


Fig. 4.12

Solución: $u_{AE}=5{,}25\%$, $u_{AD}=6{,}46\%$, $u_{AG}=6{,}07\%$

4.9-3. Calcular la sección de la línea trifásica cerrada representada en la figura 4.13. Los conductores son de aluminio, cable tetrapolar aislado con XLPE, 0,6/1 kV, en instalación interior enterrada bajo tubo. La tensión de línea es 400 V y la caída de tensión máxima 2%. Factor de potencia 1, común para todas las cargas.

Solución: 70 mm²

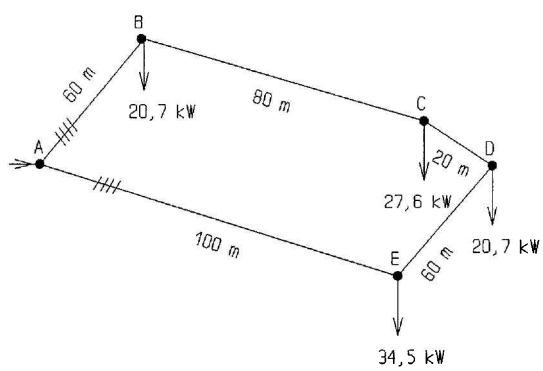


Fig. 4.13

© Ediciones Paraninfo

4.10. EMPALMES Y DERIVACIONES EN B.T.

Los empalmes y derivaciones en las líneas subterráneas de B.T. se realizan:

- *Con vertido de resina.* en cajas de empalme o derivación subterráneas (fig 4.14), de material plástico con relleno de resina epoxi o similar.
  Los kits de conexión están formados por dos medias protecciones acopladas entre sí, ajustables al diámetro exterior del cable y rellenas de mezcla aislante.
- *Retráctiles.* Los empalmes y derivaciones se protegen también con un cuerpo termorretráctil. La conexión se realiza con manguito o grapa de conexión cubierta con masilla aislante. La protección exterior termorretráctil está recubierta en su interior por un adhesivo que se derrite por la aplicación de calor, de forma que el cuerpo se retrae sellando perfectamente la conexión (fig 4.15). Estos materiales termorretráctiles tienen una gran resistencia mecánica y elevada resistencia a los agentes atmosféricos.
  Para las terminaciones de los cables se utilizan también manguitos termorretráctiles (fig. 4.16).
  Se fabrican también empalmes con cuerpo de protección retráctil en frío.



Fig. 4.14

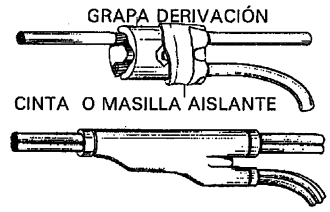


Fig. 4.15

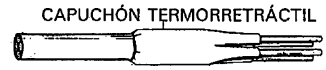


Fig. 4.16

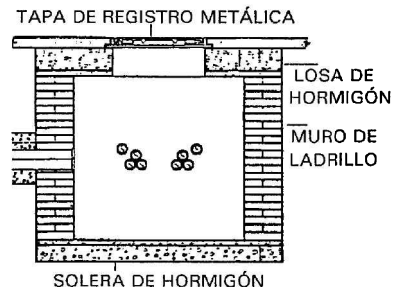


Fig. 4.17

4.11. REGISTRO O ARQUETA

Son pozos construidos de ladrillo y de hormigón empleados en las líneas subterráneas con conductor bajo tubo para montaje, realización de empalmes, derivaciones y terminales.

4.12. ARQUETAS DE REGISTRO PARA CANALIZACIONES SUBTERRÁNEAS DE MEDIA Y BAJA TENSIÓN

Son pozos de sección rectangular construidos con muros de ladrillo macizo enlucido interiormente con mortero de cemento (fig. 4.17), solera de hormigón armado, losa de hormigón armado y tapa metálica.

© Ediciones Paraninfo

La arqueta de registro puede ir bajo calzada o bajo acera. Se construyen en tramos rectos, separadas entre sí como máximo 40 m (ITC-BT-07) y en los puntos de cambio de dirección de la línea. Las dimensiones de las arquetas son según las normas de la empresa suministradora de energía y se suelen construir con una longitud de 1,5 m en el sentido de tendido de la línea.

4.13. ARMARIOS DE URBANIZACIÓN

Las derivaciones en redes subterráneas de M.T. y la centralización de contadores de urbanizaciones se realizan en armarios de chapa de acero galvanizado colocados sobre el suelo con una base de hormigón (fig. 4.18). Según las necesidades de la urbanización son de distintas dimensiones.

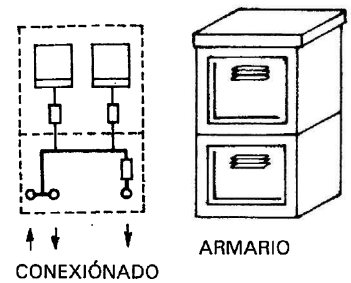


Fig. 4.18

4.14. EXCAVACIÓN Y PREPARACIÓN DE LA ZANJA

Para realizar la canalización subterránea se empieza por la excavación de la zanja con una profundidad que varía de 75 a 140 cm según las características de la canalización, mediante excavadoras, zanjadoras o martillos neumáticos.

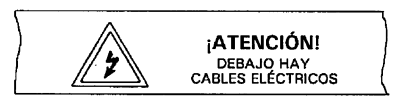


Fig. 4.19

Si el cable se entierra directamente se coloca en el fondo de la zanja una capa de arena.

Si el suelo es pavimentado o en cruzamiento de calzada los cables se colocan bajo tubo. Al construir la canalización se deja un alambre o cuerda dentro del tubo para limpieza del mismo y tendido del cable.

4.15. SEÑALIZACIÓN DE LÍNEAS SUBTERRÁNEAS

Se efectúa mediante una cinta de plástico enterrada a lo largo de la zanja, a más de 25 cm del cable (ITC-BT-07) y entre 10 y 30 cm de la superficie (fig. 4.19).

4.16. RELLENADO DE LA ZANJA

Se realiza vertiendo la tierra excavada y apisonándola. Si el cable va directamente enterrado, debajo de este se coloca una capa de arena fina, de mina o de río lavada, de unos 10 cm, (5 cm como mínimo según ITC-BT-7), y por encima del cable otra capa de arena o tierra cribada de unos 30 cm de espesor (10 cm como mínimo según ITC-BT-07). Sobre esta va una protección mecánica (ladrillos, losetas de hormigón, etc.) y la cinta de señalización. El compactado de la tierra será manual los primeros 20 cm y luego se realizará mecánicamente por capas de 10 cm de espesor.

© Ediciones Paraninfo

4.17. ZANJAS Y CANALIZACIONES EN MEDIA TENSIÓN

Las *zanjas* se abren con anchura de unos 60 cm y una profundidad a la parte superior del cable no menor de 0,6 m en acera y 0,8 m en calzada (ITC-LAT-06).

La *canalización* se realiza de varias formas:

- Cable directamente enterrado en zanja, sobre arena de río, con protección de rasilla o ladrillo y cinta de señalización (fig. 4.20)

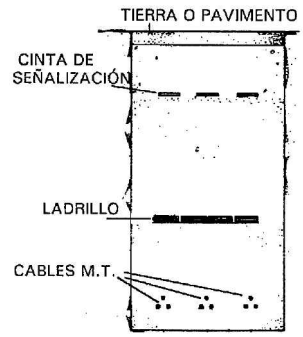


Fig. 4.20

- Bajo tubo de plástico o de fibrocemento, cuando se necesite protección mecánica. Los tubos de fibrocemento van unidos entre sí con corchete de cemento y la zanja lleva cinta de señalización (fig. 4.21). El diámetro interior del tubo es como mínimo 1,5 veces el diámetro del cable o conjunto de cables contenidos. En la canalización cada tubo puede contener un cable tripolar, tres unipolares o un cable unipolar.

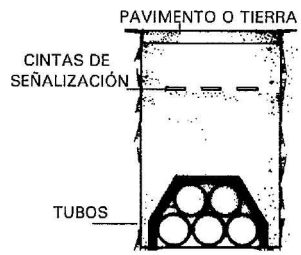


Fig. 4.21

- En cruce de calzada. La canalización en zona urbana será bajo acera. El cruce de calzada se realiza perpendicular al eje de la misma, bajo tubo hormigonado como indica la figura 4.22.

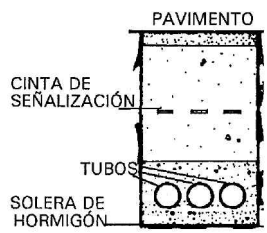


Fig. 4.22

- Canalización en galería. La galería puede ser visitable, cuando tiene dimensiones suficientes para el paso del personal, o registrable, cuyas dimensiones no permiten la circulación del personal y con tapas de registro que necesitan medios mecánicos para su manipulación. En las galerías no se permiten canalizaciones de gas. Puede ir la canalización de agua siempre que se garantice que un escape en la misma no puede afectar al resto de la instalación, aunque no es recomendable. En la galería debe haber renovación de aire para evitar acumulaciones de gas y condensaciones. En las galerías visitables se instalan las canalizaciones eléctricas de potencia y cables de control y comunicaciones. Los cables van sujetos sobre soportes o bandejas, que como todos los elementos metálicos se conectan a la red de tierra de la galería. En las galerías registrables se instalan las canalizaciones eléctricas de media y baja tensión, de alumbrado, de control y de comunicación. Puede llevar también canalización de agua; pero las partes deben quedar estancas una vez colocada la tapa de cierre.
- Canales revisables. Con acceso restringido a personal autorizado.

© Ediciones Paraninfo

4.18. ZANJAS Y CANALIZACIONES EN BAJA TENSIÓN

Las *zanjas* se abren con una anchura de 60 cm y una profundidad mayor de 60 cm (ITC-BT-07) y de 0,8 m en cruce de calzada.

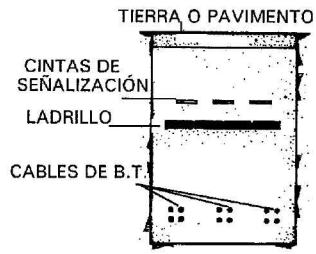


Fig. 4.23

La *canalización* se realiza de varias formas:

- Cable directamente enterrado en zanja, sobre arena de río, con protección de rasilla o ladrillo y cinta de señalización (fig. 4.23).
- Bajo tubo de plástico o de fibrocemento, cuando se necesite protección mecánica. Se instalará un circuito por tubo. El diámetro interior mínimo de los tubos es el doble del diámetro del cable. El cruce de calzada se realiza bajo tubo hormigonado y la zanja con cinta de señalización (igual que en M.T.).
- En galerías visitables o zanjas registrables. Uso preferente para electricidad.
- En canales revisables o conductores sujetos a la pared directamente, mediante bandejas y soportes. Solamente utilizados en locales técnicos.

Las proximidades y paralelismos entre conducciones subterráneas se indican en la instrucción ITC-BT-07. La distancia mínima con canalizaciones de A.T. es de 0,25 m y con otras canalizaciones 0,2 m.



Fig. 4.24

4.19. TENDIDO DE CABLES

Los cables se suministran habitualmente en bobinas de madera, que para el tendido del cable se colocan en un apoyo que les permita girar.

Formas de tendido. El tendido se realiza sujetando el cable por una mordaza o manguito mediante el cual se ejerce la tracción y puede efectuarse de varias formas:

- Por gravedad desde un vehículo en marcha que se mueva a lo largo de la zanja.

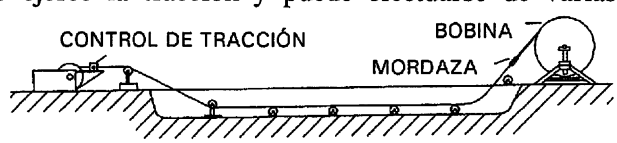


Fig. 4.25

- Tendido a mano sobre rodillo, en cables de poco peso, con tiro manual mediante manguito de arrastre (fig. 4.24).
- Tendido mecánico con rodillos accionados por motores.
- Tendido por medio de torno o cabrestante. Es el sistema más utilizado. La cuerda de tracción se sujeta al cable por medio de unas mordazas de arrastre, que consiste en un disco taladrado, en el que se introducen los conductores y se sujetan mediante tornillos. La tracción se ejerce desde un extremo de la zanja y en el otro extremo se halla la bobina (fig. 4.25). El mismo sistema se utiliza para el tendido en tubos o en galerías (fig. 4.26). Los esfuerzos de tracción del cable no deben sobrepasar los 5 daN/mm^2 para

© Ediciones Paraninfo

conductores de cobre y la mitad para conductores de aluminio. Según el proyecto tipo UNESA la tracción máxima para cables tripolares no debe sobrepasar los 4 daN/mm^2 para el cobre y 2,5 daN/mm^2 para el aluminio.

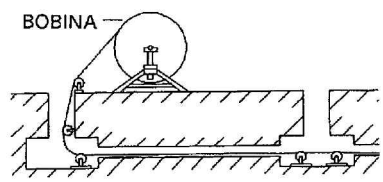


Fig. 4.26

El tendido no debe efectuarse a temperatura inferior a 0 °C por la rigidez mecánica del aislante, que puede deteriorarse.

Radio de curvatura. La curvatura excesiva del cable puede dar lugar a deformaciones con deterioro de los aislantes. El fabricante del cable recomienda el radio mínimo de curvatura r en la canalización, que depende del diámetro del cable D y del diámetro del conductor d.

1) Para baja tensión $r=10\,D$
2) Para media tensión:
   - Con cable de aislamiento de papel impregnado o cable unipolar de aislamiento seco:

$$r=10(D+d)$$

   - Con cable tripolar de aislamiento seco $r=7{,}5(D+d)$

Según proyecto tipo UNESA el radio de curvatura durante el tendido para cables de M.T. no debe ser inferior a $20D$.

Comprobación. Después de efectuado el tendido se comprueba el aislamiento del cable y la continuidad de los conductores.

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

4.19-1. En la canalización subterránea con conductor RV 0,6/1 kV 1×150 Al, calcular el radio de curvatura mínimo si el diámetro del conductor es de 21,8 mm.

El radio de curvatura $r=10\,D = 10 \cdot 21{,}8 = 218$ mm $= 0{,}218$ m

4.19-2. Calcular el mínimo radio de curvatura en una canalización subterránea para un cable RHV 12/20 kV 1×240 Al (ver diámetro en la tabla 4.1).

Solución: 0,56 m

PROBLEMAS DE RECAPITULACIÓN

P.4-1. Una línea subterránea, con cables unipolares RHV 12/20 kV 1x150 Al, alimenta a 20 kV, un transformador de 1 000 kVA, a una distancia del punto de entronque con la línea de distribución en M.T. de 1,5 km. Calcular:

a) Sección necesaria para soportar el cortocircuito, si en el punto de entronque la potencia de cortocircuito es de 400 MVA, el tiempo de actuación de las protecciones 0,2 s y la constante del cable K=94.

© Ediciones Paraninfo

b) Caída de tensión en la línea a plena carga, con factor de potencia 0,9 inductivo, si la resistencia de la línea es 0,21 Ω/km y la reactancia 0,11 Ω/km.
Solución: a) 55 mm²; b) 17,77 V.

P.4-2. Con conductores de aluminio unipolares, aislados con XLPE en instalación enterrada bajo tubo, se alimenta con una longitud de 400 m a un transformador de 630 kVA, con un factor de potencia 0,8 inductivo a una tensión 20 kV. La caída de tensión admisible 2% y la temperatura del terreno 25 °C. La resistencia del cable a la temperatura máxima 90 °C es de 0,56 Ω/km y la reactancia 0,13 Ω/km. El tiempo de disparo de las protecciones es de 0,2 s. Calcular:
a) Sección necesaria para soportar el cortocircuito si la potencia de cortocircuito es de 450 MVA y la constante del cable K=94.
b) Caída de tensión en la línea con el conductor adoptado a la máxima temperatura de trabajo 90 °C.
Solución: a) 61,8 mm²; b) 6,63 V

P.4-3. Calcular la sección de los conductores de aluminio unipolares, aislados con XLPE en instalación interior enterrada bajo tubo, que alimentan con una longitud de 75 m a una instalación trifásica de consumo 44 kW con factor de potencia 0,8 inductivo a una tensión 400/230 V. La caída de tensión admisible 2% y la temperatura del terreno 25 °C.
Solución: 35 mm².

P.4-4. Calcular la sección de la línea trifásica representada en la figura 4.27. Los conductores son de aluminio, unipolares, aislados con XLPE, para 1 kV, en instalación enterrada bajo tubo. La tensión de línea es 400 V y la caída de tensión máxima admisible 2%. Se considera un factor de potencia común para todas las cargas de 0,9 inductivo.

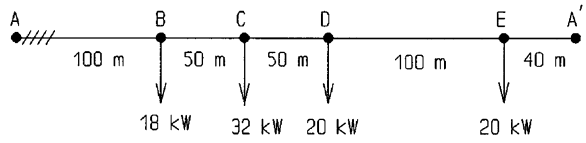


Fig. 4.27

Solución:
50 mm².

P.4-5. Calcular la caída de tensión en los tramos AB, BC y BD de la línea subterránea indicada en la figura 4.28, con las secciones indicadas. Los conductores son unipolares de aluminio, aislados con XLPE y la tensión 400/230 V.

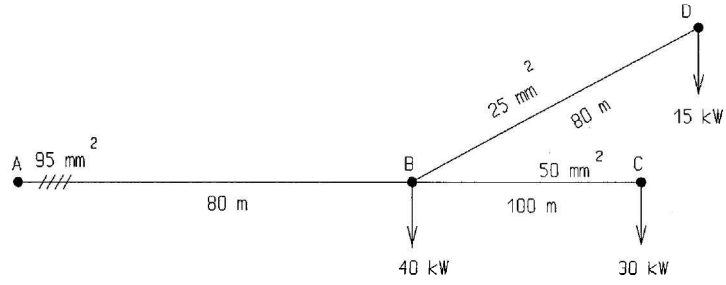


Fig. 4.28

Solución: a) $u_{AB}=1,28\%$; $u_{BC}=1,07\%$; $u_{BD}=0,86\%$

© Ediciones Paraninfo

5

APARAMENTA Y PROTECCIÓN

5.1 APARAMENTA ELÉCTRICA

Es el conjunto de aparatos que se utilizan para protección, conexión y desconexión de los circuitos eléctricos.

Según su ubicación los aparatos pueden ser:

- Aparato de *maniobra* o conexión. Intercalado en un circuito principal o de potencia.
- Aparato de *mando*. Intercalado en un circuito auxiliar o de mando.

Los aparatos de maniobra según su actuación pueden ser:

- *Manuales*. Necesitan ser accionados manualmente por el usuario.
- *Automáticos*. Actúan automáticamente en función del valor de una magnitud física.

5.2. PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DE LOS APARATOS ELÉCTRICOS

Los *parámetros característicos más utilizados en la aparamenta eléctrica* en general son:

- Valor nominal: Valor de las magnitudes indicadas para el aparato por el fabricante, y con las que puede funcionar permanentemente sin que provoquen efectos perjudiciales. Tensión, intensidad y frecuencia.

  En alta tensión se especifica tensión nominal y tensión nominal más elevada (máxima tensión que debe soportar el aparato en condiciones normales de utilización). Se indican en MIE RAT 04 del Reglamento de centrales, subestaciones y centros de transformación. Tabla 5.1 para M.T.

Tabla 5.1

TENSIÓN NOMINAL DE LA RED (kV)	TENSIÓN MÁS ELEVADA PARA EL MATERIAL (kV)
3	3,6
6	7,2
10	12
15	17,5
20*	24
30	36
45	52
66*	72,5

(*) Valores de uso preferente en redes de distribución públicas.

© Ediciones Paraninfo

En alta tensión se especifica el nivel de aislamiento. Viene indicado a frecuencia industrial (50 Hz) y a impulsos tipo rayo (1,2/50 μs), según la instrucción MIE RAT 12. Tabla 5.2 para media tensión (grupo A, tensión mayor de 1 kV y menor de 52 kV)).

Tabla 5.2

TENSIÓN MÁS ELEVADA PARA EL MATERIAL (kV eficaces)	TENSIÓN SOPORTADA NOMINAL A LOS IMPULSOS TIPO RAYO (kV cresta)		TENSIÓN SOPORTADA NOMINAL DE CORTA DURACIÓN A FRECUENCIA INDUSTRIAL (kV eficaces)
	Lista 1	Lista 2	
3,6	20	40	10
7,6	40	60	20
12	60	75	28
17,5	75	95	38
24	95	125	50
36	145	170	70
La elección de la lista 1 se hace según las consideraciones de la instrucción MIE RAT 12. Cuando sea necesario un alto grado de seguridad se utiliza el material correspondiente a la lista 2.			

- Valor asignado. Valor de una magnitud establecida para un determinado funcionamiento del aparato.
- Intensidad límite térmica. Valor eficaz de la intensidad de corriente circulando durante un tiempo (1 a 3 s) a partir del cual los efectos térmicos de la corriente pueden dañar el aparato. La aparamenta debe soportar el afecto térmico de la intensidad de cortocircuito.
- Intensidad límite dinámica. Valor de la intensidad de corriente máxima o de pico, a partir de la cual los esfuerzos electrodinámicos pueden deteriorar el aparato. Los esfuerzos electrodinámicos dependen del cuadrado del valor máximo o de pico de la intensidad de corriente. La aparamenta debe soportar los esfuerzos electrodinámicos de la intensidad de cortocircuito

Los *parámetros característicos de los aparatos de maniobra* son:

- Poder de corte: Intensidad eficaz máxima que es capaz de cortar o interrumpir el aparato.
- Poder de cierre: Valor máximo o de pico de la intensidad de corriente que es capaz de soportar el aparato en el cierre del circuito.

5.3. INTERRUPTOR

Aparato mecánico de conexión que permite establecer, soportar e interrumpir corrientes en condiciones normales y sobrecargas. Soporta durante un tiempo la intensidad de cortocircuito. Su poder de corte es suficiente para poder cortar la intensidad nominal, pero no la de cortocircuito. Se llama también interruptor en carga.

© Ediciones Paraninfo

5.4. INTERRUPTOR AUTOMÁTICO

Aparato mecánico de conexión capaz de establecer, soportar e interrumpir corrientes en condiciones normales, así como de establecer, soportar durante un tiempo y cortar corrientes de cortocircuito.

■ Constitución

El interruptor automático está constituido fundamentalmente por las siguientes partes:

1) *Contactos*. Conjunto de contactos fijos y móviles que al unirse o al separarse establecen la conexión o el corte de corriente.
2) *Cámara de extinción de arco*. Para la extinción del arco producido por la maniobra. En los interruptores automáticos de B.T. el arco se suele establecer en el aire, pero en los de intensidad nominal elevada la maniobra de los contactos se establece en exafluoruro de azufre (gas muy aislante) o en el vacío. En los interruptores automático de M.T. la maniobra de los contactos en aire se usa cada vez menos, utilizándose el vacío, exafluoruro de azufre, aceite y aire comprimido.
3) *Mecanismo de apertura y cierre de los contactos*. Dispositivo que permite la apertura o cierre de los contactos de forma manual o automática.
4) *Disparadores*. Dispositivo que unido al aparato de maniobra permite la apertura o el cierre de los contactos liberando el mecanismo de retención.
   - Disparadores directos o primarios (fig. 5.1). Recorridos por la intensidad de circuito principal. Cuando la intensidad de corriente en el circuito sobrepasa un valor determinado el disparador actúa.

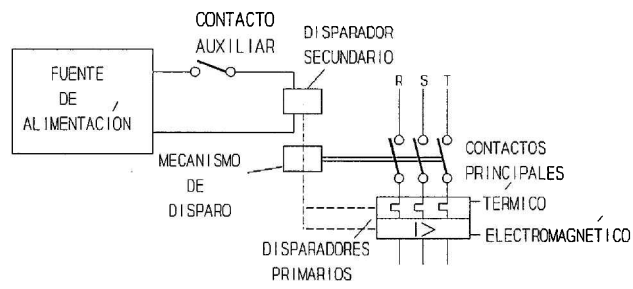


Fig. 5.1

     - Disparador electrotérmico: está constituido esencialmente por una lámina bimetálica. Cuando la intensidad toma un valor elevado, la lámina bimetálica se calienta deformándose y haciendo actuar el mecanismo. Protege contra sobrecargas.
     - Disparador electromagnético: está constituido esencialmente por un electroimán. Cuando la intensidad toma un valor muy elevado, la fuerza del electroimán aumenta y hace actuar el mecanismo. Protege contra intensidades de cortocircuito. Cuando la intensidad de actuación de los disparadores es ajustable se le llama intensidad de regulación.
   - Disparadores indirectos o secundarios. Están conectados en un circuito auxiliar o de mando.

© Ediciones Paraninfo

- Disparador de emisión de corriente. Actúan cuando pasa corriente por su bobina.
- Disparador de mínima tensión. Actúan cuando la tensión que alimenta su bobina baja de un determinado valor.

Los disparadores indirectos actúan sobre el interruptor automático por la acción de pulsadores o relés (aparato que al variar una magnitud física actúa sobre otros dispositivos) permitiendo el mando a distancia.

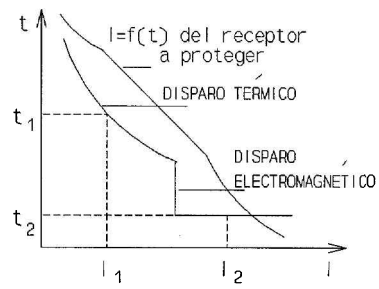


Fig. 5.2

■ **Funcionamiento**

El interruptor automático se utiliza para maniobra y protección. Por su elevado poder de corte puede desconectar automáticamente corrientes de sobrecarga o cortocircuito antes de que se produzcan efectos perjudiciales.

■ **Características**

Las características del interruptor, además de sus valores nominales, expresan sus características constructivas: número de polos, disparadores, clase de corriente, etc. Las curvas características más utilizadas son:

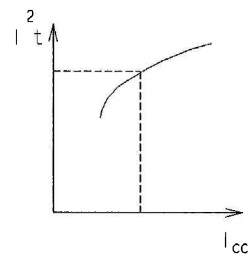


Fig. 5.3

- Curva de disparo (fig. 5.2). Indica los tiempos de actuación de los disparadores directos en función de la intensidad de corriente I(t). En la práctica la curva es doble, indicando unos márgenes de actuación. Si los disparadores son ajustables para distintas posibilidades de regulación, la curva indica el cambio de características.
- Curva de la energía disipada (fig. 5.3) en función de la intensidad de corriente de cortocircuito.

Un interruptor es limitador si la corriente de cortocircuito se extingue durante la primera semionda de corriente, limitando así la energía disipada.

5.5. INTERRUPTOR MAGNETOTÉRMICO

Es el pequeño interruptor automático (PIA), utilizado en B.T.

■ **Constitución**

Son aparatos modulares con distinto número de polos: unipolares, bipolares, tripolares y tetrapolares. Tienen incorporados un disparador térmico y otro magnético, actuando sobre un dispositivo de corte la lámina bimetálica y el electroimán. Normalmente no admiten disparadores indirectos. Se fabrican con diversos sistemas de montaje, para colocación en cuadro, para montaje saliente, etc., y los sistemas de conexión más usados son por tornillo y conexión enchufable.

© Ediciones Paraninfo

■ **Funcionamiento.**

La maniobra se realiza con corte al aire. Para sobreintensidades pequeñas y prolongadas actúa la protección térmica y para sobreintensidades elevadas actúa la protección magnética.

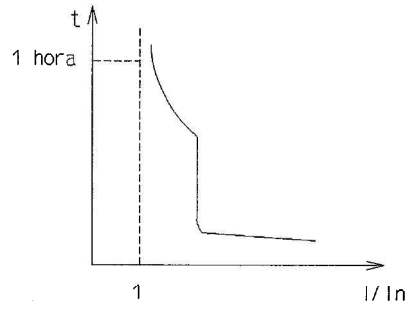


Fig. 5.4

■ **Características**

La intensidad asignada es de 6 a 125 A, la tensión hasta 400 V en corriente continua o alterna, frecuencia 50 o 60 Hz y poder de corte de 1,5 a 25 kA.

Las curvas características de disparo (fig.5.4), están normalizadas según la norma UNE EN 60898.

La intensidad de disparo que provoca la actuación del disparador térmico es de 1,45 veces la intensidad nominal en un tiempo menor de 1 hora.

El disparo electromagnético tiene unos márgenes de actuación según el tipo de curva (tabla 5.3).

Tabla 5.3

TIPO DE CURVA	MARGEN INFERIOR (t>0,1 s)	MARGEN SUPERIOR (t<0,1 s)
B (Para líneas largas).	$3I_n$	$5I_n$
C (Para líneas en general).	$5I_n$	$10I_n$
D (Para intensidad de arranque elevada).	$10I_n$	$20I_n$

Se utilizan magnetotérmicos con curva ICP-M, para interruptores de control de la potencia contratada en instalaciones de B.T. Para la protección de líneas que alimentan equipos a semiconductores se utilizan magnetotérmicos de curva tipo A.

Calibres de los pequeños interruptores automáticos (PIA):

- Tensiones nominales: 220, 380 V o 230, 400 V
- Intensidades nominales: 6, 10, 16, 20, 25, 32, 40, 50, 63 A

Calibres de los interruptores automáticos de potencia:

- Tensiones nominales: 220, 380, 500, 660 V
- Intensidades nominales:...40, 63, 80, 100, 125, 160, 250 A..

5.6. SECCIONADOR

Es un aparato mecánico de conexión, que por razones de seguridad, en posición abierta asegura una distancia de seccionamiento que satisface unas condiciones especificadas. Solamente debe utilizarse para abrir o cerrar un circuito cuando no circula corriente.

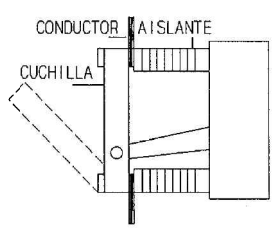


Fig. 5.5

■ **Constitución**

Los seccionadores utilizados en M.T. son de dos tipos: de cuchillas giratorias (fig. 5.5) o de cuchillas deslizantes.

© Ediciones Paraninfo

En M.T. se utiliza el seccionador bajo carga o interruptor seccionador (fig. 5.6). Es un interruptor que en posición abierta satisface las condiciones de aislamiento de un seccionador, pudiendo maniobrar con la intensidad nominal de servicio. Se utilizan seccionadores en carga telemendados sobre apoyo en líneas aéreas de M.T.

■ **Funcionamiento**

Su función es hacer visible, por seguridad, la apertura de los circuitos. El accionamiento puede ser con pértiga, y en instalaciones con mando a distancia por motor o por aire comprimido.

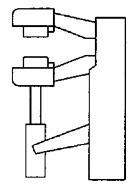


Fig. 5.6

Se utilizan también seccionadores de puesta a tierra de las líneas como medida de protección, cuando están desconectadas.

■ **Características**

El seccionador se caracteriza por no tener ni poder de corte ni poder de cierre.

El seccionador de puesta a tierra, por la posibilidad de presencia de tensión debido a cualquier fallo de la instalación, debe tener poder de cierre, porque al conectar a tierra pone la línea en cortocircuito.

5.7. FUSIBLE

El fusible o cortacircuito es el aparato de conexión que provoca la apertura del circuito en el que está instalado, por fusión, debido al calentamiento de uno o varios elementos destinados a este fin, cortando la corriente cuando ésta sobrepasa un determinado valor durante un tiempo.

■ **Constitución**

- Base portafusible. Es la parta fija que conecta con la instalación a través de unos bornes de conexión y contiene los soportes del cartucho fusible.
- Cartucho fusible. Formado por los contactos, cartucho aislante (porcelana o vidrio) con material extintor (excepto los de calibre muy pequeño) y elemento fusible. Algunos tipos de cartuchos tienen un indicador de fusión, consistente en un percutor de señalización que sale al exterior cuando el fusible funde.

El conductor fusible es un hilo metálico redondo o una cinta de sección rectangular, que funde rápidamente por sobreintensidad. El material utilizado habitualmente es cobre o plata.

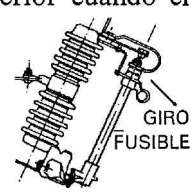


Fig. 5.7

■ **Funcionamiento**

Cuando circula corriente por el elemento fusible, este se calienta por efecto Joule, elevando su temperatura. Si la corriente es muy elevada, la temperatura puede alcanzar el punto de fusión del elemento conductor, que comienza a fundirse. El material extintor que rodea el elemento fusible condensa los vapores metálicos producidos en la fusión, facilitando la extinción del arco que se forma.

En líneas aéreas de M.T. se utiliza también el fusible de expulsión seccionador (fig. 5.7). El elemento fusible está unido a una trencilla de conexión de cobre. En

© Ediciones Paraninfo

el momento de producirse la fusión se produce la expulsión de la trencilla y la base portafusible se desconecta de la conexión superior, girando y dejando un corte visible.

■ **Características**

Los fusibles tienen un alto poder de corte, que suele ser mayor de 100 kA, su tensión asignada debe coincidir con la de la base portafusible, y su corriente asignada es muy variable según su utilización.

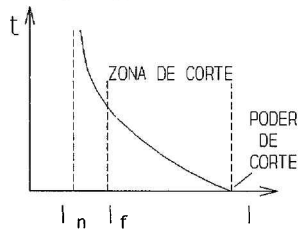


Fig. 5.8

Las curvas características más utilizadas son las curvas tiempo-corriente, que dan el tiempo de prearco o de funcionamiento en función del valor eficaz de la corriente (fig. 5.8). La intensidad convencional de fusión (I_f) es el valor eficaz de intensidad que provoca la fusión en un tiempo determinado. Para el fusible de B.T. tipo gG la intensidad convencional de fusión es 1,6 veces la intensidad nominal del fusible $I_f = 1{,}6\ I_n$.

Los fusibles limitadores o de alto poder de ruptura (A.P.R.) funden antes de que la corriente alcance el valor de pico (en un tiempo inferior a 10 ms). Utilizan como elemento de fusión varios hilos de plata en paralelo.

5.8. FUSIBLES DE B.T.

Los fusibles de B.T. se designan con dos letras, según la zona de corte.

Primera letra:

g: De uso general, capaz de cortar todas las intensidades de corriente desde su valor convencional de fusión $1{,}6I_n$ a su poder de corte.

a: De acompañamiento, capaz de cortar las intensidades de corriente desde 3 a $4I_n$ hasta su poder de corte.

Segunda letra:

G: De uso general. Cables y conductores eléctricos.

M: Protección de aparatos de maniobra y mando de motores.

R: Protección de circuitos con semiconductores.

B: Minería.

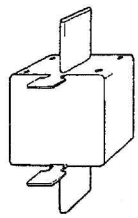
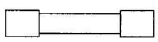
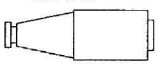
- *Características de las bases portafusibles*:
  Tensiones nominales: 220, 380, 500, 600 V.
  Intensidades nominales: 16, 20, 32, 40, 63, 80, 100, 160, 250, 400, 630, 800, 1 000 A.

- *Características de los fusibles*:
  Tensiones nominales: 220, 380, 500, 600 V.
  Intensidades nominales: 2, 4, 6, 10, 12, 16, 20, 25, 32, 35, 40, 50, 63, 80, 100, 125, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1 000 A.
  Poder mínimo de corte nominal
  Fusible tipo industrial (modelo de cuchillas o cilíndrico) 50 kA
  Fusible tipo doméstico (modelo tipo D) 20 kA

© Ediciones Paraninfo

- *Modelos y tamaños de cortacircuitos fusibles.*
  Se indican en la tabla siguiente:

Tabla 5.4

MODELO	TAMAÑO	INTENSIDAD NOMINAL DE LAS BASES
DE CUCHILLAS 	00	100 A
	0	160 A
	1	250 A
	2	400 A
	3	630 A
	4	1 000 A
CILÍNDRICOS 	(diámetro en mm x longitud en mm) 10x38	20 A
	14x51	50 A
	22x58	100 A
TIPO D 	D01	16 A
	D02	63 A
	D03	100 A

5.9. CONTACTOR

Aparato de conexión con una sola posición de reposo (habitualmente con contactos principales normalmente abiertos). Accionado a distancia y capaz de establecer, soportar e interrumpir corrientes en condiciones normales del circuito, incluidas las sobrecargas en servicio.

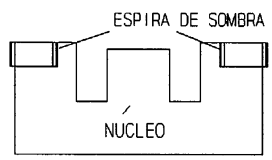


Fig. 5.9

■ Constitución de un contactor electromagnético

- Circuito de mando, formado por un electroimán con circuito magnético con una parte fija y otra móvil y bobina de excitación. Si el circuito de mando está alimentado por corriente alterna, el circuito magnético lleva una espira (fig. 5.9) en cortocircuito (espira de sombra) para evitar la vibración que se produce al pasar el flujo magnético alterno por su valor nulo. En la espira se induce una f.e.m. que da origen a una corriente inducida y crea un flujo desfasado con el del electroimán y, como consecuencia, nunca el flujo resultante es nulo.
- Contactos principales. Contactos que permiten el corte o restablecimiento de corriente en el circuito principal. Unos son fijos y otros móviles, sujetos mecánicamente al elemento móvil del electroimán. Deben tener gran resistencia mecánica para soportar muchas conexiones y desconexiones, y también alta conductividad, por lo que se recubren habitualmente de plata y níquel.
- Contactos auxiliares. Contactos que abren o cierran el circuito de mando, actuando sobre la bobina del contactor. Los contactos auxiliares normalmente

© Ediciones Paraninfo

abiertos actúan igual que los contactos principales, cerrando el circuito auxiliar cuando se cierra el circuito principal. Los contactos auxiliares normalmente cerrados actúan a la inversa del circuito principal, abriendo el circuito auxiliar cuando el circuito principal se cierra.

Actualmente se utilizan autómatas programables para el mando de los contactores, por lo que se utilizan menos los contactos auxiliares.

El contactor puede llevar un disparador o "relé térmico" para la apertura del circuito.

Los contactores pueden ser de corriente continua o alterna, de B.T. o de M.T. La maniobra de los contactos principales se hace en al aire en B. T.,y en vacío o en exafluoruro de azufre en M.T.

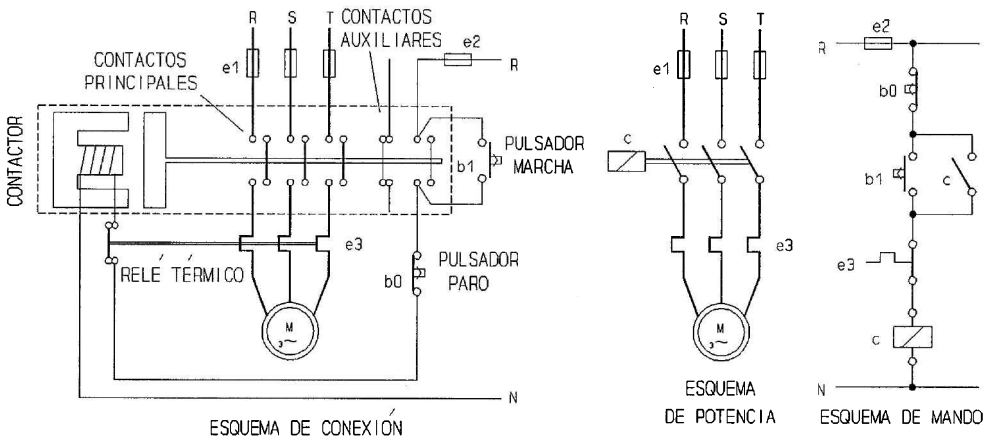


Fig. 5.10

■ Funcionamiento

Al conectar a una tensión la bobina del contactor, que está en estado de reposo (manteniendo los contactos principales abiertos por medio de unos muelles), se crea un flujo magnético que atrae la parte móvil del circuito magnético y, como consecuencia, cierra los contactos principales y auxiliares normalmente abiertos, mientras que abre los contactos auxiliares normalmente cerrados (fig. 5.10). Al desconectar la bobina los muelles hacen volver la parte móvil a la posición de reposo.

El contactor permite efectuar un gran número de maniobras, mediante mando eléctrico a distancia, por lo que se utiliza en instalaciones de automatización, especialmente para el mando de motores.

■ Características

Las principales características que definen un contactor son: número de contactos principales y auxiliares, naturaleza de la corriente del circuito principal y del auxiliar, medio de corte, tensión de empleo, tensión de aislamiento, intensidad de

© Ediciones Paraninfo

empleo, intensidad térmica convencional (máxima intensidad de corriente que un contactor puede soportar en servicio de 8 horas), poder de cierre y de corte.

Para la elección del contactor hay que tener en cuenta la naturaleza del equipo que va a conectar (motor, cargas no inductivas, etc) y el tipo de servicio.

Los servicios asignados son:

- Servicio de 8 horas. El contactor permanece accionado un tiempo igual o inferior a 8 horas, con intensidad constante, alcanzando el equilibrio térmico con el ambiente.
- Servicio continuo o ininterrumpido. El contactor permanece accionado un tiempo superior a 8 horas.
- Servicio temporal. El contactor permanece accionado un tiempo pequeño, sin alcanzar el equilibrio térmico, para pasar durante un tiempo largo a la posición de reposo, adquiriendo el contactor la temperatura ambiente.
- Servicio intermitente. El contactor abre y cierra periódicamente en una sucesión de ciclos de maniobra sin que se alcance el equilibrio térmico. Según el número de maniobras por hora los contactores se clasifican en clases (tabla 5.5).

Tabla 5.5

CLASE	Nº DE MANIOBRAS POR HORA
0,03	3
0,1	12
0,3	30
1	120
3	300
10	1 200

Según la naturaleza de la carga se definen unas categorías de empleo o servicio. Para corriente alterna se indican en la tabla 5.6.

Tabla 5.6

CATEGORÍA	APLICACIONES CARACTERÍSTICAS
AC-1	Cargas no inductivas o débilmente inductivas
AC-2	Motores de anillos, arranque, inversión de marcha
AC-3	Motores de rotor en cortocircuito. arranque, desconexión a motor lanzado.
AC-4	Motores de rotor en cortocircuito: arranque, marcha a impulsos, inversión de marcha.
Por inversión de marcha se entiende la parada o la inversión rápida del sentido de rotación del motor permutando las conexiones de alimentación mientras el motor está girando. Por marcha a impulsos se entiende el uno o varios cierres breves y frecuentes del circuito del motor, para conseguir pequeños desplazamientos del mecanismo accionado.	

En el contactor se definen unos parámetros de desgaste.

- Endurancia eléctrica. Número de ciclos de maniobras en carga que soporta el contactor en las condiciones dadas por las normas.
- Endurancia mecánica. Número de maniobras que soporta el contactor en vacío.

© Ediciones Paraninfo

5.10. PROTECCIÓN DE LAS INSTALACIONES CONTRA SOBRECARGAS

Se produce una sobrecarga en un circuito eléctrico cuando la intensidad que circula es superior a la admisible o nominal (sobrecorriente), sin que haya defecto de aislamiento.

■ Causas de las sobrecargas

Son principalmente:

- Fenómenos transitorios debidos al funcionamiento de algunos receptores.
- Sobreutilización de los receptores, que están sobrecargados, suministrando más potencia de la nominal.
- Sobreutilización de la instalación, que tiene conectada receptores con más potencia de la prevista.

■ Efecto de las sobrecargas

La sobrecarga produce en los conductores elevación de la temperatura, que puede ser superior a la admisible, ello implica el deterioro de los aislantes y la disminución del tiempo de utilidad de los cables.

■ Protección frente a sobrecargas

Los aparatos utilizados en B.T. para protección contra sobrecargas son: interruptor automático, interruptor magnetotérmico, fusibles y contactor combinado con relé térmico.

El aparato de protección debe desconectar antes de que se alcance la máxima temperatura admisible. Según la norma UNE 20 460, el aparato protege contra sobrecargas a un conductor si se verifican las siguientes condiciones:

$$I_B \leq I_n \leq I_Z \qquad I_2 \leq 1{,}45 I_Z$$

I_B: Intensidad de empleo o utilización.

I_n: Intensidad nominal del aparato o intensidad de ajuste en los aparatos que tengan esta posibilidad.

I_Z: Intensidad máxima admisible en el conductor.

I_2: Intensidad convencional de funcionamiento del aparato de protección (intensidad convencional de fusión en los fusibles e intensidad convencional de disparo en interruptores automáticos).

En la protección por interruptor magnetotérmico normalizado se cumple siempre la segunda condición porque $I_2 = 1{,}45 I_n$, por lo que se debe verificar solamente la primera condición.

En la protección por fusible tipo gG, se cumple que $I_2 = 1{,}6 I_n$, por lo que deben verificarse las dos condiciones.

Los dispositivos de protección contra sobrecargas se instalan en el origen de los circuitos y en los puntos donde se produzca una reducción de la intensidad admisible. Si la línea está protegida en el origen contra cortocircuitos la protección contra sobrecargas puede situarse en cualquier punto. Se recomienda no utilizar protección contra sobrecargas en circuitos que al desconectarse de forma imprevista

© Ediciones Paraninfo

pueden originar peligro, como excitación de máquinas rotativas, electroimanes de elevación de material, etc.

Cuando en una distribución trifásica el conductor neutro sea de sección menor que los de fase, debe estar también protegido contra sobrecargas (ITC-BT-22). La protección con interruptores automáticos debe ser de corte omnipolar (todos los conductores de fase y neutro).

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

5.10-1 Una línea de alimentación a un cuadro de fuerza está formada por 4 conductores unipolares de cobre, de sección 6 mm^2, aislados con PVC, 750 V, canalización empotrada en obra bajo tubo a 40°C. Calcular:

a) Intensidad admisible en los conductores.

b) Calibre del magnetotérmico necesario para proteger la línea contra sobrecargas si la intensidad que circula por los conductores de fase es 21 A = I_B.

c) Si es correcta la protección de la línea con fusible tipo gG de 25 A.

   a) De acuerdo con la instrucción ITC-BT-19 (tabla 2.9 del libro), para la sección 6 mm^2 la intensidad admitida a 40°C es de 32 A = I_z.

   b) El calibre del interruptor magnetotérmico es de 25 A = I_n, que cumple la condición 21 A ≤ 25 A ≤ 32 A.

   c) El fusible gG de 25 A cumple la primera condición 21 A ≤ 25 A ≤ 32 A. En este fusible la intensidad convencional de funcionamiento $I_2 = 1{,}6 \cdot I_n = 1{,}6 \cdot 25 = 40$ A. La segunda condición indica que el valor máximo de la intensidad de funcionamiento de la protección $I_2 = 1{,}45 \cdot I_Z = 1{,}45 \cdot 32 = 46{,}4$ A > 40 A
   El fusible de 25 A es válido para la protección de la línea.

5.10-2 Una línea de dos conductores unipolares de cobre, de sección 6 mm^2, aislados con PVC, 750 V, en canalización bajo tubo y montaje superficial, conduce una corriente de intensidad 30 A. Esta línea se deriva de una línea de mayor sección, protegida por un interruptor magnetotérmico de 50 A. Calcular:

a) Si la derivación está protegida por el interruptor magnetotérmico.

b) Calibre del fusible necesario para la protección.

Solución: a) No, por ser el calibre superior a la intensidad permitida por el conductor, 36 A; b) 32 A.

5.10-3 Un cable tetrapolar de cobre, aislado con XLPE, 0,6/1 kV, de sección 16 mm^2, en instalación interior y montaje superficial sobre pared, se utiliza para alimentar a 400 V, 50 Hz, una potencia de 30 kW, con factor de potencia 0,86. Calcular:

a) Intensidad que circulará por el cable.

b) Calibre del interruptor automático para proteger el cable contra sobrecargas.

Solución: a) 50,4 A; b) 63 A

5.10-4 Un interruptor automático de intensidad nominal 125 A y relé térmico regulable contra sobrecargas entre 94 y 125 A, se utiliza para la protección contra sobrecargas de una línea, formada por cable tetrapolar de cobre aislado con XLPE a 1 000 V en

© Ediciones Paraninfo

instalación enterrada bajo tubo. La sección del conductor es de 25 mm^2. La instalación consume una potencia de 55 kW a 400 V, 50 Hz, con factor de potencia 0,9. Calcular:

a) Intensidad permitida por el conductor según la instrucción ITC-BT-07.
b) Caída de tensión en la línea de longitud 50 m.
c) Intensidad que circula por la línea.
d) Entre qué valores se puede regular el relé térmico.

Solución: a) 120 A; b) 4,91 V; c) 82,2 A; d) 94 a 120 A.

5.11. PROTECCIÓN DE LAS INSTALACIONES CONTRA CORTOCIRCUITOS

El cortocircuito es una conexión de poca impedancia entre dos puntos entre los que existe una diferencia de potencial, dando lugar a una corriente de intensidad muy elevada.

■ Causas de los cortocircuitos

Son principalmente fallos de aislamiento de la instalación o fallos en los receptores conectados, por avería o conexión incorrecta.

■ Efectos de los cortocircuitos

- Efectos térmicos: La corriente muy elevada produce calentamiento de los conductores por efecto Joule. En el cortocircuito, por su pequeña duración, el calor producido se utiliza exclusivamente en elevar la temperatura del conductor (que alcanza su temperatura máxima admisible en milisegundos) sin ceder calor al exterior, provocando la destrucción del conductor.
- Efectos electrodinámicos: Las fuerzas de atracción o de repulsión que aparecen entre conductores por efecto del campo magnético creado a su alrededor por la corriente que los recorre, son directamente proporcionales al producto de esas corrientes e inversamente proporcionales a la distancia entre los conductores. Las corrientes de cortocircuito, de valor muy elevado hacen que estas fuerzas electrodinámicas sean también elevadas, pudiendo destruir las barras de conexión.

■ Protección contra cortocircuitos

Se utilizan principalmente interruptores automáticos y fusibles, pudiendo utilizarse también la combinación de fusible-interruptor automático, y fusible-contactor-relé térmico.

La condición de protección es que el dispositivo de protección actúe, cortando la corriente de cortocircuito, antes de que la instalación resulte dañada por efecto térmico o electrodinámico.

En la *protección con interruptor automático*, los criterios de protección son:

- Poder de corte del interruptor mayor que la máxima intensidad de cortocircuito (cortocircuito al principio de la línea). $PdC > I_{ccmáx}$
- Intensidad de cortocircuito mínima (cortocircuito al final de la línea) mayor que la intensidad de regulación del disparador electromagnético. $I_{ccmín} > I_a$

© Ediciones Paraninfo

- El interruptor debe cortar la corriente de cortocircuito en un tiempo inferior a aquel que hace tomar al conductor una temperatura superior a su temperatura límite. Así en el cortocircuito el conductor no llegará a la temperatura máxima admisible. La intensidad de cortocircuito máxima debe ser menor que la intensidad que corresponde a la energía disipada admisible en el conductor $I_{ccmáx} < I_b$

La energía disipada admisible en el conductor $(I^2t)_{adm}$, puede calcularse en función de una constante K y de la sección s del conductor en mm^2. $(I^2t)_{adm} = K^2s^2$

La constante K depende del material conductor y del aislante. Los valores utilizados se indican en la tabla 2.16.

Calculada la energía disipada admisible en el conductor, llevando este valor a la curva característica de la energía disipada por el interruptor en cortocircuito (fig. 5.11) se obtiene el valor de la intensidad I_b.

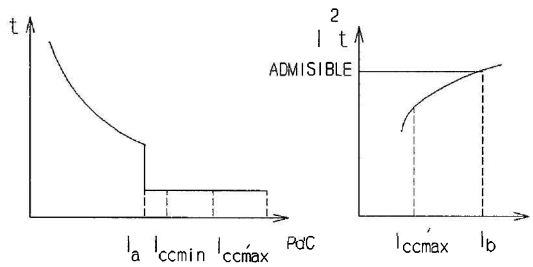


Fig. 5.11

En la *protección con fusible*, los criterios de protección son:

- Poder de corte del fusible mayor que la máxima intensidad de cortocircuito (cortocircuito al principio de la línea). $PdC > I_{ccmáx}$
- Intensidad de cortocircuito mínima (cortocircuito al final de la línea) mayor que la intensidad mínima a la que el fusible protege al conductor. $I_{ccmín} > I_a$

Los fusibles, por su rapidez de actuación, limitan mucho la energía disipada en cortocircuito. Deben escogerse de calibre ligeramente superior a la intensidad de utilización de la línea I_B.

La *protección mediante fusible-interruptor automático en serie*, se escoge en ocasiones por razones de economía. El fusible protege frente a cortocircuitos de gran intensidad, y el interruptor protege contra sobrecargas y cortocircuitos con intensidad de valor moderado.

La *protección mediante la combinación de fusible-contactor y relé térmico*, se utiliza en la protección de motores. El fusible protege contra cortocircuitos y el contactor con el relé térmico protegen contra sobrecargas. El fusible debe resistir sin fundirse la corriente de arranque del motor.

Los dispositivos de protección se sitúan en el origen de la instalación y en los puntos donde se produzca una reducción de la corriente admisible. Los dispositivos protegen la parte de la instalación situada a continuación de ellos siguiendo el sentido de la alimentación (aguas abajo).

© Ediciones Paraninfo

5.12. CÁLCULO DE LA INTENSIDAD DE CORTOCIRCUITO

En una línea trifásica el cortocircuito puede ser de los tipos:

- Cortocircuito trifásico, entre las tres fases.
- Cortocircuito entre dos fases.
- Cortocircuito entre fases y tierra.

El cortocircuito trifásico simétrico entre las tres fases es el que se utiliza para el cálculo, considerando el circuito equivalente de una fase.

El valor eficaz de la intensidad de cortocircuito simétrica I_{cc} es el cociente entre la tensión de fase de la red y la impedancia Z_{cc} del circuito de defecto.

$$I_{cc} = \frac{V_L}{\sqrt{3}\,Z_{cc}}$$

V_L: Tensión de línea.

Para A.T.la norma UNE EN 60909, considera la tensión multiplicada por 1,1.

El valor de la intensidad de pico o de choque I_s de la corriente inicial de cortocircuito es variable. Se puede calcular por un coeficiente de choque x, que depende de la relación entre la resistencia y reactancia de cortocircuito.

$$I_s = x\sqrt{2}\,I_{cc}$$

Considerando el valor 1,8 como más desfavorable $I_s = 1{,}8\sqrt{2}\;I_{cc} = 2{,}55 I_{cc}$

■ **Cálculo de la intensidad de cortocircuito en la red de distribución de M.T.**

La Empresa suministradora de energía indica la potencia de cortocircuito S_{cc} en el punto de conexión de la acometida en M.T. con la red de distribución. Esta potencia sirve de base para el cálculo de la intensidad de cortocircuito I_{cc}, como se indicó en el párrafo 2.15. Siendo V_L la tensión de línea de la red.

$$I_{cc} = \frac{S_{cc}}{\sqrt{3}\;V_L}$$

La impedancia por fase de la red de distribución, considerando invariable la tensión, se puede calcular en función de la potencia de cortocircuito.

$$Z_f = \frac{V_L/\sqrt{3}}{I_{cc}} = \frac{V_L \cdot V_L}{\sqrt{3}\cdot I_{cc}\cdot V_L} = \frac{V_L^2}{S_{cc}}$$

La intensidad de cortocircuito en un punto de la línea de acometida de M.T. se calcula sumando la impedancia de la acometida a la de la línea de distribución.

■ **Cálculo de la intensidad de cortocircuito en B.T.**

Se considera como caso más desfavorable que la impedancia de la línea de distribución es la del transformador de alimentación a la línea de B.T., de manera que el transformador mantendría la tensión de alimentación en cualquier condición de carga.

© Ediciones Paraninfo

La intensidad de cortocircuito en un punto de la red de B.T. se calcula sumando a la impedancia del transformador la impedancia de la red hasta el punto de defecto.

La impedancia de los conductores que forman la instalación viene dada por los fabricantes de los cables en función del tipo de cable y de su longitud.

5.13. ELECCIÓN DE UN INTERRUPTOR AUTOMÁTICO

Tal como se indicó en la protección general contra sobrecargas y cortocircuitos, en la elección del interruptor automático se siguen los siguientes criterios:

a) *Protección contra sobrecargas*. Eligiendo las relaciones:

$$I_B \leq I_n \leq I_Z \qquad I_2 \leq 1{,}45 I_Z$$

b) *Protección contra cortocircuitos*. Eligiendo las relaciones:

$$\text{PdC} > I_{ccmáx} \qquad I_{ccmín} > I_a$$

La condición de que el interruptor debe cortar la corriente de cortocircuito en un tiempo muy pequeño, para que en el cortocircuito, el conductor no llegue a su temperatura máxima admisible, se cumple con los aparatos existentes, especialmente con el interruptor automático limitador.

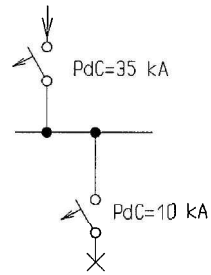


Fig. 5.12

Para la protección contra cortocircuitos los interruptores se colocan al principio de la instalación a proteger y en los puntos donde se produzca una reducción de la corriente admisible.

Para el interruptor automático de cabecera, en el secundario del transformador de distribución (en transformadores de 1 000 kVA o de menor potencia), es suficiente un poder de corte de 35 kA.

El interruptor automático secundario, colocado en serie con el interruptor de cabecera a través de la línea de enlace, debe tener un poder de corte mínimo de 10 kA (fig. 5.12).

5.14. SELECTIVIDAD EN LAS PROTECCIONES CONTRA SOBREINTENSIDADES

Existe selectividad entre dos dispositivos de protección contra sobreintensidades conectados en serie, si al producirse un defecto, desconecta el dispositivo situado más cerca del lugar donde se produjo, no afectando a la protección situada en el escalón superior (aguas arriba).

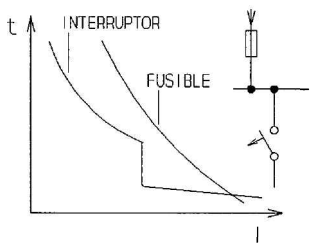


Fig. 5.13

- **Selectividad entre fusible situado en el escalón superior (aguas arriba) y el interruptor automático en el escalón inferior (aguas abajo)**

  1) *En sobrecarga*: hay selectividad si la corriente de actuación del fusible es superior a la intensidad de regulación del disparador electromagnético (I_a) del interruptor automático (fig. 5.13).

© Ediciones Paraninfo

2) *En cortocircuito*: hay selectividad si la intensidad de cortocircuito es inferior la corriente de fusión del fusible (en un tiempo de unos 0,01 s).

- **Selectividad entre interruptor automático situado en el escalón superior y el situado en el escalón inferior**

1) *En sobrecarga*: hay selectividad cuando el calibre del interruptor "aguas arriba" es superior al del interruptor situado en el escalón inferior o "aguas abajo" (si son del mismo tipo de curva de disparo). Se considera que existe selectividad cuando las intensidades nominales están en una relación aproximada de 1,6, como por ejemplo: 10, 16, 25, 40, 63, 100, 160, 250 A,...

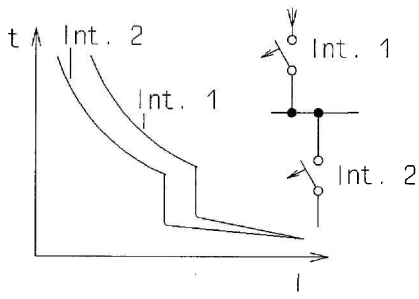


Fig. 5.14

2) *En cortocircuito*: hay selectividad si la intensidad de cortocircuito es inferior a la intensidad de regulación del disparador electromagnético (I_{al}) del interruptor automático situado en el escalón de protección superior o "aguas arriba" o que éste tenga un retardo en su tiempo de respuesta (fig.5.14).

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

5.14-1 En un punto de entronque con la red de M.T. de 20 kV, la potencia de cortocircuito, según la empresa suministradora de energía es de 500 MVA. Calcular:

a) Intensidad de cortocircuito en el punto de conexión.

b) Reactancia de la línea de alimentación hasta el punto de conexión, considerando la resistencia despreciable.

c) Intensidad de cortocircuito a 200 m del punto de entronque, si la línea de acometida en M.T. está formada por un cable tripolar de aluminio y tiene una resistencia máxima de 0,324 Ω/km y una reactancia de 0.109 Ω/km.

a) La intensidad de cortocircuito $I_{cc1} = \dfrac{S_{cc}}{\sqrt{3}\ V_L} = \dfrac{500 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 20\,000} = 14\,434$ A

b) La impedancia de la línea de distribución $Z_1 = \dfrac{V_L^2}{S_{cc}} = \dfrac{20\,000^2}{500 \cdot 10^6} = 0{,}8\ \Omega = X_1$

Según la norma UNE EN 60909 la reactancia de la línea se incrementa un 10% porque considera que la tensión no se mantiene en el cortocircuito. En el libro se considera la tensión constante para escoger la reactancia más desfavorable.

c) La resistencia de la línea de acometida en M.T. $R_2 = 0{,}324 \cdot 0{,}2 = 0{,}0648\ \Omega$
La reactancia $X_2 = 0{,}109 \cdot 0{,}2 = 0{,}0218\ \Omega$
La resistencia total de cortocircuito $R_{cc} = R_2 = 0{,}0648\ \Omega$
La reactancia total de cortocircuito $X_{cc} = X_1 + X_2 = 0{,}0648\ \Omega$
La intensidad de cortocircuito:

$$I_{cc} = \frac{20000}{\sqrt{3}\sqrt{R_{cc}^2 + X_{cc}^2}} = \frac{20000}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{0{,}0648^2 + 0{,}8218^2}} = 14007\ \text{A}$$

© Ediciones Paraninfo

5.14-2 Calcular la intensidad de cortocircuito de pico o de choque en un punto de entronque de una acometida en M.T. a 20 kV, si la potencia de cortocircuito en ese punto es de 400 MVA.

Solución: 29,4 kA.

5.14-3 Un transformador que alimenta a 400/230 V una línea de B.T. tiene de resistencia de cortocircuito 0,003 Ω y de reactancia de cortocircuito 0,007 Ω. Calcular:

a) Intensidad de cortocircuito de choque en los bornes del secundario del transformador.

b) Intensidad de cortocircuito en un punto de la línea de B.T. con una longitud de 40 m desde los bornes del secundario del transformador con cable tripolar de cobre, de resistencia 0,345 Ω/km y reactancia 0,119 Ω/km.

a) La intensidad de cortocircuito en bornes del secundario:

$$I_{cc1} = \frac{\frac{V_L}{\sqrt{3}}}{Z_{cc1}} = \frac{\frac{400}{\sqrt{3}}}{\sqrt{R_{cc}^2 + X_{cc}^2}} = \frac{230}{\sqrt{0{,}003^2 + 0{,}007^2}} = 30\,200 \text{ A}$$

La intensidad de choque $I_s = 2{,}55 I_{cc1} = 2{,}55 \cdot 30{,}2 = 77$ kA

b) La resistencia de la línea de B.T. $R_2 = 0{,}345 \cdot 0{,}04 = 0{,}0138\ \Omega$

La reactancia $X_2 = 0{,}119 \cdot 0{,}04 = 0{,}00476\ \Omega$

La resistencia total de cortocircuito $R_{cc} = R_1 + R_2 = 0{,}0168\ \Omega$

La reactancia total de cortocircuito $X_{cc} = X_1 + X_2 = 0{,}01176\ \Omega$

La intensidad de cortocircuito:

$$I_{cc2} = \frac{230}{\sqrt{R_{cc2}^2 + X_{cc2}^2}} = \frac{230}{\sqrt{0{,}0168^2 + 0{,}01176^2}} = 11\,216 \text{ A}$$

5.14-4 Calcular la intensidad de cortocircuito de choque en los bornes secundarios de un transformador 20/0,4 kV, si la resistencia de cortocircuito es de 0,0017 Ω y reactancia 0,0094 Ω.

Solución: 61,4 kA.

5.14-5 Una línea de longitud 150 m está formada por un cable tetrapolar de cobre 3x50+1x25 aislado con XLPE, 0,6/1 kV , en instalación bajo tubo empotrado en obra. La línea alimenta a 400/230 V, 50 Hz, una carga de 40 kW con factor de potencia 0,9. La reactancia de la línea de alimentación (aguas arriba) es de 0,024 Ω y resistencia despreciable. La resistencia del cable es de 0,502 Ω/km y la reactancia 0,078 Ω/km. Calcular:

a) Intensidad de cortocircuito al principio de la línea.

b) Intensidad de cortocircuito al final de la línea.

c) Intensidad máxima admisible en el conductor según la instrucción ITC-BT-19.

d) Intensidad que circula por la línea.

e) Características del interruptor automático de protección de la línea.

© Ediciones Paraninfo

a) La intensidad de cortocircuito:

$$I_{cc1} = \frac{230}{\sqrt{R_{cc2}{}^2 + X_{cc2}{}^2}} = \frac{230}{\sqrt{0^2 + 0{,}024^2}} = \frac{220}{0{,}024} = 9\,583 \text{ A}$$

b) La resistencia de la línea $R_2 = 0{,}502 \cdot 0{,}15 = 0{,}0753\ \Omega$

La reactancia $X_2 = 0{,}078 \cdot 0{,}15 = 0{,}0117\ \Omega$

La resistencia total de cortocircuito $R_{cc} = R_2 = 0{,}0753\ \Omega$

La reactancia total de cortocircuito $X_{cc} = X_1 + X_2 = 0{,}0357\ \Omega$

La intensidad de cortocircuito:

$$I_{cc2} = \frac{230}{\sqrt{R_{cc2}{}^2 + X_{cc2}{}^2}} = \frac{230}{\sqrt{0{,}0753^2 + 0{,}0357^2}} = 2\,760 \text{ A}$$

c) Según la norma UNE 20460 (tabla 2.10 del libro) la intensidad admisible es 133 A

d) La intensidad que circula $I_L = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot V_L \cdot \cos\varphi} = \frac{40\,000}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0{,}9} = 64{,}15 \text{ A}$

e) El interruptor debe cumplir las condiciones:

Para protección de sobrecargas $64{,}15 \leq I_n \leq 133$ A

El poder de corte del interruptor PdC > 9 583 A.

La intensidad de actuación magnética $I_a < 2\,760$ A

Se puede escoger un interruptor automático limitador de intensidad nominal 100 A, tensión nominal 400 V, 4 polos, poder de corte 50 kA, umbral de regulación por disparo térmico de 0,8-1I_n, umbral de disparo magnético fijo para intensidad menor o igual a $12I_n$.

Si el interruptor no es del tipo limitador habrá que comprobar la protección del conductor para que durante el cortocircuito no llegue a la temperatura máxima admisible. Si la constante del conductor para el cortocircuito K = 143.

$$(I^2t)_{adm} = K^2 \cdot s^2 = 143^2 \cdot 50^2 = 51{,}12 \cdot 10^6 \text{ A}^2 \cdot \text{s}$$

Sobre la curva de energía térmica del interruptor habría que verificar que la intensidad I_b, a la que corresponde esa energía es mayor que la de cortocircuito al principio de línea $I_b > 9\,583$ A

5.14-6 La instalación de una nave industrial está alimentada desde un centro de transformación a 400/230 V, 50 Hz. El transformador tiene una resistencia de cortocircuito de 0,005 Ω y una reactancia de 0,015 Ω. La línea de alimentación desde el secundario del transformador que alimenta el cuadro de B.T., trifásica, de sección 120 mm² y longitud 40 m, con conductores unipolares de aluminio aislados con XLPE, 0,6/1kV , en instalación bajo tubo empotrado en obra, tiene una resistencia de 0,324 Ω/km y reactancia 0,109 Ω/km. Calcular:

a) Corriente de cortocircuito en los bornes del secundario del transformador.
b) Corriente de cortocircuito al final de la línea de alimentación en B.T.
c) Características del interruptor automático de protección contra sobrecargas y cortocircuitos en el secundario del transformador si el consumo total de la instalación es 80 kW con factor de potencia 0,9 inductivo.

© Ediciones Paraninfo

d) Característica del magnetotérmico necesario para proteger la línea que partiendo del cuadro de B.T. está formada por 4 conductores unipolares de cobre de 10 mm² de sección, aislados con PVC, 750 V, en canalización empotrada en obra bajo tubo. Esta línea alimenta una carga de 6 kW con factor de potencia 0,86 inductivo.

Solución: a) 14,5 kA; b) 8,7 kA; c) $I_n = 160$ A, PdC > 14,5 kA, $I_a < 8{,}7$ kA; d) Intensidad nominal entre 16 y 32 A, poder de corte mayor de 8,7 kA.

5.15. PUESTA A TIERRA

Se denomina "puesta a tierra" a la conexión metálica de uno o varios puntos de una instalación a uno o varios electrodos enterrados, con el fin de permitir el paso a tierra de corrientes de fallo o descargas atmosféricas, evitando además que existan tensiones peligrosas entre la instalación y superficies próximas del terreno.

5.16. PARTES DE UNA PUESTA A TIERRA

Para protección contra contactos indirectos, las masas metálicas de los aparatos receptores deben estar en contacto con tierra. La puesta a tierra se divide en varias partes (fig. 5.15):

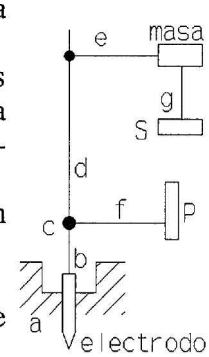


Fig. 5.15

a) Toma de tierra, formada por electrodos, que son masas metálica en contacto con el terreno. Si están colocados para otros fines se llaman naturales y si están colocados exclusivamente para toma de tierra se llama artificiales.
b) Conductor de tierra o línea de enlace con el electrodo (sección mínima para conductor de cobre 25 mm²).
c) Punto o borne de puesta a tierra.
d) Línea principal de tierra (sección mínima para conductor de cobre 16 mm², según ITC-BT-26).
e) Conductores de protección. Secciones mínimas según la sección de los conductores de fase (ITC-BT-18).
f) Conductor de unión equipotencial principal, que une el punto de puesta a tierra con la canalización metálica principal de agua P.
g) Conductor de equipotencialidad suplementaria, que une la masa con un elemento conductor S.

5.17. TIPOS DE ELECTRODOS UTILIZADOS EN LAS PUESTAS A TIERRA

Conductores:

- Conductor horizontal.
- Conductor en anillo.
- Conductores radiales.

Picas:

- Pica sencilla. Suele ser de acero recubierta de cobre, diámetro 1,4 cm y longitud 200 cm.

© Ediciones Paraninfo

- Picas empalmadas, mediante un manguito de acoplamiento, para conseguir mayor profundidad (fig.5.16).

Placas. Placas cuadradas o rectangulares de cobre o acero galvanizado, enterradas verticalmente, de superficie mayor de 0,5 m^2 (fig. 5.17).

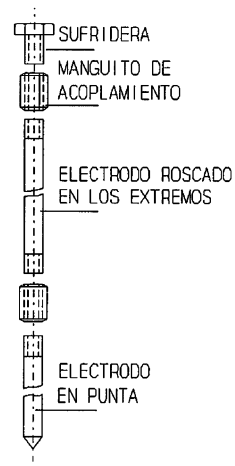


Fig. 5.16

5.18. CÁLCULO APROXIMADO DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA DE LOS ELECTRODOS

La resistencia de puesta a tierra puede calcularse de forma aproximada (ITC-BT-18), según la resistividad del terreno y el electrodo.

■ Resistividad del terreno

De forma aproximada, para los cálculos de la resistencia de tierra se pueden utilizar los valores de resistividad de la tabla siguiente:

Tabla 5.7

NATURALEZA DEL TERRENO	VALOR MEDIO DE LA RESISTIVIDAD (Ωm)
Terrenos cultivables y fértiles, terraplenes compactos y húmedos.	50
Terrenos cultivables poco fértiles, terraplenes.	500
Suelos pedregosos desnudos, arenas secas permeable.	3000

■ Resistencia de puesta a tierra de los electrodos

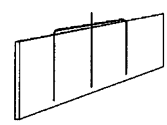


Fig. 5.17

- *Conductores enterrados horizontalmente*. Según la resistividad del terreno ρ_t (Ωm), la longitud L (m) de la zanja ocupada por el conductor, la resistencia R (Ω) de la toma de tierra es:

$$R = \frac{2\rho_t}{L}$$

- *Pica clavada verticalmente*. La resistencia R de la toma de tierra, se puede calcular aproximadamente, siendo L (m) la longitud de la pica enterrada es:

$$R = \frac{\rho_t}{L}$$

Cuando se colocan varias picas en paralelo, separadas una vez y media su longitud, la resistencia de la toma de tierra disminuye aproximadamente de forma que con dos picas la resistencia es la mitad de una sola, con tres picas un tercio de una sola, etc. El conductor de unión entre las picas hace también de electrodo.

- *Placa enterrada verticalmente*. La resistencia de la toma de tierra para una placa enterrada de perímetro P (m), se calcula aproximadamente por:

$$R = 0{,}8\frac{\rho_t}{P}$$

© Ediciones Paraninfo

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

5.18-1 Calcular la resistencia de tierra aproximada de una pica de longitud 2 m, en un terreno orgánico, de resistividad 60 Ωm.

La resistencia de tierra $R = \frac{\rho_t}{L} = \frac{60}{2} = 30\ \Omega$

5.18-2 Calcular la resistencia de tierra aproximada se obtiene en el terreno del problema anterior con tres picas de 2 m de longitud conectadas en paralelo.

La resistencia de tierra $R = \frac{30}{3} = 10\ \Omega$

5.18-3 Calcular qué longitud aproximada tendrá un electrodo de cobre sin aislamiento, de 35 mm² de sección, enterrado en un terreno arenoso de resistividad 50 Ωm, para que la resistencia de tierra sea de 10 Ω.

Solución: 10 m

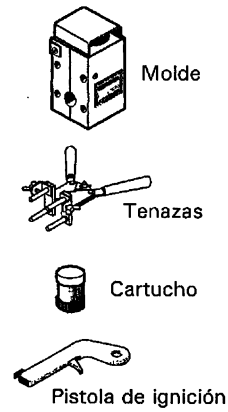


Fig. 5.18 Equipo de soldadura aluminotérmica. (Cortesía KLK).

5.18-4 Calcular la resistencia de tierra de una placa de cobre de 1x0,8 m, enterrada verticalmente en un terreno de resistividad 20 Ωm.

solución: 4,4 Ω

5.19. SOLDADURA ALUMINOTÉRMICA

Los empalmes, derivaciones y conexiones de la red de tierras se unen por soldadura aluminotérmica. Esta soldadura, de alto punto de fusión y buena conductividad, consiste en la reducción del óxido de cobre mediante aluminio en polvo, conseguiéndose así que el cobre metálico se funda y forme el material de aportación. Para iniciar la reacción es necesario elevar la temperatura mediante un cartucho que contiene el material que produce la ignición.

a) *Equipo de soldadura aluminotérmica*:

- Molde de grafito, con forma de paralepípedo (fig. 5.18), que mediante una tenaza o mango se abre por la mitad para introducir los extremos de los conductores a unir. En su interior está la cámara de soldadura (fig. 5.19), unida a la chimenea por donde bajará el cobre fundido y al crisol donde se produce la ignición.
- Cartucho cilíndrico de plástico que contiene el material de aportación (fundamentalmente óxido de cobre y aluminio en polvo) y de ignición.
- Disco de contención, de chapa metálica y forma circular que se coloca en el fondo del crisol, para evitar que toda la materia del cartucho caiga por la chimenea hacia la cámara de soldadura.
- Pistola de ignición, que mediante un chispazo sobre la materia del cartucho, inicia la reacción.

© Ediciones Paraninfo

b) *Realización de la soldadura*:

- Colocación de los extremos a unir en el molde, calentado previamente.
- Cerrar el mango, colocar el disco de contención y verter el contenido del cartucho en el crisol (fig. 5.19).
- Cerrar la tapa del molde e iniciar la reacción con la pistola de ignición.

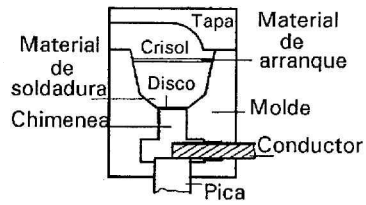


Fig. 5.19

Una vez realizada la soldadura se abre el molde y se limpia de escoria antes de la próxima conexión.

5.20. TENSIÓN DE PASO Y TENSIÓN DE CONTACTO

■ Tensión de paso

Es la tensión que debido a la toma de tierra puede existir entre dos puntos del terreno distantes entre sí un paso (1 m) y quedar aplicada entre los pies de una persona. Esta tensión es menor cuanto mayor sea la profundidad de enterramiento del electrodo de puesta a tierra.

La tensión de paso se mide haciendo pasar una corriente de intensidad I_p entre la toma de tierra T (fig. 5.20) y una tierra auxiliar A, separadas más de 20 m. Los electrodos de prueba P (zapatos), se colocan distanciados 1 m y conectados a una resistencia $R_h = 1\,000\ \Omega$ (resistencia aproximada del cuerpo humano). En bornes de esta resistencia se mide la tensión V.

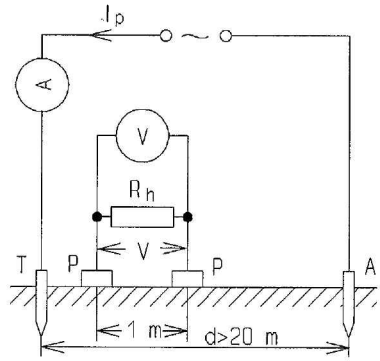


Fig. 5.20

La tensión de paso V_p, para una intensidad de defecto I_d se calcula: $V_p = V\dfrac{I_d}{I_p}$

Según el Reglamento sobre Centrales Eléctricas, Subestaciones y Centros de Transformación, instrucción 13 (MIE RAT 13), la corriente de prueba debe ser como mínimo igual al 1% de I_d, no inferior a 50 A para centrales y subestaciones y 5 A para centros de transformación. Los electrodos de prueba deben tener una superficie de contacto con el terreno de 200 cm^2 y ejercer sobre el suelo una fuerza de 250 N cada uno.

■ Tensión de contacto

Es la tensión a que puede estar sometida una persona al ponerse en contacto con estructuras metálicas de la instalación que normalmente están sin tensión.

Para la medida de la tensión de contacto se utilizan los mismos elementos que para la tensión de paso. Los electrodos de prueba separados unos 20 cm y conectados entre sí y a masa por medio de una resistencia de 1 000 Ω. Estos electro-

© Ediciones Paraninfo

dos deben estar separados de la parte metálica 1 m (fig. 5.21).

La tensión de contacto V_c, para una intensidad de defecto I_d, con una intensidad de prueba I_p y tensión en bornes de la resistencia V, se calcula igual que para la tensión de paso

$$V_c = V\frac{I_d}{I_p}$$

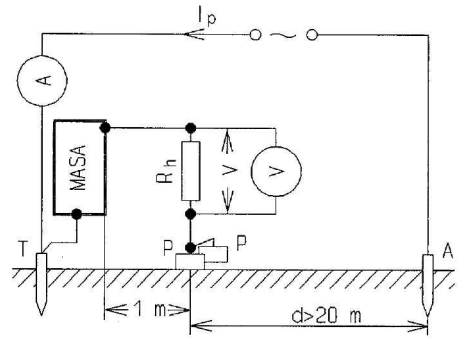


Fig. 5.21

5.21. MEDIDA DE UNA TOMA DE TIERRA

La resistencia de una toma de tierra se puede medir mediante el esquema de la figura 5.22. Se aplica una tensión alterna entre el electrodo de tierra P y una pica auxiliar B, midiendo la intensidad I que circula. Se mide a continuación la tensión V entre el electrodo de tierra y una pica sonda S colocada como mínimo a una distancia de 6 metros de los otros dos electrodos. El cociente entre la indicación del voltímetro y la del amperímetro nos da la resistencia de la toma de tierra.

$$R_T = \frac{V}{I}$$

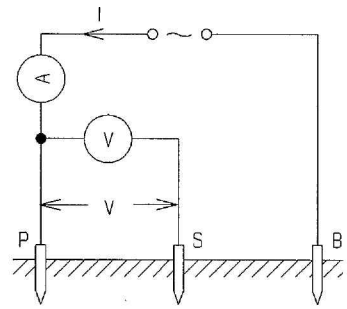


Fig. 5.22

Existen aparatos especiales, llamados teluróhmetros, para la medida de resistencia de las tomas de tierra. El más utilizado mide por comparación entre la intensidad que circula por la pica auxiliar y la intensidad que circula por la pica sonda. Está construido de tal modo que actuando sobre un reóstato hasta que el galvanómetro conectado a la pica sonda no indica el paso de corriente; la resistencia que indica el dial del reóstato es el valor de la resistencia de la toma de tierra. Actualmente se utilizan aparatos de medida digitales.

5.22. MEDIDA DE LA RESISTIVIDAD DEL TERRENO

Se utiliza un teluróhmetro con cuatro picas clavadas en el terreno en línea recta, a una distancia a (m) entre sí (fig.5.23). Maniobrando el dial del reóstato del aparato hasta que el galvanómetro del mismo indique valor nulo. Si en este caso la resistencia indicada en el dial es R (Ω), la resistividad del terreno (Ωm):

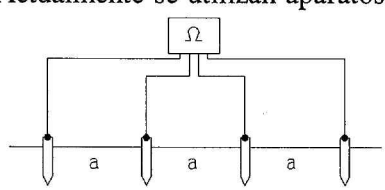


Fig. 5.23

$$\rho = 2\pi aR$$

© Ediciones Paraninfo

5.23. PELIGROSIDAD DE LA CORRIENTE ELÉCTRICA

■ Efectos fisiológicos

La circulación de la corriente por el cuerpo humano puede producir varios efectos:

- Agarrotamiento muscular. Contracción involuntaria de los músculos, al circular por ellos la corriente eléctrica.
- Alteraciones del ritmo cardíaco. Cuando la corriente circula a través del corazón.
- Fibrilación ventricular. Cuando la corriente excita las fibras de los ventrículos del corazón, produciendo un asincronismo completo. Es la causa mayor de muerte por accidente eléctrico.
- Quemaduras. Producidas en las partes del cuerpo en contacto con las piezas en tensión. Este efecto térmico es muy peligroso en media y alta tensión.

■ Límite de peligrosidad de la corriente eléctrica

Varios factores influyen en la peligrosidad de la corriente eléctrica:

- Valor eficaz de la corriente. Se considera peligrosa una corriente mayor de 10 mA.
- Frecuencia de la corriente. La corriente mas peligrosa es la de frecuencias comprendidas entre 10 y 100 Hz.
- Trayectoria de la corriente. El trayecto más peligroso es el que afecta directamente al corazón, de la mano izquierda al pecho.
- Duración de la descarga. La peligrosidad es mayor cuanto mayor es la duración de la descarga. La CEI (Comisión Electrotécnica Internacional) define la peligrosidad de la corriente para la frecuencia de 50 y 60 Hz mediante un gráfico tiempo-corriente (fig. 5.24).

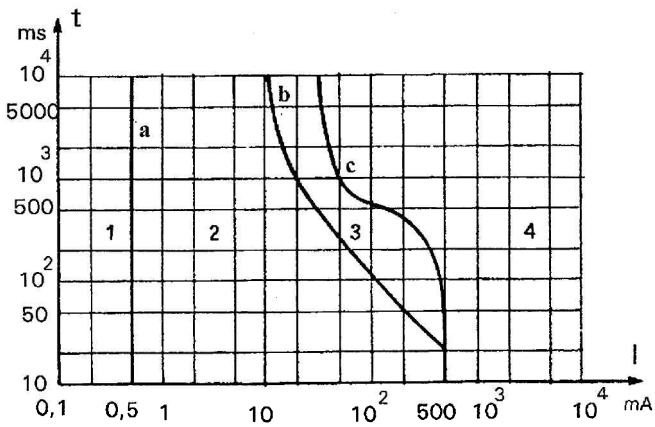


Fig. 5.24

© Ediciones Paraninfo

En el gráfico se distinguen cuatro zonas:
- Zona 1: Habitualmente ninguna reacción.
- Zona 2: Habitualmente ningún efecto peligroso.
- Zona 3: Efectos fisiológicos generalmente reversibles, como contracciones musculares, dificultades respiratorias y alteraciones del ritmo cardíaco.
- Zona 4: Efectos fisiológicos como los de la zona 3 y probable fibrilación ventricular. Pueden presentarse quemaduras graves con el aumento de intensidad y del tiempo de exposición.

■ **Limite de peligrosidad de la tensión**

La impedancia o resistencia del cuerpo humano al paso de la corriente eléctrica es la suma de la impedancia interna del cuerpo y la impedancia de contacto con las partes en tensión. Depende de muchos factores. Su valor disminuye al aumentar la tensión de contacto.

Para una tensión de contacto de 230 V se considera como impedancia del cuerpo humano 1 000 Ω.

Se admite que la tensión de contacto que puede mantenerse indefinidamente sin peligro para el cuerpo humano es de 50 V en locales secos y 24 V en locales o emplazamientos conductores (ITC-BT-18).

■ **Tipos de contactos**

- Contacto directo. Contacto de personas o animales con una parte de la instalación normalmente bajo tensión (parte activa).
- Contacto indirecto. Contacto de personas o animales domésticos con partes que se han puesto bajo tensión como resultado de un fallo de aislamiento.

5.24. INTERRUPTOR DIFERENCIAL

Se utiliza cuando el neutro está unido directamente a tierra y está constituido esencialmente (fig. 5.25), por un núcleo magnético (a), bobinas conductoras (b) y bobina con dispositivo de corte (c).

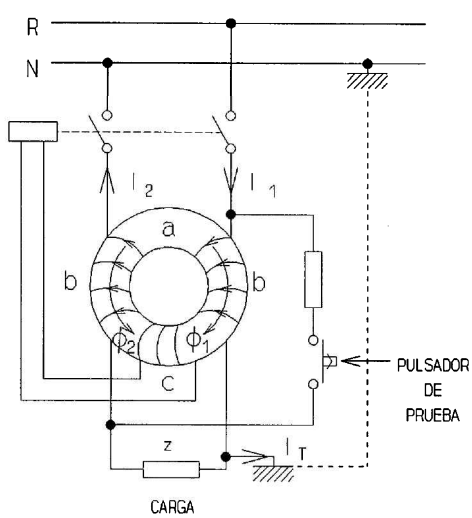


Fig. 5.25

Cuando la intensidad que circula por los dos conductores no es igual, por haber una fuga a tierra (I_T), el campo magnético resultante no es nulo, induciéndose una corriente en la bobina del dispositivo de corte, el cual actúa interrumpiendo el circuito. Se llama sensibilidad

© Ediciones Paraninfo

del diferencial a la mínima intensidad de corriente de fuga a tierra $I_{\Delta N}$ para la que el aparato desconecta.

Se llaman de alta sensibilidad los interruptores diferenciales de sensibilidad menor o igual a 30 mA y de baja los de sensibilidad mayor de 30 mA (300 o 500 mA)

El interruptor diferencial tiene un poder de corte reducido (como máximo de 5 kA) por lo que debe estar protegido con interruptores automáticos o fusibles

Se utilizan también interruptores diferenciales trifásicos para las instalaciones trifásicas a tres o a cuatro hilos, pudiendo incorporar protección magnetotérmica en el mismo aparato (interruptor magnetotérmico diferencial).

Cuando se conectan dos o más interruptores diferenciales en serie, el interruptor de cabecera debe tener retardo de disparo para desconexión selectiva.

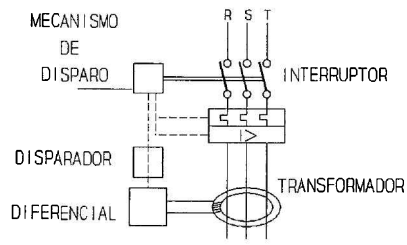


Fig. 5.26

En instalaciones de potencia elevada se utiliza el relé diferencial (fig. 5.26), que consiste en un transformador toroidal conectado a un relé, el cual actúa sobre un interruptor automático por un disparador indirecto.

5.25. PROTECCIÓN CONTRA CONTACTOS DIRECTOS

- **Protección total**

Protección frente a todo contacto directo (contacto de personas o animales con partes activas de la instalación) o indirecto (contacto con partes que se han puesto bajo tensión como resultado de un fallo de aislamiento). Consiste en la utilización de muy bajas tensiones de seguridad MBTS. Este sistema, en las condiciones establecidas por la norma UNE 20460-4-41, es válido para protección contra contactos directos e indirectos, sin utilizar otra medida de protección (ITC-BT-24).

- **Protección contra contactos directos**
  - Aislamiento de las partes activas. Recubrimiento con aislamiento que no pueda ser eliminado más que destruyéndolo.
  - Envolventes y barreras. Las partes activas instaladas con interposición de barreras o colocadas en el interior de envolventes, con el grado de protección indicada en la instrucción ITC-BT-24.

El grado de protección (UNE 20324) se indica con las letras IP seguidas de dos cifras características que indican: protección contra cuerpos sólidos, protección contra líquidos. Opcionalmente letras adicionales indican protección contra el acceso a partes peligrosas con la mano (A), dedo (B), herramienta (C) y alambre (D). Una segunda letra puede suministrar información suplementaria específica.

La protección mecánica al choque (UNE EN 50102) se señala con las letras IK y un número, expresando la energía de choque que resiste en Julios.

© Ediciones Paraninfo

La clasificación de los grados de protección se indican en la tabla siguiente:

Tabla 5.8

Nº	IP-1ª CIFRA: SÓLIDOS	IP-2ª CIFRA: LÍQUIDOS	Nº	IK-PROTECCIÓN MECÁNICA
0	Sin protección.	Sin protección.	0	Sin protección.
1	Protegido contra cuerpos sólidos superiores a 50 mm.	Protegido contra las caídas verticales de gotas de agua(condensación).	01	Energía de choque: 0,150 J
2	Protegido contra cuerpos sólidos superiores a 12,5 mm.	Protegido contra las caídas verticales de agua hasta 15° de la vertical.	02	Energía de choque: 0,200 J.
3	Protegido contra cuerpos sólidos superiores a 2,5 mm.	Protegido contra el agua de lluvia hasta 60° de la vertical.	03	Energía de choque: 0,350 J.
4	Protegido contra cuerpos sólidos superiores a 1 mm.	Protegido contra las proyecciones de agua en todas direcciones.	04	Energía de choque: 0,500 J.
5	Protegido contra el polvo (sin sedimentos perjudiciales).	Protegido contra el lanzamiento de agua en todas direcciones.	05	Energía de choque: 0,700 J.
6	totalmente protegido contra el polvo.	Protegido contra el lanzamiento de agua similar a los golpes de mar.	06	Energía de choque: 1,00 J.
7		Protegido contra la inmersión.	07	Energía de choque: 2,00 J.
8		Protegido contra los efectos prolongados de la inmersión bajo presión. ... m	08	Energía de choque: 5,00 J.
			09	Energía de choque: 15,00 J.
			10	Energía de choque: 20,00 J.

- Interposición de obstáculos. Sistema de separación como vallas o enrejados, que impidan todo contacto accidental con las partes activas de la instalación. No garantiza una protección completa y generalmente se utiliza en locales de servicio eléctrico solo accesibles a personal autorizado.
- Distanciamiento. Alejamiento de las partes activas de la instalación. Igual que la protección anterior, solo vale para impedir los contactos fortuitos con las partes activas y su uso está limitado en la practica a locales de servicio eléctrico solo accesibles a personal autorizado. En la figura 5.27 se indican los volúmenes de accesibilidad, dentro de los cuales no debe haber partes con distinta tensión accesibles a la vez.

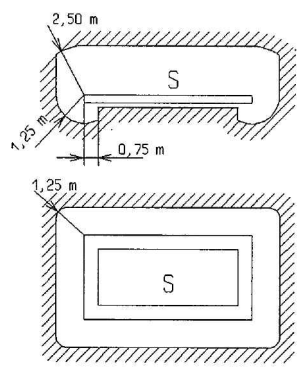


Fig. 5.27

© Ediciones Paraninfo

- Protección mediante interruptor diferencial de alta sensibilidad (menor o igual a 30 mA). Es una protección complementaria a otras medidas de protección contra contactos directos. Actúa cuando se produce un contacto directo o indirecto y la intensidad de defecto a tierra es mayor o igual a la sensibilidad. No actúa el diferencial cuando el contacto es entre dos fases o entre fase y neutro.

5.26. PROTECCIÓN CONTRA CONTACTOS INDIRECTOS

■ **Protección por separación eléctrica**. Consiste en la separación de circuitos de utilización y alimentación, habitualmente mediante un transformador de aislamiento. Las masas de los aparatos conectados deben unirse entre sí, pero no a tierra.

■ **Protección por empleo de equipos de clase II o por aislamiento equivalente**. Consiste en utilizar materiales, equipos y aparamenta con doble aislamiento o aislamiento reforzado (clase II de protección eléctrica). Los aparatos no se ponen a tierra y llevan el símbolo ⧈.[1]

■ **Protección en locales o emplazamientos no conductores**. Consiste en utilizar materiales de clase 0 (sin conexión a tierra), siempre que en condiciones normales las personas no hagan contacto simultáneo: entre dos masas o entre una masa y cualquier elemento conductor, si estos elementos pueden encontrarse a tensiones diferentes en caso de fallo del aislamiento principal de las partes activas. En estos locales o emplazamientos no debe estar previsto ningún conductor de protección.

■ **Protección mediante conexiones equipotenciales locales no conectadas a tierra**. Consiste en unir todas las masas y todos los elementos conductores que sean simultáneamente accesibles, mediante conexiones equipotenciales, que no debe conectarse a tierra, directa o indirectamente a través de masas o elementos conductores. Las personas que accedan al emplazamiento no deben estar sometidas a una diferencia de potencial peligrosa.

■ **Protección por corte automático de la alimentación.**

El corte de la alimentación a la instalación tiene por objeto evitar que como consecuencia de un fallo de aislamiento, se produzca un riesgo, debido al valor y a la duración de la tensión de contacto.

Estas medidas de protección dependen del esquema de distribución.

1) *Distribución TT.* El neutro conectado a tierra directamente y las masas conectadas a una toma de tierra separada mediante el conductor de protección (fig. 5.28). Es el esquema de la red de distribución pública de B.T. y el más utilizado en instalaciones interiores.

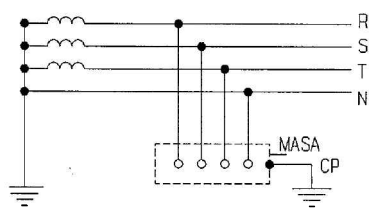


Fig. 5.28

[1] Ver tabla 9.6

© Ediciones Paraninfo

- Protección diferencial. Por interruptor diferencial o relé diferencial e interruptor automático.
  Todas las masas de los aparatos protegidos por el diferencial tienen que estar conectadas a la misma toma de tierra y la elección de la sensibilidad del interruptor diferencial debe cumplir la relación :

$$R_A \leq \frac{V}{I_{\Delta N}}$$

  $I_{\Delta N}$: Sensibilidad del interruptor diferencial (A).
  R_A: Resistencia de puesta a tierra de las masas (Ω)
  V: Tensión de seguridad (50 V en locales secos y 24 V en locales o emplazamientos conductores).
  En instalaciones de viviendas se utiliza el diferencial de alta sensibilidad (30 mA). En instalaciones industriales se suelen utilizar diferenciales de sensibilidad 300 mA y 500 mA.
  El interruptor diferencial protege frente a contactos indirectos a las instalación situada a continuación (aguas abajo).
- Protección frente a sobrecorrientes. Utilizando interruptores automáticos o fusibles. No se utiliza este sistema, porque para la actuación del aparato la intensidad de defecto debe ser muy grande, lo que implica resistencia de tierra de las masas muy pequeña (menor de 1 Ω).

2) *Distribución TN.* El neutro conectado a tierra directamente y las masas de la instalación conectadas al neutro mediante conductores de protección. Cuando el neutro y el conductor de protección son distintos en todo el esquema (fig. 5.29), se denomina TN-S. Cuando el neutro y el conductor de protección son un solo conductor en todo el esquema, se denomina TN-C, y TN-C-S, si solo están unidos en una parte del esquema.
Se utiliza esta distribución en algunas instalaciones industriales.

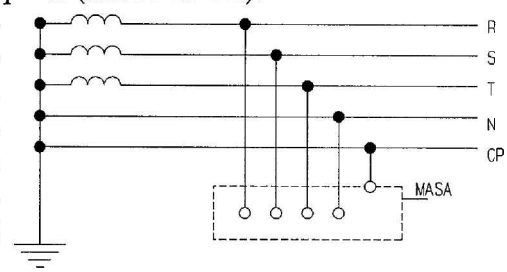


Fig. 5.29

- Protección frente a sobrecorrientes. Utilizando interruptores automáticos, magnetotérmicos o fusibles. El defecto a masa en esta distribución es como un cortocircuito entre fase y neutro.
  La intensidad que provoca la actuación del aparato de protección debe cumplir la relación:

$$Z_s \leq \frac{V_f}{I_a}$$

  I_a: Intensidad que provoca la actuación del aparato de protección (A).

© Ediciones Paraninfo

Z_s: Impedancia del circuito de defecto (Ω).
V_f: Tensión entre fase y neutro en el origen de la instalación (V).
El aparato que protege contra contactos indirectos protege también la instalación contra sobrecorrientes.

- Protección diferencial. Mediante interruptor diferencial o relé diferencial asociado a un interruptor automático. Se recomienda como protección complementaria el empleo de interruptor diferencial de alta sensibilidad, estableciendo la conexión del conductor neutro con el de protección aguas arriba del interruptor diferencial (ITC-BT-24).

3) *Distribución IT.* El neutro aislado de tierra o conectado a la misma a través de una elevada impedancia (fig. 5.30), con las masas de la instalación conectadas a tierra directamente. Se utiliza en instalaciones en las que es necesario mantener una elevada continuidad del servicio. En esta distribución, con un primer defecto fase-masa o fase tierra la intensidad de defecto es muy pequeña (solo por el efecto capacitivo entre conductores y tierra). La instalación puede seguir funcionando con la fase averiada en contacto con las masas. Un segundo fallo de aislamiento provoca un cortocircuito entre fases como en la distribución TN. La intensidad de defecto es elevada y debe actuar el aparato de protección desconectando la instalación.

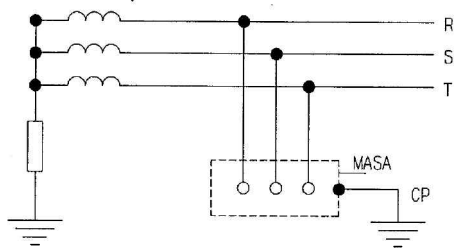


Fig. 5.30

Se utiliza en esta distribución un aparato llamado indicador o controlador de aislamiento. Consiste en un aparato que aplica una pequeña tensión continua o de baja frecuencia entre el neutro de la instalación y tierra. El aparato permite medir el nivel de aislamiento de la red a partir de la corriente que circula por el aparato en caso de defecto. Cuando existe un defecto de aislamiento, la intensidad que circula por el aparato hace actuar un dispositivo de alarma si el nivel de aislamiento desciende respecto a un valor seleccionado. Un valor de aislamiento, por debajo de otro valor prefijado por el usuario, hace actuar el interruptor automático que desconecta la instalación.

5.27. ELECCIÓN DE UN INTERRUPTOR DIFERENCIAL

Se elige según las características de la instalación.

- *Intensidad nominal* (I_N): Debe ser superior a la intensidad que circula por el conductor.
- *Sensibilidad* ($I_{\Delta N}$): Según las condiciones del local y la resistencia de puesta a tierra. Para instalaciones domésticas suelen usarse diferenciales de 30 mA

© Ediciones Paraninfo

y para otras instalaciones los diferenciales más usados son de sensibilidad 30 mA y 300 mA

Calibres de los pequeños interruptores diferenciales.

- Tensión nominal: 220, 380 V o 230, 400 V
- Sensibilidad: 10, 30, 300 mA
- Intensidad nominal: ..25, 40, 63, 80 A

Calibres de los interruptores diferenciales de potencia.

- Tensión nominal: 500 V
- Sensibilidad: 0,03, 0,3, 0,5, 1, 3 A
- Intensidad nominal: ..25, 40, 63, 100, 125, 160 A..

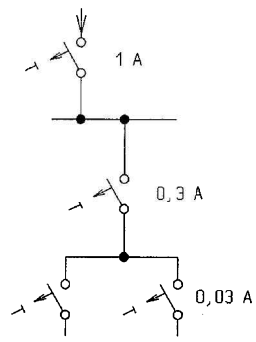


Fig. 5.31

Para grandes intensidades el elemento de disparo diferencial se acopla al interruptor automático de potencia, formando el interruptor magnetotérmico diferencial.

Se utilizan interruptores diferenciales específicos para corrientes pulsantes, bajas temperaturas, insensibilidad frente a perturbaciones atmosféricas y para selectividad.

5.28. SELECTIVIDAD ENTRE INTERRUPTORES DIFERENCIALES

Existe selectividad entre interruptores diferenciales conectados en serie cuando al producirse un defecto a tierra, desconecta el interruptor diferencial más cercano al mismo, quedando conectado el diferencial situado en el escalón superior o "aguas arriba".

Los interruptores diferenciales normales actúan casi instantáneamente. Los diferenciales *selectivos* (tipo S o retardados), tienen un tiempo de retardo antes del disparo prácticamente independientemente del valor de la corriente de defecto. Cuando existe selectividad el interruptor diferencial de sensibilidad 0,03 A desconecta antes que el de sensibilidad 0,3 A y éste antes que el de 1 A (fig. 5.31).

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

5.28-1 Se quiere proteger una línea secundaria en una instalación industrial con un diferencial de sensibilidad 500 mA, en local seco. La línea es trifásica con neutro y alimenta a 400 V una carga que consume 23 kW con factor de potencia 0,86. Calcular:

a) Intensidad que circula por la línea.

b) Intensidad nominal del interruptor diferencial.

c) Resistencia máxima de la toma de tierra.

a) La intensidad de corriente por la línea $I_L = \dfrac{P}{\sqrt{3}\cdot V_L \cdot \cos\varphi} = \dfrac{23\,000}{\sqrt{3}\cdot 400 \cdot 0{,}86} = 38{,}6$ A

b) La intensidad nominal debe ser superior a la que circula, como 63 A.

c) La resistencia máxima de la toma de tierra en local seco:

$$R_A \leq \frac{V}{I_{\Delta N}} = \frac{50}{0{,}5} = 100\ \Omega$$

© Ediciones Paraninfo

5.28-2 Calcular la máxima resistencia a tierra en un local mojado si la instalación está protegida contra contactos indirectos por un interruptor diferencial de 30 mA.

Solución: 800 Ω.

5.28-3 En un local seco la resistencia a tierra es de 120 Ω. Calcular el interruptor diferencial necesario para protección de una línea trifásica que alimenta a 400 V, 50 Hz, una carga de 15 kW con factor de potencia 0,8.

Solución: 300 mA, 40 A, 400 V

5.29. PROTECCIÓN DE LAS LÍNEAS ELÉCTRICAS

Las líneas deben estar protegidas contra sobrecargas, cortocircuitos y sobretensiones.

5.30. RELÉS DE PROTECCIÓN

Son aparatos que controlan una magnitud eléctrica y, que al variar ésta por encima o por debajo de un cierto valor, hacen actuar un interruptor (de forma instantánea o retardada) que desconecta la instalación.

Los relés de protección son de varios tipos según la magnitud que controlan:

a) *Relé de sobreintensidad.* Controla la intensidad que circula por el equipo protegido, puede ser:
   1) De tiempo independiente. Actúa siempre en el mismo tiempo cualquiera que sea el valor de intensidad que sobrepase el valor ajustado en el relé. Suelen ajustarse para que funcionen con un retardo de unos 0,3 s. Se utilizan en M.T. en líneas de poca longitud.
   2) De tiempo inverso. Actúa en función de la intensidad de corriente, de forma que cuanto mayor sea la sobreintensidad menor será el tiempo de actuación. Se utilizan en M.T. en líneas de gran longitud o en redes en malla.

b) *Relé de tensión.* Para protección de sobretensión y subtensión se utilizan relés que actúan según la tensión entre fases y que funcionan retardados entre 2 y 20 s, para dar tiempo a que los dispositivos reguladores de tensión actúen antes de desconectar la línea.

c) *Relé de vigilancia de contacto a tierra* (en redes de neutro aislado). En estas redes, si un conductor se conecta accidentalmente a tierra, cualquier nuevo contacto con tierra produciría una fallo de conexión.

d) *Relé detector de cortocircuito fase-tierra* (en redes de neutro conectado a tierra). En líneas de M.T, para detectar la conexión de una fase con tierra, que produce una corriente de retorno a través del terreno, de magnitud inferior al ajuste usual de las protecciones, se utiliza un relé de sobreintensidad conectado al neutro de la línea que actúa con un retardo entre 10 y 60 s. El relé genera una señal de alarma, procediéndose entonces a la localización de la avería.

© Ediciones Paraninfo

e) *Relé diferencial*, que detecta la corriente de defecto a tierra en una línea por comparación de las corrientes en sus dos extremos captadas mediante transformadores de intensidad.

f) *Relé de distancia*, que actúa con la intensidad de cortocircuito, siendo la rapidez de su actuación proporcional a la distancia al punto de cortocircuito. Se utiliza mucho en líneas de muy alta tensión.

Los sistemas de protección más utilizados actualmente son indirectos. En ellos las magnitudes a controlar (tensión, intensidad, temperatura, etc) se transforman en otros valores para hacer actuar el relé de protección. Se están utilizando sistemas electrónicos digitales.

5.31. PROTECCIÓN DE LAS LÍNEAS CONTRA SOBRECARGAS

Se utilizan relés de sobreintensidad, que actúan para un exceso de intensidad inferior a la de cortocircuito.

5.32. PROTECCIÓN DE LAS LÍNEAS DE DISTRIBUCIÓN CONTRA CORTOCIRCUITOS

Se suele utilizar:

a) *Interruptor automático o disyuntor*. Es un interruptor capaz de conectar o desconectar en funcionamiento normal la línea y también, en caso de cortocircuito, desconectar de forma automática mediante relés.

Según la forma de interrupción del arco que se forma en la conexión o desconexión, el interruptor puede ser:

- *Interruptores de pequeña potencia*. Sólo utilizan la separación rápida de los contactos para extinguir el arco.
- *Interruptores de soplado magnético*. En interruptores de potencia media se utiliza para extinguir el arco un campo magnético que lo desvía lateralmente.
- *Interruptores en baño de aceite*. La apertura y el cierre de contactos se hace en una cuba de aceite. Este sistema se utilizaba en potencias elevadas, pero está en desuso.
- *Interruptores de pequeño volumen de aceite*. Los gases originados por el arco en la cámara de aceite reaccionan sobre él, provocando su extinción. Se utiliza en potencias elevadas.
- *Interruptores de gas a presión*. El arco se extingue inyectando entre los contactos aire a presión o hexafluoruro de azufre. Se utiliza para grandes potencias.

Suelen utilizarse interruptores de reenganche automático que vuelven a conectar 0,2 o 0,4 s después de la desconexión por cortocircuito. Los equipos de reconexión automática en M.T. realizan una reconexión rápida (en un tiempo del orden de 1 s) y, si se produce la desconexión inmediata, otra conexión más retardada (a partir de unos 30 s).

© Ediciones Paraninfo

b) *Fusibles*. Desconectan el circuito pon efecto de sobreintensidad o cortocircuito, fundiéndose el elemento fusible. En los fusibles de A.T. la fusión se realiza en un recipiente con arena de cuarzo que extingue el arco y habitualmente llevan un dispositivo de señalización de fusión.

5.33. SOBRETENSIONES EN LAS LÍNEAS

Pueden ser:

1) *De origen externo*: descargas atmosféricas. El origen de estas descargas está en las cargas acumuladas en las nubes, que se cargan positivamente en las capas altas y negativamente en las bajas (fig. 5.32). Usualmente los rayos empiezan en la base de la nube con descarga entre nube y tierra. La intensidad de corriente del rayo alcanza su valor punta entre 1 y 2 μs y se reduce a la mitad en unos 40 μs. En el interior de la nube se producen descargas entre las cargas positivas y negativas.

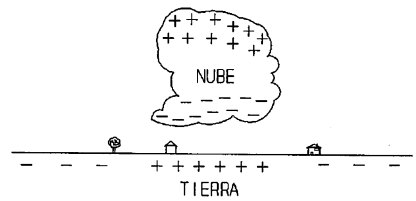


Fig. 5.32

Las descargas atmosféricas dan lugar en la línea aérea a dos ondas de frente escarpado (fig. 5.33), que avanzan velocidad próxima a la de la luz. La tensión máxima se alcanza en un tiempo del orden de 1 μs y disminuye su valor a la mitad en unos 50 μs. Los pararrayos autoválvulas están construidos para cortar los picos de tensión que sobrepasen un cierto nivel, y los aparatos protegidos por estas autoválvulas están preparados para poder soportar tensiones de impulsos algo superiores a las de corte del pararrayos.

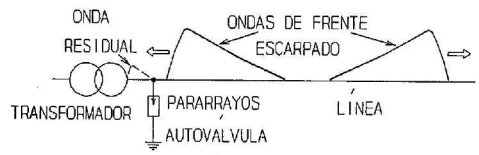


Fig. 5.33

Para diseñar los aparatos que pueden estar sometidos a impulsos de tensión por ondas de frente escarpado, y con objeto de ensayarlos frente a estas ondas, se define la forma de los impulsos y su valor de pico. Así, una onda de impulso normalizada (fig. 5.34), adquiere su valor máximo en un tiempo de 1,2 μs y desciende a la mitad de ese valor en 50 μs.

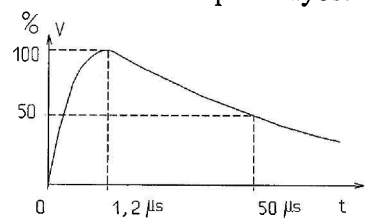


Fig. 5.34

Cuando la instalación incluye o se alimenta por una línea aérea se considera necesaria una protección contra sobretensiones de origen atmosférico en el origen de la instalación (ITC-BT-23).

2) *De origen interno*. Debidas a maniobras de conexión y desconexión, variaciones bruscas de carga y sobretensiones de servicio (fenómenos de resonancia, conexión de cargas capacitivas a transformadores, rotura de conductor neutro en redes trifásicas desequilibradas, etc.).

© Ediciones Paraninfo

5.34. PROTECCIÓN DE LAS LÍNEAS DE DISTRIBUCIÓN CONTRA SOBRETENSIONES

Los dispositivos más utilizados son:

a) *Cable de puesta a tierra.* Conductor sin aislamiento tendido sobre la línea y unido directamente a tierra. Se utiliza en líneas de primera categoría (muy altas tensiones) y su función es interceptar los rayos para que no alcancen los conductores activos. Son cables de acero que se conectan directamente al apoyo (artículo 9 del RLAT). En algunos casos es necesario más de un cable de tierra sobre la línea para que la protección sea eficaz.

b) *Pararrayos o descargadores.* Los más utilizados son las autoválvulas de óxidos metálicos, que consisten en una resistencia variable con la tensión, unida a tierra. La sobretensión hace disminuir el valor de la resistencia. Cuando la tensión sobrepasa un valor umbral, la autoválvula pasa al estado de conducción estableciendo contacto con tierra. Las autoválvulas deben montarse lo más cerca posible del aparato a proteger y la toma de tierra debe tener una resistencia reducida (menos de 10 Ω).

5.35. MEDIDA DEL AISLAMIENTO DE UNA LÍNEA

El aislamiento de una línea se mide con el megóhmetro. Se realizan dos medidas (fig. 5.35):

1) Medida de la resistencia entre cada dos conductores.
2) Medida de resistencia entre cada conductor y tierra.

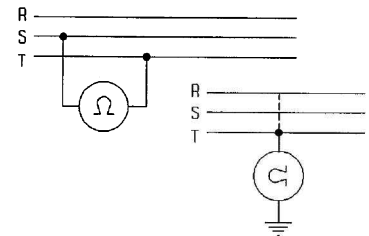


Fig. 5.35

5.36. MEDIDAS DE SEGURIDAD PARA TRABAJOS SIN TENSIÓN

Las medidas utilizadas en instalaciones eléctricas de alta tensión, según la Ordenanza General de Seguridad e Higiene en el Trabajo, son:

1) Abrir con corte visible todas las fuentes de tensión, mediante interruptores y seccionadores, que aseguren la imposibilidad de su cierre intempestivo.
2) Bloquear o enclavar, si es posible, los aparatos de corte en la posición de abiertos.
3) Comprobar la ausencia de tensión.
4) Poner a tierra y en cortocircuito todas las posibles fuentes de tensión.
5) Señalizar la zona de trabajo.

5.37. TRABAJOS EN TENSIÓN

Con objeto de reparar averías sin desconectar la línea de alta tensión, se realizan trabajos en tensión.

Pueden utilizarse varios métodos según el tipo de trabajo:

© Ediciones Paraninfo

- Trabajos en contacto. El operario va provisto de herramientas aislantes. Se utiliza en líneas de B.T.
- Trabajos a distancia. El operario se mantiene a una distancia de seguridad de los elementos en tensión maniobrando mediante pértigas y herramientas especiales. Se utiliza en M.T.
- Trabajos a potencial. El operario se conecta al potencial del elemento sobre el que va a trabajar, no conservando por ello distancia de seguridad y trabajando con herramientas comunes. Se utiliza en muy alta tensión.

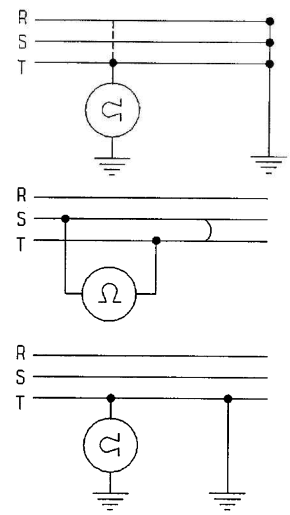


Fig. 5.36

5.38. DETERMINACIÓN DE AVERÍAS EN LAS LÍNEAS

Las averías de una línea son (fig. 5.36):

- Conductor sin continuidad. Se determina midiendo la resistencia entre cada uno de los conductores y tierra por un extremo mientras que por el otro los conductores se conectan entre sí a tierra. La resistencia respecto a tierra del conductor cortado es mucho mayor que la de los demás conductores.
- Contacto entre conductores. Se determina midiendo la resistencia entre cada dos conductores. La resistencia entre los conductores en contacto es muy pequeña.
- Contacto entre conductor y tierra. Se determina midiendo la resistencia entre cada conductor y tierra, que debe tener un valor muy pequeño.

5.39. LOCALIZACIÓN DE AVERÍAS EN LAS LÍNEAS

la localización de las averías se hace en dos fases:

1) *Prelocalización*, mediante puentes de medida.

   Son muy usados:

   - Puente de Wheatstone. Se utiliza para contactos entre conductores, efectuándose la medida desde los dos extremos (fig. 5.37).

     Cuando el primer puente está en equilibrio:

$$R_1 \cdot R_3 = R_2 \cdot (R_x + 2R_l)$$

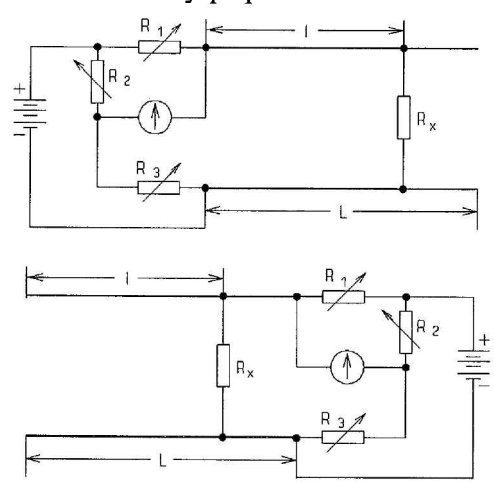


Fig. 5.37

En el equilibrio del segundo puente $R_1 \cdot R_3 = R_2 \cdot [R_x + (2R_L - 2R_l)]$

© Ediciones Paraninfo

Todos los datos son conocidos, menos R_x y R_l que se obtienen por las ecuaciones anteriores.

Entonces $l=\dfrac{R_l \cdot s}{\rho}$

Conociendo la resistencia específica del conductor en Ω/km

$$l(\text{km})=\frac{R_l(\Omega)}{R(\Omega/\text{km})}$$

- Puente de Murray. Se utiliza para localización de contacto entre conductor y tierra. Se conectan en cortocircuito un extremo del conductor defectuoso y otro en perfecto estado (fig. 5.38).
  Desplazando el cursor sobre el hilo MN hasta que se alcance el equilibrio del puente, siendo los dos conductores de igual sección y material:

  $$l \cdot b=[L+(L-l)] \cdot a$$

  De donde $l \cdot b=2La-la$; $\quad l=2L\dfrac{a}{a+b}$

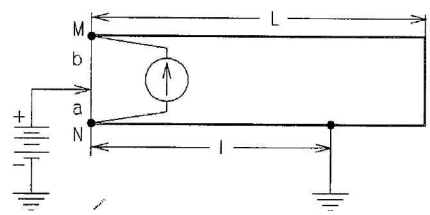


Fig. 5.38

- Puente de medida en C.A. Se utiliza para conductor cortado sin cortocircuito ni contacto con tierra. Se aprovecha el efecto de capacidad entre estos conductores y tierra (fig. 5.39). Desplazando el cursor sobre el hilo MN hasta que el puente está en equilibrio (auricular T con sonido mínimo); se verifica:

  $$l=2L\frac{b}{a+b}$$

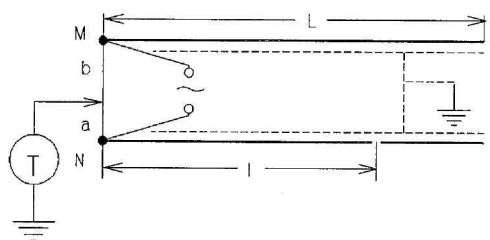


Fig. 5.39

  Si se conoce las capacidades del conductor cortado C_x y del conductor en buen estado C:

  $$l=L\frac{C_x}{C}$$

2) *Localización final*. Con varios aparatos:
   - *Ecómetro o reflector de impulsos*. Se somete al conductor a unos impulsos de tensión que son reflejados por los puntos defectuosos y registrados en un osciloscopio. En el aparato se puede leer la distancia al punto defectuoso o el tiempo de reflexión (entonces se halla la distancia conociendo la velocidad de propagación sobre otro cable idéntico).
   - *Detector acústico*. Basado en la detección de señales acústicas en el punto defectuoso del cable.

© Ediciones Paraninfo

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

5.39-1 Calcular la distancia desde el extremo de un conductor a una derivación a tierra. El cable tiene una longitud de 350 m y el resto de los conductores están en buen estado. Aplicando el puente de Murray se obtienen los siguientes valores: a=12 divisiones y b=28 divisiones.

La distancia desde el extremo en el que se mide: $l=2L\frac{a}{a+b}=2\cdot350\cdot\frac{12}{40}=210\text{ m}$

5.39-2 Uno de los conductores que forman una línea subterránea de 1 800 m se halla cortado en un punto. Calcular la distancia del extremo desde donde se efectúa la medida se encuentra el corte, sabiendo que len un puente de capacidades a=30 divisiones y b=10 divisiones.

Solución: 900 m.

5.39-3 Una línea de distribución de 2 100 m tiene un conductor cortado. Calcular a qué distancia del extremo de medida se encuentra el defecto si los valores hallados midiendo la capacidad de son: para el cable cortado 0,08 μF y para cable en buen estado 0,12 μF.

Solución: 1 400 m.

5.40. VERIFICACIONES E INSPECCIONES EN LAS LÍNEAS DE AT

Cuando la línea es propiedad de la empresa de distribución de energía, la verificación previa a la puesta en servicio y la verificación obligatoria cada tres años la realiza la propia empresa, que emitirá un acta de verificación.

Cuando la línea no es propiedad de la empresa de distribución, la verificación previa a la puesta en servicio la realiza la empresa instaladora autorizada que la ejecute. La verificación periódica, cada tres años las realizan técnicos titulados competentes.

En líneas subterráneas se realizará la comprobación del aislamiento principal y de la cubierta. En las líneas aéreas y en las subterráneas con cables aislados instalados en galerías visitables, se realizará la medida de resistencia del circuito de puesta a tierra (ITC-LAT-05).

Las líneas de tensión nominal superior a 30 kV deben tener además inspección inicial y periódica, por organismo de control autorizado.

La calificación de una línea, como consecuencia de verificación o inspección, puede ser: favorable, condicionada o negativa. Los defectos se clasifican como muy graves, graves o leves, según la ITC-LAT-05. Esto queda reflejado en el acta de verificación o en el certificado de inspección.

5.41. MANTENIMIENTO DE LÍNEAS AÉREAS

a) *Mantenimiento de los apoyos*:

- Los apoyos de madera deben ser vigilados respecto a putrefacción, introduciendo barrenas en ellos. Se procede a su reforzamiento o a su cambio.

© Ediciones Paraninfo

- Los apoyos de hormigón necesitan protegerse contra suelos y aguas que los ataquen.
- Los apoyos metálicos deben ser protegidos contra la corrosión, mediante pinturas. Suelen utilizarse galvanizados.

b) *Mantenimiento de los aisladores*. Debe cuidarse su limpieza y la protección de sus partes metálicas contra la corrosión.

c) *Mantenimiento de los conductores*. En los conductores deben vigilarse las vibraciones que pueden provocar rotura. Se utilizan antivibradores.
Para la vigilancia del estado de los aisladores y conductores es muy empleado el pirómetro de radiación, que detecta el calentamiento del elemento a vigilar cuando se enfoca sobre éste.

5.42. MANTENIMIENTO Y AVERÍAS EN LAS LÍNEAS SUBTERRÁNEAS

a) *Mantenimiento*.
Las pruebas de recepción de la instalación, para verificar la calidad técnica de la misma, tienen su continuidad en las verificaciones periódicas de mantenimiento, para prevenir averías. Consisten en la realización de las siguientes mediciones:

1) Medida de resistencia de aislamiento. Se utiliza un megóhmetro, conectando el borne positivo al conductor a medir y el negativo a la pantalla del cable y al sistema de puesta a tierra. Después de efectuada la medida se descarga el cable poniendo el conductor a tierra.
2) Medida de la resistencia de los conductores. Se utiliza un puente de medida, uniendo dos conductores por un externo y midiendo la resistencia desde el otro. La resistencia de cada conductor será la mitad de la medida efectuada.
3) Medida de la capacidad. Se mide la capacidad del cable de campo radial respecto a la pantalla metálica puesta a tierra, y en los cables de campo no radial entre un conductor y todos los demás unidos entre sí y a la cubierta metálica puesta a tierra.
4) Ensayo de tensión. Se realiza aplicando una tensión continua o una tensión alterna a la frecuencia de 50 Hz durante cinco minutos, en los cables unipolares entre el conductor y la cubierta metálica, y en los cables multipolares entre conductor y todos los demás puestos en contacto con la cubierta metálica y tierra. La tensión de ensayo en corriente alterna (para cables de M.T.) será de 2,5 veces la tensión nominal más pequeña, y de 2,4 para el ensayo en corriente continua. Si durante el ensayo se observa un aumento brusco de intensidad de corriente se debe repetir el ensayo, porque indicará la perforación de cable. Después del ensayo el cable se conecta a tierra para descargarlo.

© Ediciones Paraninfo

b) *Localización de averías.*

Para la *prelocalización* de averías se utilizan los métodos clásicos:

- Puente de Murray, para conductor no interrumpido y contacto entre conductor y tierra o entre conductores.
- Puente de capacidad cuando el conductor está interrumpido en el punto defectuoso.

Para la *localización final* de averías se utilizan fundamentalmente dos métodos:

- Reflector de impulsos o ecómetro. basado en la reflexión de cortos impulsos de tensión eléctricos enviados a lo largo del cable. El tiempo transcurrido entre el envío de un impulso y la llegada del impulso reflejado en el punto de defecto da la distancia a ese punto. Una pantalla suministra información sobre sí el defecto es conductor interrumpido (circuito abierto) o cortocircuito.
- Detector acústico por emisor de audiofrecuencia. El emisor se conecta al cable y un receptor portátil se desplaza sobre la canalización. La variación de intensidad del sonido indica los puntos de defecto. Se va colocando el receptor sobre el suelo en la proximidad del punto de defecto. Sobre este punto es máxima la intensidad del sonido.

PROBLEMAS DE RECAPITULACIÓN

P.5-1 Una línea de B.T. está formada por 4 conductores unipolares de cobre, de sección 10 mm^2, aislados con PVC, canalización bajo tubo empotrado en obra a 40 °C. Calcular:

a) Intensidad admisible por los conductores.
b) Calibre del magnetotérmico necesario para proteger la línea contra sobrecargas si la potencia de consumo a 400 V, 50 Hz es de 10 kW, con factor de potencia 0,86 inductivo.

Solución: a) 44 A; b) 20-32 A.

P.5-2 Para la protección contra sobrecargas de una línea de distribución, formada por cuatro conductores de aluminio 3x95+1x50 aislados con XLPE, 0,6/1 kV en instalación enterrada bajo tubo, se utiliza un interruptor automático de intensidad nominal $I_n = 160$ A y relé térmico regulable contra sobrecargas entre $0{,}7I_n$ e I_n. La instalación consume una potencia de 60 kW a 400 V, 50 Hz, factor de potencia 0,9. Calcular:

a) Intensidad permitida por el conducto.
b) Intensidad que circula por la línea.
c) Valor de regulación del relé térmico.

Solución: a) 175 A; b) 96,2 A; c) 112 A.

© Ediciones Paraninfo

P.5-3 Para alimentar un edificio industrial se utiliza una acometida en M.T. a 20 kV. En el punto de entronque con la red de M.T., la potencia de cortocircuito, según la empresa suministradora de energía es de 420 MVA. Calcular:

a) Intensidad de cortocircuito en el punto de conexión.
b) Reactancia de la línea de alimentación hasta el punto de conexión, considerando la resistencia despreciable.
c) Intensidad de cortocircuito a 50 m del punto de entronque, si la línea de acometida en M.T. está formada por 3 cables de aluminio con una resistencia máxima de 0,3 Ω/km y una reactancia de 0.1 Ω/km.

Solución: a) 12,1 kA; b) 0,952 Ω; c) 12,06 kA.

P.5-4 Un transformador de un centro de transformación 20/0,4 kV, tiene de resistencia de cortocircuito 0,003 Ω y de reactancia 0,007 Ω, referidas al secundario. La resistencia de una línea que parte de las barras de distribución en B.T. es de 0,019 Ω y la reactancia 0,004 Ω. Calcular:

a) Intensidad de cortocircuito en los bornes del secundario del transformador, despreciando la impedancia de la línea de alimentación en M.T.
b) Intensidad de cortocircuito al final de la línea secundaria.

Solución: a) 30,3 kA; b) 9,4 kA.

P.5-5 Una línea está formada por cuatro conductores unipolares de cobre 3x25+1x16 aislados con XLPE, 0,6/1 kV , en instalación empotrada en obra bajo tubo. La línea alimenta a 400/230 V, 50 Hz, una carga de 24 kW con factor de potencia 0,8. La resistencia de la línea de alimentación aguas arriba es de 0,04 Ω y reactancia 0,02 Ω. La resistencia de la línea es de 0,051 Ω y reactancia despreciable. Calcular:

a) Intensidad de cortocircuito al principio de la línea.
b) Intensidad de cortocircuito al final de la línea.
c) Intensidad máxima admisible en el conductor según la instrucción ITC-BT-19, norma UNE 20460-5-523: 2004.
d) Intensidad que circula por la línea.
e) Características del interruptor automático de protección de la línea.

Solución: a) 5,14 kA; b) 2,47 kA; c) 95 A; d) 43,3 A; e) I_n=50-80 A, PdC≥6 kA

P.5-6 Calcular la resistencia de tierra aproximada tendrá un electrodo de cobre sin aislamiento, de 35 mm^2 de sección y longitud 8 m, enterrado en un terreno arenoso de resistividad 60 Ωm.

Solución: 15 Ω.

P.5-7 Calcular el interruptor diferencial necesario para protección de una línea trifásica que alimenta a 400 V, 50 Hz, una carga de 22 kW con factor de potencia 0,8, en un local seco si la resistencia a tierra es de 110 Ω.

Solución: 300 mA, 63 A, 400 V.

© Ediciones Paraninfo

6 CENTROS DE TRANSFORMACIÓN

6.1. CENTRO DE TRANSFORMACIÓN

Es una instalación que mediante transformadores reduce la media tensión de las líneas de distribución de energía eléctrica, a baja tensión de las líneas de distribución o de utilización, que alimentan a edificios e industrias.

Según su *emplazamiento* los C.T. se pueden clasificar en:

1) *De intemperie o exteriores*. Son centros de transformación sobre postes. La aparamenta y el transformador se colocan sobre apoyos metálicos o de hormigón.
2) *De interiores*. En el interior de edificios, que según el local pueden ser:
   - En el interior de edificios dedicados a otros usos, en local destinado al efecto.
   - En edificio independiente. Que según la colocación pueden ser de superficie, semienterrados o subterráneos. Actualmente estos edificios son prefabricados.

Según su *disposición constructiva* los centros de transformación instalados en locales pueden ser:

1) *Abiertos*. Los recintos o celdas en las que se colocan los elementos que forman el C.T. están separados por tabiques y pueden ir abiertas o con cierre frontal.
2) De *celdas metálicas prefabricadas*. Son conjuntos de aparamenta con envolvente metálica.
3) *Compactos*. La aparamenta del C.T. están en una única celda compacta con aislamiento de exafluoruro de azufre, ocupando muy poco espacio.

Según la *conexión de los C.T. a la línea de distribución de M.T.* que les suministra la energía eléctrica, se pueden clasificar en:

1) *Simple derivación o "en antena"*. De la línea de M.T., que parte de una subestación reductora de alta a media tensión, se van conectando directamente los centros de transformación. Es la distribución utilizada generalmente en zonas rurales.
2) *En anillo*. En una red en anillo de M.T., en cada C.T. se colocan dos interruptores, uno de entrada y otro de salida de la línea. Este interruptor de salida conecta con el de entrada de otro C.T. y así sucesivamente, hasta volver a la subestación reductora que alimenta la línea de M.T.
3) *En doble derivación*. El C.T. está conectado, por medio de dos interruptores

© Ediciones Paraninfo

a líneas de M.T. que proceden de dos subestaciones distintas. Esta disposición permite tener funcionando el C.T. aunque exista avería en una de las líneas de alimentación.

Según la *utilización de los C.T.* se clasifican en:

1) *Centros de distribución.* Son propiedad de la empresa suministradora de energía. Desde ellos se alimenta en B.T. a los abonados.
2) *Centros de abonado.* Son propiedad del cliente o abonado al consumo de energía eléctrica. En algunos casos el mantenimiento del C.T. lo lleva la empresa suministradora y pasa a ser de su propiedad al acabo de un tiempo. Disponen de equipo de medida de la energía consumida, y según la localización de este equipo, pueden ser de dos formas:
   - Con medida en B.T., que suelen ser de tipo intemperie sobre apoyo.
   - Con medida en A.T., que suelen ser interiores, con celda de medida, donde se localizan los transformadores de tensión e intensidad que conectan el equipo de medida de energía.

6.2. RÉGIMEN DE NEUTRO EN EL C.T.

a) *Régimen TT.* El neutro del transformador y las masas de los aparatos de utilización conectados a tomas de tierra. Es el sistema usado en viviendas y edificios, según el REBT. Un interruptor diferencial desconecta la instalación cuando existe un defecto a tierra.

b) *Régimen TN.* El neutro del transformador conectado a tierra y las masas de la instalación conectadas al neutro mediante conductores de protección.

c) *Régimen IT.* El neutro del transformador está aislado o conectado a tierra a través de una impedancia elevada (unos 2 000 Ω) y las masas de los aparatos se conectan a tierra. Las empresas pueden optar por esta disposición, con un sistema que controle el aislamiento de la instalación respecto a tierra. Con un primer defecto el controlador emite un aviso, y con un segundo defecto desconecta la instalación. Este sistema permite mantener mejor la continuidad del servicio, pero necesita personal de mantenimiento para vigilancia de la instalación, con el fin de eliminar la avería rápidamente con el primer aviso del controlador de aislamiento.

6.3. COMPONENTES DEL C.T.

Los centros de transformación tienen todos tres componentes básicos:

1) Aparamenta de maniobra y protección en M.T.
2) Transformador.
3) Cuadro general de B.T. con su aparamenta de maniobra y protección.

Las empresas distribuidoras de energía tienen normas particulares para la construcción y aparamenta de los centros de transformación.

© Ediciones Paraninfo

6.4. TRANSFORMADOR

El transformador de potencia es el aparato más importante de los centros de transformación. Es la máquina eléctrica estática capaz de transformar, por inducción electromagnética, un sistema de corriente alterna en otro de corriente alterna, pero de distinta tensión e intensidad. En los centros de transformación transfiere la energía eléctrica entre el circuito de M.T. y el circuito de B.T.[1]

■ Características

El transformador más utilizado en los centros de transformación es el transformador trifásico. Las características más importantes, indicadas en su placa de características son:

- *Potencia nominal.* Las potencias normalizadas en los transformadores de distribución se indican en KVA: 10, 25, 50, 100, 160, 250, 400, 630, 800, 1 000, 1 250, 1 600, 2000 y 2 500.
- *Relación de transformación.* Relación entre la tensión de línea nominal primaria y la secundaria.

  La tensión nominal secundaria se considera a 400 V, y como tensión de línea en vacío 420 V. Los tipos de transformadores según la tensión secundaria, son:

  B1: Para alimentación de receptores a 230 V.

  B2: Para alimentación de receptores a 400 V.

  La tensión nominal primaria es la de la línea de alimentación en M.T. Habitualmente 20 kV.

  En el lado de M.T. los transformadores de distribución van provistos de un conmutador que permite variar el número de espiras con el transformador desconectado, regulando la tensión en $\pm 2{,}5\%$, $\pm 5\%$ o $+7\%$.
- *Tensión de cortocircuito.* La tensión porcentual de cortocircuito en los transformadores trifásicos de distribución está comprendida entre 4 y 6%.
- *Frecuencia.* La frecuencia normalizada es 50 Hz.
- *Grupo de conexión.* Los grupos de conexión más utilizados en los transformadores de distribución, son:

  Para transformadores de potencia nominal menor de 160 kVA: Yzn 11. Conexión estrella en el primario, zig-zag en el secundario, neutro accesible e índice de conexión 11, (desfase entre tensiones de línea de primario y secundario, $30 \cdot 11 = 330^{\circ}$).

  Para transformadores de distribución de potencia mayor o igual a 160 kVA: Dyn11. Conexión triángulo en el primario, estrella en el secundario, neutro accesible e índice de conexión 11.

[1] Para estudiar el funcionamiento del transformador ver el apéndice B: "Transformador"

© Ediciones Paraninfo

■ **Particularidades constructivas**

a) *Circuito magnético*. Formado por chapas magnéticas de grano orientado, laminadas en frío, con un 3% o 5% de silicio, espesor 0,35 mm, sujetas fuertemente.

b) *Devanados*. De cobre o aluminio en forma de hilos o pletinas. El devanado de B.T constituido por bobina de pletinas aisladas, va cerca del núcleo magnético, y sobre este devanado se colocan las bobinas de A.T. Mediante un conmutador colocado sobre la tapa puede variarse la tensión $\pm 5\%$.

Los transformadores, según el tipo de aislante que impregna los devanados, pueden ser:

- *En baño de aceite*. Con una cuba metálica que contiene el núcleo magnético, los bobinados y el aceite. La tapa de la cuba contiene las salidas aisladas de alta y baja tensión. Estos transformadores pueden ser:
  - De llenado total de la cuba. Las dilataciones del aceite por efecto de la temperatura son compensadas por la deformación de las aletas de refrigeración que rodean la cuba. Son los más utilizados.
  - De depósito de expansión. Para mantener la cuba siempre llena de aceite, conectado a la parte superior de la misma lleva un depósito de expansión.
- *Con aislamiento seco*. El circuito magnético y los devanados son encapsulados en resina. El encapsulado se hace con una mezcla de resina epoxi y un endurecedor, con alúmina y sílice en vacío. Con estas sustancias tiene una gran resistencia al fuego (es autoextinguible), gran aislamiento y resistencia a la agresión de atmósferas industriales. Se puede suministrar con envolvente metálica exterior.

■ **Determinación de la potencia del transformador**

La potencia necesaria para una determinada instalación viene dada por la potencia que consumen los receptores instalados P_{ins}, teniendo en cuenta su coeficiente de utilización K_u y de simultaneidad K_s.

El coeficiente de utilización de un receptor es la relación entre la potencia absorbida en la utilización y la absorbida a plena carga.

El coeficiente de simultaneidad en una instalación viene dado por el estudio de los receptores que funcionarán simultáneamente. Depende del número y tipo de receptores, y del tipo de utilización.

En las instalaciones de edificios dedicados fundamentalmente a viviendas el REBT instrucción 010 indica el coeficiente de simultaneidad.

En las instalaciones industriales o singulares con más de 10 receptores suele utilizarse un factor de simultaneidad de 0,4.

La potencia necesaria $P = P_{ins} \cdot K_u \cdot K_s$

La potencia aparente necesaria S, considerando un factor de potencia de 0,9 y un factor de ampliación de 1,3 (ampliación de un 30% de la potencia instalada).

© Ediciones Paraninfo

$$S = \frac{1{,}3P}{0{,}9}$$

Se suele utilizar en el centro de transformación solamente un transformador, pero para potencia mayores de 1 500 kVA se emplean en ocasiones dos unidades de transformación, teniendo en cuenta la división del consumo y la economía de la instalación.

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

6.4-1 Una industria tiene una potencia instalada de 1 370 kW. Calcular:

a) Potencia necesaria en la alimentación para un factor de utilización global de 0,8 y un coeficiente de simultaneidad de 0,5.

b) Potencia aparente necesaria en el centro de transformación para un factor de potencia de 0,9 y un factor de ampliación de 1,3.

a) La potencia necesaria $P = P_{ins} \cdot K_u \cdot K_s = 1\,370 \cdot 0{,}8 \cdot 0{,}5 = 548$ kW

b) La potencia aparente $S = \frac{1{,}3P}{0{,}9} = \frac{1{,}3 \cdot 548}{0{,}9} = 791{,}6$ kVA

La potencia normalizada para transformador de distribución inmediatamente superior es de 800 kVA.

6.4-2 Calcular la potencia aparente del transformador necesario para alimentar una instalación que consume una potencia total de 960 kW con factor de simultaneidad de 0,4. El factor de potencia global de la instalación es de 0,9 y se prevé un aumento de potencia del 30%.

Solución: 630 kVA.

6.5. PROTECCIONES PROPIAS DEL TRANSFORMADOR

Las causas que durante el funcionamiento del transformador pueden dar lugar a averías, son:

a) De origen interno: contactos entre arrollamientos o entre estos y masa, descenso del nivel del aceite en la cuba, etc.

b) De origen externo: sobrecargas, cortocircuitos y sobretensiones.

6.6. PROTECCIÓN CONTRA DEFECTOS INTERNOS

1) *Relé Buchholz.* Las descargas eléctricas en el aceite aislante producen un desprendimiento de gases. El relé reacciona ante acumulaciones de gas o aire en el interior de la cuba o también al bajar excesivamente el nivel de aceite, poniendo en marcha una señal de alarma o, si la avería es grave, desconectando el transformador. Se coloca entre la cuba y el depósito de expansión.

2) *Bloque de protección.* En los transformadores con cuba de llenado total (sin depósito de expansión) los defectos internos son detectados por un bloque de protección que permite observar el descenso de nivel con un flotador y que en valores importantes produce una señal eléctrica que avisa o desconecta el

© Ediciones Paraninfo

transformador. El bloque de protección puede llevar además presostato y termostato para detección de exceso de presión o temperatura.

6.7. PROTECCIÓN CONTRA SOBRECARGAS Y CORTOCIRCUITOS

Las sobrecargas o sobreintensidades pueden ser de valor grande o de valor poco elevado; pero sostenido a lo largo de mucho tiempo. El mayor valor de sobrecarga se produce cuando existe un cortocircuito en la salida del secundario del transformador. Para la protección contra sobrecargas se utilizan varios dispositivos:

a) *Termómetros y termostatos*. La protección contra sobrecargas se basa en la detección de un calentamiento anormal del aparato.

   El termómetro, situado sobre la tapa del transformador o en un lateral del mismo, tiene su actuación basada en la dilatación de un líquido, que puede accionar una alarma o desconectar el transformador al actuar sobre el aparato de corte.

   El termostato, situado sobre la tapa del transformador, tiene su actuación basada en la dilatación de un elemento metálico que establece un contacto eléctrico que provoca una alarma o desconecta la instalación.

   En los transformadores secos encapsulados en resina, el control de la temperatura se realiza por termorresistencias. El dispositivo lleva un convertidor electrónico, con contactos de alarma y de disparo del aparato de corte.

b) *Cartuchos fusibles*. Protegen el transformador contra las sobrecargas fuertes y los cortocircuitos por la fusión de un elemento, cuando la corriente sobrepasa durante un cierto tiempo un valor determinado. En los fusibles de M.T. la fusión se realizan en un recipiente aislante de material refractario que contiene arena de cuarzo para extinguir el arco, está cerrado en sus dos extremos por cazoletas metálicas, una de la cuales aloja el botón testigo de la fusión.

   Se emplea en ocasiones cortacircuitos seccionadores, que constan de un aislador soporte de porcelana y un cartucho fusible sujeto a un dispositivo basculante. Al fundirse el fusible se suelta una trenza de cobre y actúa el mecanismo basculante, produciendo el seccionamiento al caer por su propio peso .

c) *Interruptores automáticos*. Son aparatos de maniobra y protección contra las sobreintensidades; desconectan automáticamente cuando hay un aumento de intensidad mayor que la prevista en cualquiera de las tres fases.

   El interruptor automático de M.T. está accionado por relés que pueden ser:

   1) Relés directos. Están accionados por la corriente primaria del transformador, que al alcanzar un valor superior al prefijado, hace actuar el relé, abriendo el interruptor y desconectando el transformador.
   2) Relés indirectos. Están conectados a transformadores de intensidad, cuyo primario es recorrido por la corriente del primario del transformador. Necesitan generalmente una fuente auxiliar de corriente (batería de acumuladores con cargador).

© Ediciones Paraninfo

El interruptor está equipado con dispositivos de extinción del arco, generalmente gas a presión. La corriente y el tiempo de disparo se pueden ajustar por separado mediante un sistema con dispositivo temporizador que actúa sobre los relés.

Combinados con los fusibles o con los interruptores automáticos se utilizan *seccionadores*. Son los aparatos de maniobra empleados para aislar los diferentes elementos del C.T.. Su funcionamiento puede ser manual, mediante mando adecuado, o enclavado con el interruptor. Sólo se pueden maniobrar en vacío, pues el arco que se produciría en carga puede dar lugar a cortocircuitos y a la destrucción de la cuchillas de contacto. La apertura del seccionador pone a tierra los bornes de salida.

Se utilizan también para poner a tierra las líneas cuando deben revisarse y para dividir las barras activas de una línea.

6.8. PROTECCIÓN CONTRA LAS SOBRETENSIONES

las causas de las sobretensiones pueden ser:

- Sobretensiones a frecuencia industrial. Debidas a variaciones bruscas de carga.
- Sobretensiones de maniobra. Debidas a conexiones o desconexiones bruscas.
- Sobretensiones atmosféricas. Por caída de rayo en un conductor o en sus proximidades.

■ Protección interna del transformador contra sobretensiones

1) *Protección de cuba*. Esta protección controla las corrientes de fuga a tierra originadas por una sobretensión. Consiste en aislar la cuba del transformador de tierra, conectándola luego a una toma de tierra mediante un conductor que pasa por un anillo de material magnético. Sobre el anillo toroidal está arrollada una bobina que conecta con un relé, el cual acciona el interruptor de conexión del transformador.
2) *Limitador de sobretensión*. Es una protección conectada en el lado de B.T. del transformador, conectada obligatoriamente en el régimen de neutro IT. El limitador de sobretensión deriva a tierra las tensiones peligrosas del secundario por fallos de aislamiento entre el devanado primario y secundario. El limitador funciona al perforarse un aislante de grosor determinado según la sobretensión.

■ Protección externa del transformador contra sobretensiones

Se realiza con *autoválvulas*. Conectadas entre los conductores de la línea y tierra, protegen los centros de transformación contra las sobretensiones de origen atmosférico. Cuando la tensión es la nominal la autoválvula es un circuito abierto; pero cuando la tensión es más elevada se hace conductora, permitiendo el paso de corriente a través de ella a tierra e impidiendo así la llegada de la sobretensión al C.T.. Se colocan lo más cerca posible de la entrada de la línea aérea al C.T. Si

© Ediciones Paraninfo

éste está en un edificio, las autoválvulas se conectan en el último poste donde la línea entronca con la conducción subterránea de alimentación.

6.9. PROTECCIÓN CONTRA INCENDIOS

En los C.T. situados en interiores, si los transformadores están refrigerados por aceite inflamable, debe existir protección contra incendios (MIE-RAT 14), la protección puede ser con los sistemas:

1) Sistema pasivo, que consiste en un pozo de recogida de aceite y las paredes y techo con resistencia al fuego.
2) Sistema activo, que consiste en un equipo automático de extinción del fuego, que actúa por detectores de humos. El procedimiento suele ser a base de CO_2. Cuando no es obligatorio el sistema automático, se utilizan extintores móviles.

6.10. ALUMBRADO, SEÑALIZACIÓN Y MATERIAL DE SEGURIDAD

El C.T. instalado en un local lleva un alumbrado general para conseguir una iluminación mínima de 150 lux, al menos con dos puntos de luz. Lleva también alumbrado de emergencia, que entra en funcionamiento en corte de servicio eléctrico, con autonomía mínima de 2 horas y nivel luminoso mínimo de 5 lux. Esta instalación eléctrica en B.T. para servicio del local está protegida con interruptor diferencial de alta sensibilidad.

Las puertas de acceso al local y las puertas de las celdas del C.T. llevan cartel de riesgo eléctrico. También se señala mediante cartel situado en el interior del local las instrucciones de primeros auxilios por accidente.

En caso de ser necesarios, en el local estarán los elementos para accionar los aparatos del C.T.

6.11. CUADRO GENERAL DE BAJA TENSIÓN

La salida del secundario del transformador se conecta al cuadro general de B.T., que se suele instalar en armarios prefabricados. De este cuadro sale la alimentación a receptores de gran consumo y a otros cuadros secundarios.

El cuadro general de B.T. está dividido en varias partes:

1) Unidad funcional de control. Contiene voltímetro, amperímetro y aparatos de medida necesarios con transformadores de intensidad.
2) Unidad funcional de seccionamiento. Contiene un interruptor seccionador o un interruptor automático tetrapolar.
3) Unidad funcional de embarrado. Contiene las barras generales y la conexión para las distintas salidas.
4) Unidad funcional de protección. Contiene interruptores-seccionadores tetrapolares con fusibles para protección de las salidas. Este sistema tiende a ser reemplazado por interruptores automáticos.

© Ediciones Paraninfo

6.12. MEDIDAS

■ Celda de medida

Los centros de transformación de usuario llevan una celda de medida, cerrada, precintada y con acceso solamente por personal de la empresa distribuidora de energía. En esta celda de medida van colocados dos o tres transformadores de intensidad y dos o tres transformadores de tensión, según el sistema de medida utilizado. Los transformadores de intensidad pueden llevar dos devanados secundarios, uno para medida y otro para protección. También puede haber transformadores de intensidad y de tensión para dispositivos de protección.

Los transformadores de medida aíslan los equipos de medida del circuito de M.T. y suministran por su secundario tensiones e intensidades de magnitud proporcional a las del circuito de M.T. Son transformadores de pequeña potencia y de aislamiento seco.

■ Aparatos de medida

Los contadores de medida de energía activa y reactiva, interruptor horario y placa de comprobación, se colocan fuera de la celda de medida en armarios normalizados, cerrados y precintados, con cristales para la observación de las indicaciones. El armario debe estar situado cerca de los transformadores de medida y la conexión con estos debe realizarse con conductores de sección suficiente para no introducir errores en las indicaciones de los aparatos de medida.

6.13. CÁLCULOS ELÉCTRICOS DEL CENTRO DE TRANSFORMACIÓN

Una vez escogido la disposición constructiva y el transformador a utilizar, el cálculo del C.T. exige conocer las corrientes de cortocircuito en el punto de conexión con la línea distribuidora de M.T. y en los bornes de B.T. del transformador. A partir de estos valores se escoge la aparamenta y los cables de conexión.

■ Intensidades en M.T.

- *Intensidad nominal en el primario* $I_{1n}=\dfrac{S_n}{\sqrt{3}\,V_{L1}}$

  I_{1n}: Intensidad nominal en primario (A).
  S_n: Potencia aparente nominal del transformador (VA).

- *Intensidad de cortocircuito permanente en el primario* $I_{cc1}=\dfrac{S_{cc1}}{\sqrt{3}\,V_{L1}}$

  I_{cc1}: Intensidad de cortocircuito permanente en el primario (A).
  S_{cc1}: Potencia de cortocircuito en el punto de entronque con la red de M.T. según la empresa distribuidora de energía (VA).

- *Intensidad de cortocircuito de choque* $I_{s1}=1{,}8\sqrt{2}\,I_{cc1}=2{,}55I_{cc1}$

  I_{s1}: Intensidad de cortocircuito de choque o de pico, considerando el cortocircuito en el caso más desfavorable (A).

© Ediciones Paraninfo

■ **Intensidades en B.T.**

- *Intensidad nominal en secundario* $I_{2n}=\dfrac{S_n}{\sqrt{3}\,V_{L2}}$

  I_{2n}: Intensidad nominal secundaria (A).
  V_{L2}: Tensión nominal secundaria (V).
- *Intensidad de cortocircuito permanente.* Se considera el caso más desfavorable, de potencia infinita en la central suministradora de energía, que mantiene constante la tensión de línea en el primario en caso de cortocircuito, por lo que la intensidad de cortocircuito estará limitada exclusivamente por la impedancia del transformador.

$$I_{cc2}=\frac{I_{2n}}{u_{cc}}100$$

  I_{cc2}: Intensidad de cortocircuito permanente (A).
  u: Tensión de cortocircuito del transformador en %.
- *Intensidad de cortocircuito de choque* $I_{s2}=2{,}55\,I_{cc2}$

■ **Impedancia del transformador referida al secundario**

La impedancia total del transformador referida el secundario se puede calcular a partir de la potencia nominal del transformador y de su tensión de cortocircuito.

$$Z_{cc}=\frac{V_{L2}^{\,2}}{S_n}\frac{u_{cc}}{100}$$

Z_{cc}: Impedancia del transformador referida al secundario (Ω).
V_{L2}: Tensión de línea nominal del secundario (V).
S_n: Potencia nominal del transformador (VA).
u_{cc}: Tensión porcentual de cortocircuito.

Las componentes de la impedancia, resistencia R_{cc} y reactancia X_{cc} del transformador se obtienen de las componentes activa u_R y reactiva u_X de la caída de tensión en cortocircuito.

$$R_{cc}=\frac{V_{L2}^{\,2}}{S_n}\frac{u_R}{100};\qquad X_{cc}=\frac{V_{L2}^{\,2}}{S_n}\frac{u_X}{100}$$

■ **Solicitaciones dinámicas**

Se calcula el esfuerzo sobre barras conductoras considerando la fuerza electrodinámica sobre conductores rectilíneos paralelos.

La fuerza máxima sobre las barras $F=2{,}04\cdot I_s^{\,2}\cdot 10^{-8}\dfrac{L_b}{D_b}$

F: Fuerza (daN)
L_b: Longitud máxima de la barra (m)
D_b: distancia entre las barras (m)

© Ediciones Paraninfo

La fuerza sobre los soportes de las barras debe ser menor que la carga máxima de rotura que admiten los aisladores utilizados.

Considerando las barras apoyadas en los dos extremos, como caso más desfavorable, el momento flector M_f (daN·cm):

$$M_f = \frac{F \cdot L_b}{8}$$

L_b: Longitud máxima de las barras (cm).

Momento resistente o módulo de flexión M_r (cm^3), para pletina de sección rectangular, de dimensiones de la base b (cm) y de la altura h (cm).

$$M_r = \frac{bh^2}{6}$$

El coeficiente de trabajo σ (daN/cm^2): $\sigma = \frac{M_f}{M_r}$

Este coeficiente de trabajo tiene que ser menor que la carga de rotura de las barras (1 200 daN/cm^2 para el cobre y 1 000 daN/cm^2 para el aluminio).

■ **Solicitaciones térmicas**

- *La densidad de corriente en régimen nominal* $\delta = \frac{I_n}{s}$

  δ: Densidad de corriente (A/mm^2).

  s: Sección del conductor (mm^2).

Esta densidad de corriente tiene que ser menor que la que puede soportar el conductor.

- *Sección necesaria para soportar el incremento de la temperatura del conductor en régimen de cortocircuito.*

  Para el cobre $s = \frac{I_{cc}}{13}\sqrt{\frac{t}{\Delta\theta}}$

  s: Sección del conductor (mm^2).

  $\Delta\theta$: Incremento de temperatura permitida en el conductor (°C).

  t: Tiempo de duración del cortocircuito (s). Se suele considerar 0,1 s

La temperatura alcanzada por el conductor debe ser menor que la permitida según el fabricante.

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

6.13-1 Un centro de transformación tiene un transformador de 1 000 kVA, 20/0,4 kV, u_{cc}=6%. Las pérdidas en el cobre a plena carga y 75 °C, es 10,5 kW. La potencia de cortocircuito en el punto de conexión con la línea de distribución de 20 kV, según la empresa suministradora de energía es de 400 MVA. Calcular:

a) Intensidad de cortocircuito en el primario, considerando en los bornes de conexión la potencia de cortocircuito de 400 MVA.

© Ediciones Paraninfo

b) Impedancia, resistencia y reactancia del transformador respecto al secundario.
c) Intensidad de cortocircuito en bornes del secundario, considerando solamente la impedancia del transformador.
d) Reactancia de la red de M.T. referida al secundario, despreciando la resistencia de dicha red.
e) Intensidad de cortocircuito en bornes del secundario del transformador, considerando la reactancia de la red de M.T.
f) Intensidad de cortocircuito en el cuadro de B.T. si la línea de alimentación desde el secundario del transformador tiene de resistencia 0,06 Ω y reactancia 0,02 Ω.

a) La intensidad de cortocircuito en el primario:

$$I_{cc1} = \frac{S_{cc}}{\sqrt{3}\cdot V_{L1}} = \frac{400\cdot 10^6}{\sqrt{3}\cdot 20\cdot 10^3} = 11\,547\text{ A} = 11{,}547\text{ kA}$$

La intensidad de choque $I_{s1} = 2{,}55\cdot I_{cc1} = 2{,}55\cdot 11{,}547 = 29{,}44$ kA
El interruptor automático del primario deberá tener un poder de corte mayor de 11,547 kA y un poder de cierre mayor de 29,44 kA.

b) La impedancia de cortocircuito del transformador referida al secundario:

$$Z_{cc} = \frac{V_{L2}^2}{S_n}\frac{u_{cc}}{100} = \frac{400^2}{1\,000\cdot 10^3}\frac{6}{100} = 0{,}0096\,\Omega$$

La caída de tensión en la resistencia interna del transformador se puede hallar a partir de las pérdidas en el cobre:

$$u_R = \frac{P_{Cu}}{S_n}100 = \frac{10{,}5}{1\,000}100 = 1{,}05\,\%$$

La resistencia del transformador referida al secundario:

$$R_{cc} = \frac{V_{L2}^2}{S_n}\frac{u_R}{100} = \frac{400^2}{1\,000\cdot 10^3}\frac{1{,}05}{100} = 0{,}00168\,\Omega$$

La reactancia del transformador referida al secundario:

$$X_{cc} = \sqrt{Z_{cc}^2 - R_{cc}^2} = \sqrt{0{,}0096^2 - 0{,}00168^2} = 0{,}00945\,\Omega$$

c) La intensidad de cortocircuito en el secundario, considerando la impedancia interna:

$$I_{cc2} = \frac{\frac{V_{L2}}{\sqrt{3}}}{Z_{cc}} = \frac{400}{\sqrt{3}\cdot 0{,}0096} = 24\,056\text{ A} \simeq 24\text{ kA}$$

Se puede calcular también por la intensidad nominal secundaria I_{2n}:

$$I_{cc2} = \frac{I_{2n}}{u_{cc}};\quad I_{2n} = \frac{S_n}{\sqrt{3}\,V_{L2}} = \frac{1\,000\,000}{\sqrt{3}\cdot 400} = 1\,443\text{ A};\quad I_{cc2} = \frac{1\,443}{0{,}06} = 24\,056\text{ A}$$

La intensidad de choque en el secundario $I_{s2} = 2{,}55\cdot I_{cc2} = 2{,}55\cdot 24\,056 = 61\,342$A
El interruptor automático en el secundario deberá tener un poder de corte mayor que 24 kA y un poder de cierre mayor de 61,34 kA.

© Ediciones Paraninfo

d) La impedancia de la línea de alimentación en M.T. referida al secundario:

$$Z_{ccL} = X_{ccL} = \frac{V_{L2}^2}{S_{cc}} = \frac{400^2}{400 \cdot 10^6} = 0{,}0004\ \Omega$$

e) La intensidad de cortocircuito en bornes del secundario,teniendo en cuenta la reactancia anterior:

$$I_{cc2} = \frac{\frac{400}{\sqrt{3}}}{\sqrt{0{,}00168^2 + (0{,}0004 + 0{,}00945)^2}} = 23\,112\ \text{A}$$

f) La intensidad de cortocircuito en el cuadro de B.T. se calcula considerando la impedancia total hasta dicho cuadro:

$$I_{cc3} = \frac{\frac{400}{\sqrt{3}}}{\sqrt{(0{,}00168 + 0{,}06)^2 + (0{,}0004 + 0{,}00945 + 0{,}02)^2}} = 3\,370\ \text{A} = 3{,}37\ \text{kA}$$

6.13-2 En un C.T. se utiliza un transformador de 630 kVA, 20/0,4 kV y caída de tensión porcentuales de cortocircuito u_{cc}=4%. Calcular, considerando la potencia de cortocircuito en el punto de conexión a la red de M.T. 450 MVA:

a) Intensidad de cortocircuito en bornes del primario, despreciando la impedancia de la línea de enlace con la red de M.T.

b) Intensidad de cortocircuito en bornes del secundario.

Solución: a) 13 kA; b) 22,7 kA.

6.13-3 Un transformador de distribución de 1 000 kVA, 20/0,4 kV, tiene de caída de tensión porcentual de cortocircuito u_{cc}=6,5%. Calcular:

a) Intensidad de cortocircuito en el primario si la potencia de cortocircuito es de 500 MVA.

b) Intensidad de choque en el primario.

c) Resistencia y reactancia interna del transformador referidas al secundario, sabiendo que las pérdidas en el cobre a plena carga son de 12 kW.

d) Reactancia de la línea de M.T. referida al secundario, despreciando la resistencia de la línea.

e) Intensidad de cortocircuito en bornes del secundario considerando la reactancia de la línea de alimentación.

f) Intensidad de cortocircuito de choque en el secundario.

Solución: a)14,43 kA; b)36,8 kA; c) R_{cc}=0,00192 Ω, X_{cc}=0,0102 Ω; d)0,00032 Ω e) 21,6 kA; f) 55 kA

6.13-4 El transformador de un centro de transformación es de 800 kVA, 20 000/400 V, u_{cc}=4%. Calcular:

a) Intensidad de choque en cortocircuito en M.T., si la potencia aparente de cortocircuito en el punto de entronque con la red de distribución en M.T., según la empresa suministradora es de 450 MVA.

© Ediciones Paraninfo

b) Momento flector en pletinas de 40×10 mm, para una longitud máxima de 1 m, separadas una distancia de 0,4 m.
c) Momento resistente de la pletina y coeficiente de trabajo.
d) Densidad de corriente en M.T., para el régimen nominal.
e) Sección necesaria para soportar el cortocircuito para una duración de este de 0,1 s y considerando un incremento máximo de temperatura de 150 °C.
f) Intensidad nominal en B.T.
g) Intensidad de cortocircuito permanente en B.T., despreciando la impedancia de la red de M.T.

a) La intensidad de cortocircuito en el primario:

$$I_{cc1} = \frac{S_{cc}}{\sqrt{3}\cdot V_{L1}} = \frac{450\cdot 10^6}{\sqrt{3}\cdot 20\cdot 10^3} = 12\,990\text{ A} \simeq 13\text{ kA}$$

La intensidad de choque $I_{s1} = 2{,}55\cdot I_{cc1} = 2{,}55\cdot 13 = 33{,}15$ kA

b) La fuerza sobre la pletina $F = 2{,}04\cdot I_s^2\cdot 10^{-8}\dfrac{L_b}{D_b} = 2{,}04\cdot 10^{-8}\cdot 33\,150^2\cdot\dfrac{1}{0{,}4} = 56$ daN

El momento flector, considerando las barras apoyada en los dos externos:

$$M_f = \frac{F\cdot L_b}{8} = \frac{56\cdot 100}{8} = 700\text{ daN·cm}$$

c) Momento resistente o módulo de flexión de la pletina:

$$M_r = \frac{bh^2}{6} = \frac{4\cdot 1^2}{6} = 0{,}667\text{ cm}^3$$

El coeficiente de trabajo $\sigma = \dfrac{M_f}{M_r} = \dfrac{700}{0{,}667} = 1\,049\text{ daN/cm}^2$

d) La intensidad nominal en el primario $I_{1n} = \dfrac{S_n}{\sqrt{3}\,V_L} = \dfrac{800\cdot 10^3}{\sqrt{3}\cdot 20\cdot 10^3} = 23{,}1$ A

Densidad de corriente en régimen nominal $\delta = \dfrac{I_{1n}}{s} = \dfrac{23{,}1}{40\cdot 10} = 0{,}058\text{ A/mm}^2$

e) La sección necesaria para soportar el cortocircuito:

$$s = \frac{I_{cc}}{13}\sqrt{\frac{t}{\Delta\theta}} = \frac{13\,000}{13}\sqrt{\frac{0{,}1}{150}} = 25{,}8\text{ mm}^2$$

f) La intensidad nominal en el secundario $I_{2n} = \dfrac{S_n}{\sqrt{3}\,V_L} = \dfrac{800\cdot 10^3}{\sqrt{3}\cdot 400} = 1\,155$ A

g) La intensidad de cortocircuito en el secundario $I_{cc2} = \dfrac{I_{2n}}{u_{cc}}100 = \dfrac{1\,155}{0{,}04} = 28\,875$ A

6.13-5 En el embarrado a 20 kV de un centro de transformación se utiliza una pletina de cobre de 50x10 mm. Las pletinas están separadas 40 cm y la distancia entre apoyos es de 1,5 m. Calcular:

a) Intensidad de cortocircuito de choque para una potencia de cortocircuito en barras de 350 MVA.

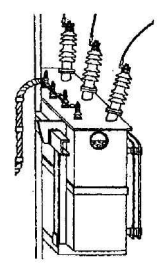
© Ediciones Paraninfo

b) Fuerza en barras.
c) Momento flector.
d) Momento resistente.
e) Momento flector máximo que admite la pletina con un coeficiente de trabajo de 1 200 daN/cm^2
Solución: a) 25,76 kA; b) 50,76 daN; c) 951,75 daN·cm; d) 0,833 cm^3; e) 999,6 daN·cm

6.13-6 Un centro de transformación tiene un transformador de 1 000 kVA, 20/0,4 kV, tensión de cortocircuito 6% y 375 MVA de potencia de cortocircuito en la entrada de M.T. Calcular:
a) Intensidad nominal en M.T.
b) Intensidad de cortocircuito de choque en M.T.
c) Intensidad nominal de B.T.
d) Intensidad de cortocircuito de choque en los bornes de B.T. despreciando la impedancia de la red de M.T.
e) Fuerza máxima en el embarrado de M.T. si se utiliza pletina de cobre de 50x10 mm, con separación entre fases de 30 cm y separación entre apoyos de 1 m.
f) Sección necesaria de pletina para soportar el cortocircuito considerando como incremento máximo de temperatura 150 °C y el tiempo de duración 1 s.
Solución: a) 28,87 A; b) 27,6 kA; c) 1 443 A; d) 61,3 kA; e) 51,8 daN; f) 67,9 mm^2.

6.14. CENTROS DE TRANSFORMACIÓN INTEMPERIE SOBRE POSTE

Estos C.T. deben cumplir la instrucción MIE RAT 15.


Fig. 6.1

■ Transformadores

Los transformadores se *designan* por la potencia, tensión nominal y grupo de conexión.

Los transformadores utilizados usualmente en las líneas de 20 kV (fig. 6.1) y sus *características* son las indicadas en la tabla siguiente:

Tabla 6.1

Potencias (kVA).	25	50	100
Pérdidas en vacío (W).	115	190	320
Pérdidas en carga a 75 °C (W).	700	1100	1750
Nivel de ruido (dB).	42	44	48
Conexión.	Yz11		
Tensión nominal primario (kV).	20		
Tensión nominal secundaria (V).	400		
Tensión más elevada para el material (kV).	24		
Regulación de tensión en el arrollamiento de A.T.	±2,5% ±5%		
Tensión de cortocircuito a 75 °C.	4%		
Intensidad que soporta en cortocircuito con una duración de 2 s (kA).	25 × I nominal.		
Aislamiento.	Aceite mineral.		

© Ediciones Paraninfo

Según el tipo de apoyo que sirve de soporte, el C.T. puede ser:

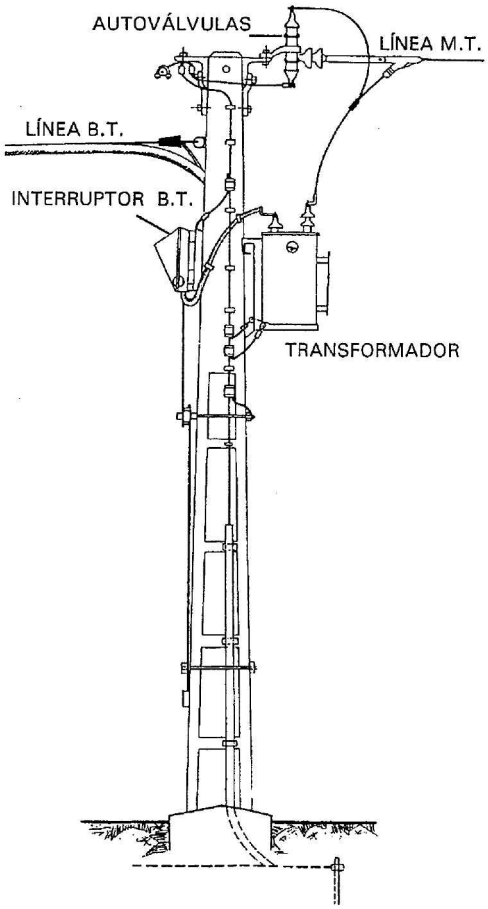


Fig. 6.2

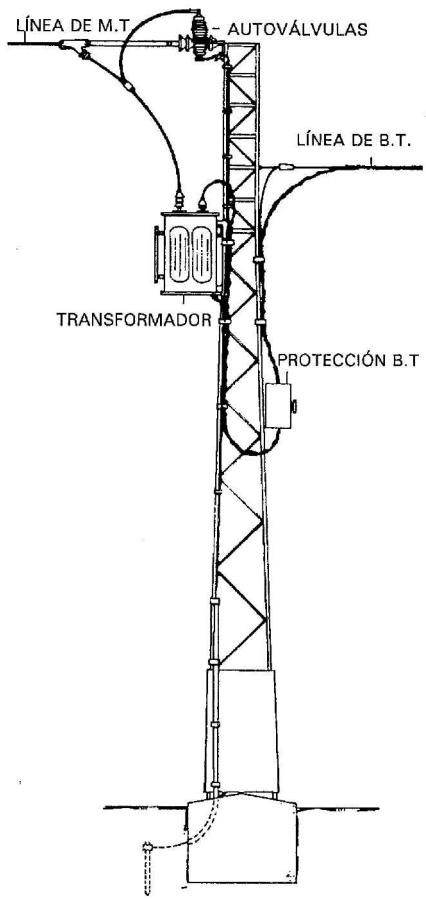


Fig. 6-3

- *Centro de transformación sobre apoyo de hormigón.* Una disposición muy utilizada es la de la figura 6.2. La línea de M.T. se sujeta mediante aisladores a una cruceta recta metálica que soporta también las autoválvulas. El transformador va colocado sobre un soporte metálico y su salida de B.T. se conecta, mediante conductor RZ o conductores aislados unipolares de sección mínima 95 mm^2 (según proyecto UNESA), al cuadro de protección intemperie o al interruptor tetrapolar automático de intemperie, con accionamiento manual. Del interruptor de B.T. sale la línea de B.T., con conductor RZ sujeto al poste con pinza de anclaje. Cuando la tensión de defecto a tierra es mayor de 1 000 V, el neutro de la línea de B.T. se conecta a tierra, separado de la toma de tierra de masas y autoválvulas. El apoyo mínimo que se utiliza es el HV-1000.

© Ediciones Paraninfo

- *Centro de transformación sobre apoyo metálico* (fig. 6.3). Igual que en el transformador sobre apoyo de hormigón; la línea de M.T. se sujeta a la cruceta soporte de las autoválvulas y deriva a éstas y al primario del transformador, que colocado sobre soporte metálico, tiene la salida de B.T. conectada a un interruptor de protección de corte tetrapolar. Puede tener una toma de tierra para el neutro de B.T. y otra para masas y autoválvulas. La parte baja del apoyo lleva una chapa antiescala. El apoyo metálico admite transformadores de más potencia que el apoyo de hormigón (hasta 160 kVA). Se utiliza mucho el apoyo C-3000.
- *Centro de transformación sobre dos apoyos de hormigón.* El transformador se coloca sobre un pórtico formado por dos postes de hormigón (fig. 6.4). Uniendo los dos postes en su parte superior está una cruceta recta que sirve de sujeción a la cadena de aisladores de amarre a la línea de M.T. y de soporte a las autoválvulas. Situado en uno de los apoyos está el interruptor de protección de B.T., que recibe la línea del secundario del transformador. De este interruptor parte la línea de baja tensión con conductor RZ. También se pueden utilizar las dos tomas de tierra, para neutro y para masa y autoválvulas. Esta disposición permite utilizar transformadores de potencia más elevada que sobre un sólo apoyo (se utiliza para 160 kVA). Los apoyos mínimos que se emplean son HV-630.

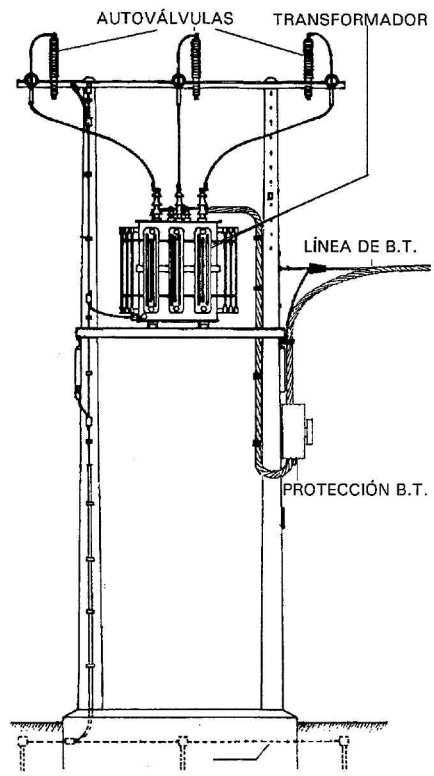


Fig. 6.4

Actualmente se prefiere utilizar un apoyo metálico para el C.T. sobre poste. La parte inferior de la cuba del transformador debe estar a una altura del suelo no inferior a 3 m (MIE RAT 15). Las partes que se encuentren bajo tensión y no estén protegidas contra contactos accidentales se sitúan como mínimo a 5 m del suelo.

■ Protección en B.T.

- *Cuadro de protección intemperie.* Es un interruptor de corte tetrapolar con fusibles, utilizado para transformadores de 100 a 250 kVA, de intensidades nominales de 160 a 400 A y fusibles de 32 a 250 A. La caja es de poliéster con fibra de vidrio y la entrada y salida de cables se realiza por su parte inferior.

© Ediciones Paraninfo

- *Interruptor automático intemperie.* Es un interruptor automático de protección térmica, utilizado para transformadores de 25 a 160 kVA. Se suele utilizar con poder de corte 4 kA, con tensión nominal 400 V e intensidad nominal 165-250 A. La desconexión del interruptor puede ser manual o automática, mientras que la conexión es manual. La caja es de poliéster con fibra de vidrio.

■ **Fusibles de B.T.**

Utilizados en cuadros de protección de transformadores y cajas generales de protección:

- *Fusibles cilíndricos.* Se utilizan habitualmente fusibles con poder de corte 50 kA, tensión nominal 500 V e intensidad nominal 40 y 80 A.
- *Fusibles de cuchillas.* Se suelen usar con poder de corte 50 kA, tensión nominal 500 V, e intensidades nominales de 100, 125, 160, 250 y 400 A.

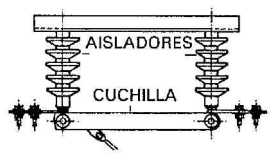


Fig. 6.5

■ **Conductores de B.T.**

Son los conductores comprendidos entre los bornes del transformador y los aparatos de protección en B.T. Se utiliza cable RZ de aluminio, de sección 95 mm^2 para transformadores de potencia igual o inferior a 100 kVA, y de sección mínima 150 mm^2 para transformadores de 160 kVA.

■ **Seccionadores en M.T.**

Utilizados para corte y conexión de la línea en vacío. Son unipolares y consiste en una cuchilla metálica soportada sobre aisladores (fig. 6.5).

Estos seccionadores son de chasis de hierro galvanizado, circuito principal de cobre, cuchillas accionables con pértiga y con dispositivo de enclavamiento. Tensión nominal 24 kV, intensidad nominal 400-630 A.

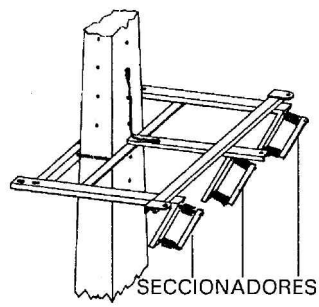
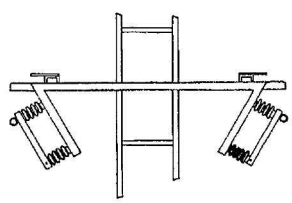


Fig. 6.6

- Seccionadores sobre poste de hormigón. Para seccionamiento visible en las líneas de M.T. aéreas (fig. 6.6), con cruceta para derivación.
- Seccionadores sobre apoyo metálico. Para derivación en apoyo metálico, igual que sobre poste de hormigón. Pueden ser de doble seccionamiento, con cruceta recta de doble derivación. (fig. 6.7).


Fig. 6.7

■ **Fusibles de M.T. para exterior**

Utilizados para protección de los transformadores de distribución contra cortocircuitos. Suelen colocarse en apoyos distintos del que sustenta el transformador. Las bases portafusibles para exterior, con chasis metálico y

© Ediciones Paraninfo

aisladores (fig. 6.8). Las características de los fusibles de M.T. de alto poder de ruptura, utilizados para protección de transformadores se escogen según la potencia del transformador. Los fabricantes dan curvas y tablas de selección. Como orientación se indican en la tabla siguiente:

Tabla 6.2

Potencia nominal del transformador (kVA).	25	50	100	160
Intensidad nominal del fusible (A).	5	10	16	25
Tensión nominal (kV).	24 V			

Las bases portafusibles pueden ir sobre apoyo de hormigón o sobre apoyo metálico. Se utiliza cruceta recta sencilla para derivación.

Actualmente se prefiere utilizar el *fusible expulsión-seccionador*. Utilizado para protección y maniobra en redes de distribución (fig. 6.9), con potencias medias de cortocircuito.

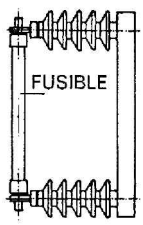


Fig. 6.8

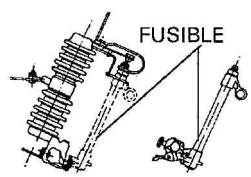


Fig. 6.9

Las bases portafusibles expulsión-seccionador, colocadas sobre apoyo, tienen una tensión nominal de 24 kV; intensidad nominal 100-200 A. Los fusibles expulsión son de fusión rápida y se escogen según la potencia nominal del transformador, con poder de corte 10 kA. Los fabricantes dan tablas para selección de los fusibles. Como orientación se indican en la tabla siguiente:

Tabla 6.3

Potencia nominal del transformador (kVA).	25	50	100	160
Intensidad nominal del fusible (A).	2	2	6	10
Tensión nominal (kV).	24 kV			

El fusible expulsión-seccionador sobre apoyo de hormigón o metálico (fig. 6.10), utiliza una cruceta recta especial para soporte de las bases portafusible expulsión-seccionador, para protección en las derivaciones de las líneas de M.T.

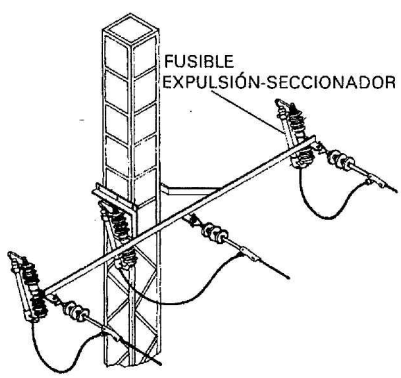


Fig. 6.10

■ **Pararrayos autoválvulas**

Son pararrayos de resistencia variable para protección contra sobretensiones. De tensión nominal 24 kV, y 10 kA de intensidad de descarga nominal.

- Autoválvulas en postes de hormigón o metálicos. Sujetas al poste por soporte de hierro galvanizado (fig. 6.11), se unen entre sí mediante varilla de cobre de diámetro 8 mm y a tierra mediante conductor de cobre de sección 50 mm^2.

© Ediciones Paraninfo

- Autoválvulas sujetas a la carcasa o cuba del transformador. Así se colocan próximas a los bornes de M.T. para mejor protección del transformador.

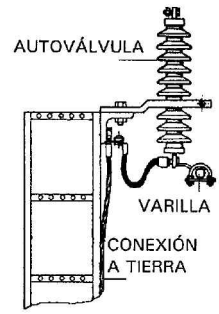


Fig. 6.11

■ **Puesta a tierra en centros de transformación sobre apoyo**

Según la instrucción MIE RAT 13, toda instalación eléctrica debe disponer de una instalación de tierra diseñada de tal forma que cualquier punto normalmente accesible a las personas, éstas resulten sometidas a tensiones de paso y contacto no peligrosas.

La empresa distribuidora da la intensidad de defecto a tierra y el tiempo mínimo a considerar para duración de defecto a la frecuencia de la red, que es del orden de un segundo como máximo. Las secciones mínimas de las líneas de tierra utilizadas son 25 mm^2 para el cobre y 50 mm^2 para el acero, y no podrán superarse las densidades de corriente de 160 A/mm^2 para el cobre y 60 A/mm^2 para el acero (MIE RAT 13).

En los centros de transformación sobre apoyo se conecta el neutro a tierra (tierra de servicio) separado de la toma de tierra de las masas (tierra de protección), si la tensión de defecto a tierra es superior a la tensión de contacto máxima aplicada según MIE-RAT 13. Si la instalación se realiza en el apoyo que sustenta el transformador, el cable hasta el electrodo del neutro está aislado. Se suele conectar el neutro a tierra en un apoyo contiguo al que sustenta el transformador.

El diseño del sistema de puesta a tierra está condicionado por el valor de la tensión máxima de paso admisible, y depende de la resistividad del terreno, de la geometría y profundidad de los electrodos de tierra, y de la tensión de servicio.

Un sistema muy utilizado es el de un rectángulo alrededor del centro de transformación de 3×2 m, formado por conductor de cobre de sección 50 mm^2, con una pica cilíndrica roscada, de acero cobreado de 2 m de longitud y 14 mm de diámetro, en cada uno de los cuatro vértices del rectángulo, enterradas en zanja a una profundidad de 0,8 m. Las picas se prolongan mediante elementos roscados hasta una profundidad de 8 m.

Como medidas adicionales de seguridad para tensiones de contacto, UNESA recomienda para centros de transformación sobre apoyo, la colocación de una losa de hormigón de espesor no inferior a 0,2 m, que cubra como mínimo, hasta 1,2 m de las aristas exteriores de la cimentación de los apoyos. Dentro de la losa y hasta 1 m de las aristas exteriores de la cimentación se dispone de un mallazo electrosoldado de construcción con redondos de diámetro no inferior a 4 mm, formando una retícula no superior a $0,3 \times 0,3$ m. Este mallazo se conecta a la puesta a tierra de protección del centro al menos en dos puntos preferentemente opuestos y queda cubierto de hormigón con un espesor no inferior a 0,1 m.

■ **Esquemas eléctricos generales**

Los esquemas eléctricos del centro de transformación sobre poste, según las protecciones utilizadas en A.T. y en B.T. se indican en la figura 6.12.

© Ediciones Paraninfo

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

6.14-1 Se instala un centro de transformación aéreo con un transformador de 100 kVA, 20/0,4 kV, en un apoyo HV-1 000-R11. El centro de gravedad del transformador está a 6,6 m del suelo, con un empotramiento del apoyo de 1,9 m. En la punta de apoyo se coloca una cruceta de amarre para conductor LA 30. Calcular:

a) Acción transversal del viento sobre los conductores, sabiendo que el vano de amarre es de 60 m.
b) Acción del viento sobre la cara lateral del transformador, si su superficie es de 0,74 m^2.
c) Fuerza transversal en la punta del apoyo, considerando las dos acciones anteriores.
d) Tiro longitudinal de los conductores, considerando un tense máximo de 288 daN.
e) Fuerza resultante en la punta del apoyo.

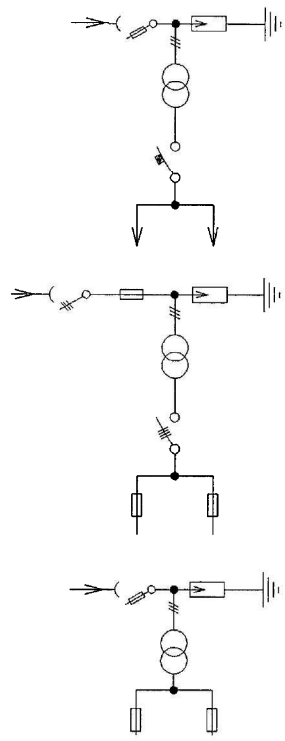


Fig. 6.12

a) El eolovano $a_e = \frac{1}{2}(a) = \frac{60}{2} = 30$ m

La fuerza del viento sobre los tres conductores de diámetro 0,00714 m:

$F_v = 3 \cdot p_v \cdot a_e \cdot d = 3 \cdot 60 \cdot 30 \cdot 7{,}14 \cdot 10^{-3} = 38{,}56$ daN

b) La fuerza del viento sobre el transformador, considerando una presión del viento de 100 daN/m^2 para velocidad del mismo 120 km/h (ITC-LAT-07):

$$F_{tra} = S_{tra} \cdot 100 = 0{,}74 \cdot 100 = 74 \text{ daN}$$

c) La altura del apoyo sobre el terreno $H = 11 - 1{,}9 = 9{,}1$ m

La fuerza en la punta del apoyo que produce el mismo momento que la debida al viento sobre el transformador:

$$F_{tra}{}' = \frac{74 \cdot 6{,}6}{9{,}1} = 53{,}67 \text{ daN}$$

El esfuerzo transversal total en la punta del apoyo $F_T = 38{,}56 + 53{,}67 = 92{,}23$ daN

d) El esfuerzo longitudinal en punta $F_L = 3 \cdot T_{máx} = 3 \cdot 288 = 864$ daN

e) La fuerza resultante $F_R = \sqrt{F_T^2 + F_L^2} = \sqrt{92{,}23^2 + 864^2} = 869$ daN

6.14-2 Se instala un centro de transformación aéreo con un transformador de 160 kVA, 20/0,4 kV, en un apoyo de longitud 12 m y empotramiento de 2,4 m. El centro de gravedad del transformador está a 6,5 m del suelo. En la punta de apoyo se coloca una cruceta de amarre para conductor LA 56. Calcular:

a) Fuerza transversal en la punta del apoyo debida a la acción del viento, si la cara lateral del transformador es de 1,2 m^2 de superficie y el vano de amarre 80 m.
b) Fuerza longitudinal de los conductores, considerando un tense máximo de 522 daN.
c) Fuerza resultante en la punta del apoyo.

Solución: a) 149,3 daN; b) 1 566 daN; c) 1 573 daN.

© Ediciones Paraninfo

6.15. CENTROS DE TRANSFORMACIÓN DE INTERIORES

■ Transformadores

Se designan por la potencia, tensión nominal y grupo de conexión.

Los transformadores utilizados usualmente y sus características para líneas de 20 kV, se indican en la tabla siguiente:

Tabla 6.4

Potencias (KVA).	160	250	400	630	1000
Pérdidas en vacío (W).	460	650	930	1 300	1 700
Pérdidas en carga a 75 °C (W).	2 350	3 250	4 600	6 500	10 500
Nivel de ruido (dB).	50	52	54	56	57
Conexión.	Dy11				
Tensión nominal primario (kV).	20				
Tensión nominal secundaria (V).	400				
Tensión más elevada para el material (kV).	24				
Regulación de tensión en el arrollamiento de A.T.	±2,5% ±5%				
Tensión de cortocircuito a 75 °C.	4% - 6%				
Intensidad que soporta en cortocircuito con una duración de 2 s (kA).	25 X I nominal.				
Aislamiento.	Aceite mineral.				

El transformador más utilizado tiene el circuito magnético formado por chapa magnética de grano orientado y los arrollamientos de cobre o aluminio. Los aislantes son de clase A (temperatura límite de trabajo 105 °C), como papel impregnado en aceite y barnices aislantes.

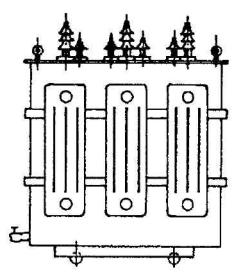


Fig. 6.13

La cuba (fig. 6.13) lleva en la parte superior los bornes con aisladores pasatapas, los cáncamos de elevación, el dispositivo de llenado de aceite y el alojamiento del termostato. En la parte inferior tiene ruedas orientables y en dos caras laterales opuestas dos indicadores de nivel de aceite. En la parte inferior de una de las caras laterales lleva el dispositivo de vaciado, y en la parte inferior derecha de las dos caras de mayor dimensión dos tomas de puesta a tierra. La cuba está construida de acero, con radiadores para disipación del calor y con tratamiento anticorrosivo y pintura. Las más utilizadas son de llenado integral, de forma que cuando varía con la temperatura el volumen del aceite refrigerante, también la cuba se deforma elásticamente un volumen igual al producido en la dilatación del aceite.

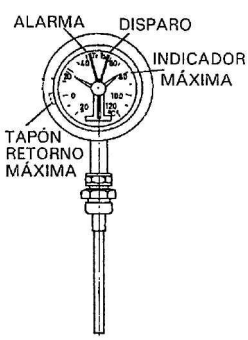


Fig. 6.14

Se utilizan también en los centros de transformación transformadores aislados con silicona y transformadores secos. En éstos los devanados van encapsulados con resinas epoxi.

© Ediciones Paraninfo

El termostato del transformador controla la carga del transformador por la temperatura del líquido aislante, el más utilizado es el termostato de esfera (fig. 6.14). El elemento detector de temperatura está introducido en el aceite. Lleva dos contactos, uno para alarma (a la temperatura 80 °C), y otro para disparo del interruptor automático (a la temperatura de 90 °C).

Actualmente, se utilizan también en lugar del termostato, un dispositivo de detección de la presión de gas y de la temperatura.

En los transformadores secos se utiliza un circuito electrónico con detectores de temperatura por termorresistencias. El dispositivo lleva también contactos de alarma y disparo.

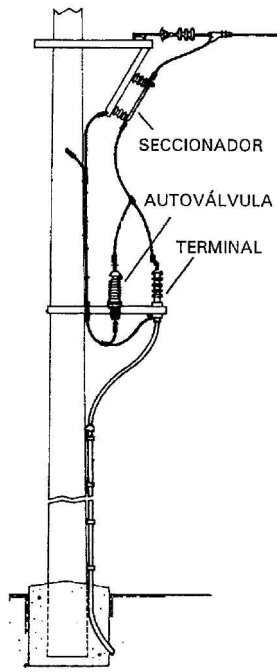


Fig. 6.15

■ **Línea de alimentación en M.T.**

Suele ser subterránea, desde otro centro de transformación o de una línea aérea. En este caso la derivación se realiza en un apoyo, con tres seccionadores unipolares de M.T. y tres autoválvulas (fig. 6.15).

■ **Fusibles de M.T. para interior**

Protegen a los transformadores de distribución contra cortocircuitos. Se escogen según la potencia nominal del transformador. Como orientación se indican en la tabla siguiente:

Tabla 6.5

Potencia nominal del transformador (kVA).	160	250	400	630	1 000
Intensidad nominal del fusible (A).	25	25	40	63	100
Tensión nominal (kV).	24 kV				
Poder de corte nominal.	20 kA				

■ **Cuadros de B.T.**

La salida en B.T. del transformador se conecta al cuadro de distribución en baja tensión, mediante cable con conductores de cobre o aluminio, aislamiento RV y tensión 0,6/1 kV (fig. 6.16). Suele utilizarse cable con conductor de aluminio, de sección según la potencia del transformador (sección mínima 150 mm^2 según proyecto UNESA).

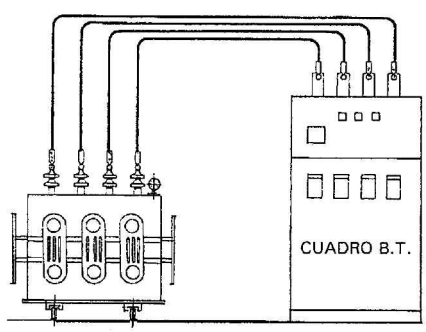


Fig. 6.16

El cuadro de B.T. es metálico y lleva un embarrado (fig. 6.17) formado por pletinas de cobre, que suelen ser dos pletinas de 80×5 mm para fases y una pletina de

© Ediciones Paraninfo

40×5 mm para neutro. Además de la unidad de embarrado, el cuadro suele llevar una unidad de control, con tres transformadores de intensidad, tres amperímetros, voltímetro y conmutador voltimétrico. Los elementos del cuadro de B.T. deben poder soportar una tensión de 10 kV a masa.

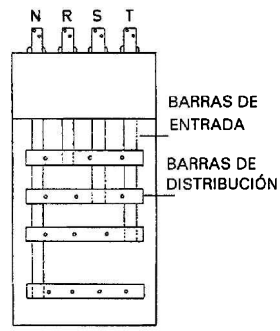


Fig. 6.17

El cuadro de B.T. de la empresa distribuidora de energía suele tener una unidad de seccionamiento, formada por barras seccionadoras de pletina de cobre, deslizantes y maniobrables con llave aislada. La protección se realiza con fusibles (fig. 6.18).

El cuadro de B.T. en un centro de transformación de abonado tiene habitualmente para corte y protección un interruptor general automático.

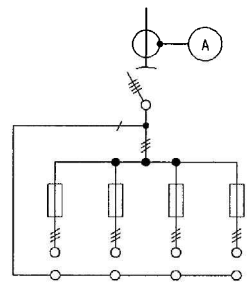


Fig. 6.18

■ Edificios prefabricados

Los centros de transformación tipo caseta para transformación de energía se realizan preferentemente en edificios prefabricados, de módulos de hormigón armado con: puertas de acceso para personal y maquinaria, rejillas de ventilación, canaletas para tendido de cables, foso de recogida de aceite, orificios de entrada y salida de cables, orificios para cables de puesta a tierra e instalación de alumbrado.

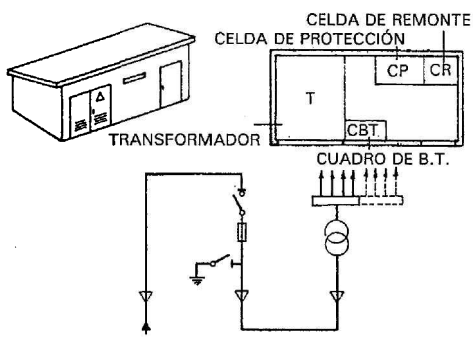


Fig. 6.19

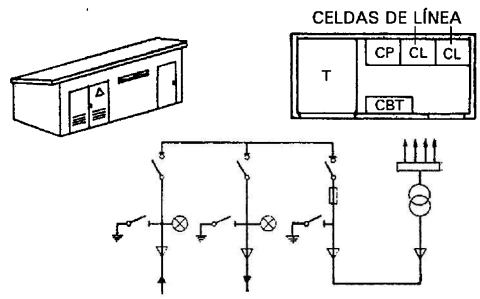


Fig. 6.20

Según la urbanización, los tipos de centros de transformación más usados son:

- Centros de transformación rurales (fig. 6.19), con una sola entrada. Tienen una celda de remonte para entrada del cable de M.T., celda de protección con interruptor seccionador, transformador y cuadro de B.T.
- Centros de transformación urbanos (fig. 6.20). Con entrada y salida de la línea de M.T. y dos celdas de línea, una celda de protección con interruptor seccionador y fusibles, transformador y cuadro de B.T.

© Ediciones Paraninfo

■ Celdas en el centro de transformación.

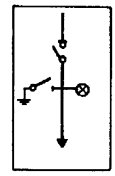


Fig. 6.21

1) *Celda de línea*, para entrada y salida de los cables (fig. 6.21). Lleva un interruptor seccionador, seccionador de puesta a tierra, aisladores capacitivos (uno por fase) y pilotos señalizadores de tensión (situados en la parte delantera con colores marrón amarillo y verde), alojamiento para terminales del cable y barras de interconexión.

El interruptor seccionador, tiene apertura y cierre simultáneo en los tres polos, con posición abierta visible, tensión nominal 24 kV e intensidad nominal 400 A.

El seccionador de puesta a tierra está situado entre el terminal del cable y el aparato de protección y maniobra.

En C.T. de usuario la construcción de estas celdas debe adaptarse a las normas de la empresa distribuidora, que es la única que tiene acceso a ellas según la instrucción MIE RAT 19.

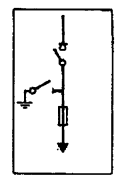


Fig. 6.22

2) *Celda de protección* (fig. 6.22), utilizada para maniobra y protección. Lleva un interruptor seccionador, fusibles, seccionador de puesta a tierra, alojamiento para terminal del cable, bobina de disparo (accionada por el termostato del transformador) y barras de interconexión. Al conjunto interruptor-seccionador fusible se le llama ruptofusible cuando al fundir el fusible, su percutor hace abrir el interruptor-seccionador. Esta protección está siendo sustituida por interruptor automático o disyuntor, que mediante relés protege contra sobrecargas y cortocircuitos.

Las características eléctricas más usuales de los aparatos de corte y maniobra son: tensión nominal 24 kV, intensidad nominal 400-630-1 250 A, intensidad de corta duración (1 s) 16 kA, intensidad de cresta 40 kA, poder de cierre 40 kA, nivel de aislamiento a tierra con impulso de tipo rayo 125 kV, nivel de aislamiento a tierra a 50 Hz durante 1 minuto 50 kV. El poder de corte depende de cada aparato.

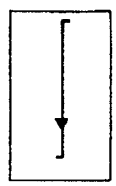


Fig. 6.23

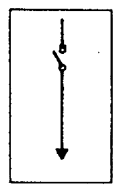


Fig. 6.24

3) *Celda de remonte* (fig. 6.23). Con alojamiento para terminación del cable.

4) *Celda de seccionamiento*. Lleva un seccionador, alojamiento para terminal del cable y barras de conexión (fig. 6.24). Se utiliza también la celda de seccionamiento en centros de seccionamiento (utilizados para conexión y desconexión de líneas de M.T.) y conectada con celdas de línea (fig. 6.25).

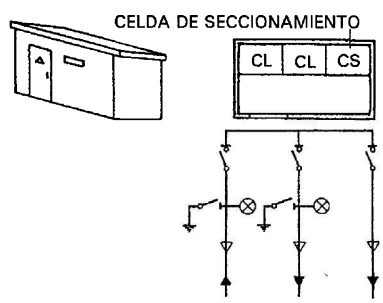


Fig. 6.25

© Ediciones Paraninfo

5) *Celda de medida*, donde se conectan primero los transformadores de intensidad (de relación x/5 A) y luego los transformadores de tensión (de relación 22 000/110 V), por este orden y siguiendo el sentido de la corriente (fig. 6.26). Esta celda se precinta por la empresa distribuidora de energía. El equipo de medida conectado a estos transformadores, contadores, interruptor horario, etc. se sitúan fuera de la celda.

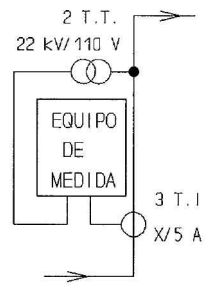
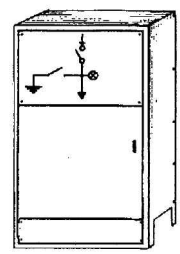


Fig. 6.26

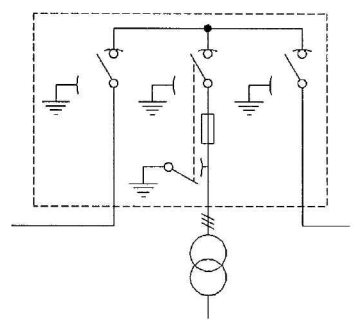
Las celdas prefabricadas suelen realizarse en perfiles y chapa metálica, con puerta de acceso en parte frontal inferior y con esquema eléctrico unifilar en la parte frontal superior (fig. 6.27).

Estas celdas cumplen unas condiciones de enclavamiento:

- Todas las maniobras normales solo pueden realizarse con la puerta cerrada.
- Sólo se accede al interior de las celdas cuando está cerrado y en cortocircuito el seccionador de puesta a tierra. Las puertas quedan enclavadas en posición cerrada mientras no se cierre este seccionador.
- El interruptor seccionador y el seccionador de puesta a tierra no pueden estar cerrados a la vez.
- Todos los dispositivos de enclavamiento permiten su anulación desde el interior de la celda para realizar operaciones de mantenimiento.
- Los mandos de los interruptores no pueden ser quitados de sus alojamientos sin completar la maniobra.


Fig. 6.27

Actualmente existe gran variedad de celdas prefabricadas. Además de las celdas modulares, se utilizan *celdas compactas* (fig. 6.28) de dimensiones reducidas, con las funciones de protección, línea y remonte integradas en una única envolvente metálica rellena de exafluoruro de azufre.


Fig. 6.28

■ Red de puesta a tierra

Aparte de la puesta a tierra del neutro del transformador (tierra de servicio), las masas metálicas del centro de transformación (fig. 6.29), se unen entre sí a tierra (tierra de protección).

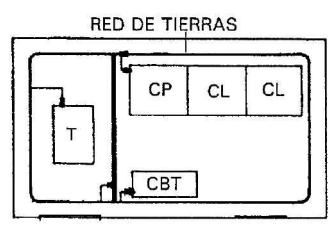


Fig. 6.29

Las celdas prefabricadas se conectan a tierra mediante pletina de cobre situada en el interior de la celda en su parte posterior inferior y conexionada a las celdas contiguas mediante tornillos. Las puestas de acceso a las celdas están conectadas a tierra mediante conductor flexible de cobre.

© Ediciones Paraninfo

Una disposición muy utilizada para las tomas de tierra es disponerla en forma de rectángulo de 5×3 m, con conductor de cobre, de sección 50 mm^2 y una pica de acero cobreada de longitud 2 m y diámetro 14,6 mm, colocadas en los cuatro vértices del rectángulo y enterradas en zanjas con profundidad 0,8 m. Las picas, mediante elementos roscados, se alargan hasta una profundidad de 8 m. Cada circuito de puesta a tierra lleva en un lugar accesible un borne para la medida de puesta a tierra.

Como medidas adicionales de seguridad para tensiones de contacto, UNESA recomienda en el piso del local destinado a centro de transformación la realización de un mallazo electrosoldado con redondos de diámetro inferior a 4 mm, formando una retícula no superior a $0{,}3 \times 0{,}3$ m. Este mallazo se cubre de una placa de 0,1m de hormigón como mínimo, y se conecta a la red de tierra en dos puntos perfectamente opuestos.

La separación entre tomas de tierra de neutro y protección del CT, o entre tierra de protección y masas de la instalación de utilización, debe ser como mínimo 15 m en terrenos de poca resistividad ($\rho < 100$ Ωm), según ITC-BT-18. Para mantener las tomas de tierra independientes, el neutro se conecta a tierra con conductor aislado de tensión 0,6/1 kV, protegido bajo tubo de PVC.

Las tomas de tierra deben ser independientes si la tensión de defecto a tierra es superior a la tensión de contacto máxima aplicada según MIE-RAT 13.

■ **Alumbrado del C.T.**

El centro de transformación en caseta o subterráneo lleva una instalación de alumbrado, alimentada desde el cuadro de baja tensión, con punto de luz de emergencia (fig. 6.30). El nivel de iluminación es del orden de 150 lux con dos puntos de luz como mínimo.

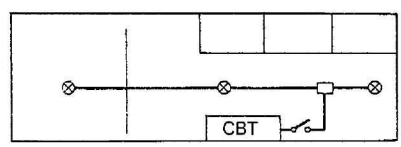


Fig. 6.30

■ **Bomba de achique del C.T. situado en sótano o subterráneo**

Cuando el centro de transformación está situado bajo tierra, lleva un bomba eléctrica de achique de agua, con motor monofásico 220 V, 0,5 CV. Una boya detectora del nivel de agua hace funcionar el motor.

■ **Material auxiliar**

El centro de transformación, además de la placa de identificación y señal de riesgo eléctrico colocadas en exterior, lleva cartel con esquema e instrucciones de funcionamiento, cartel de primeros auxilios, banqueta aislante y dispositivos de accionamiento manual de las celdas, si son necesarios.

■ **Esquemas eléctricos generales del C.T. en edificio prefabricado**

Los esquemas eléctricos dependen del número y tipo de celdas del centro de transformación. En la figura 6.31 se representa el esquema de un centro de transformación con una celda de entrada, otra de salida, celda de protección del transformador, transformador y cuadro de B.T.

© Ediciones Paraninfo

6.16. VENTILACIÓN DEL CENTRO DE TRANSFORMACIÓN

Los recintos destinados a centros de transformación deben tener renovación de aire para evacuar el calor originado por las pérdidas de potencia en el transformador, que se transforman en energía calorífica. Se consigue así que el transformador no supere la temperatura máxima que permiten los aislantes utilizados.

La renovación de aire puede ser natural o forzada con ventiladores.

La ventilación natural se realiza con una rejilla de entrada de aire situada con mínimo a 0,3 m del suelo, y la salida mediante rejilla de sección ligeramente superior a la de entrada, situada a una separación vertical mínima con respecto a ésta de 1,3 m, según la Norma Técnica de Edificación (NTE IET).

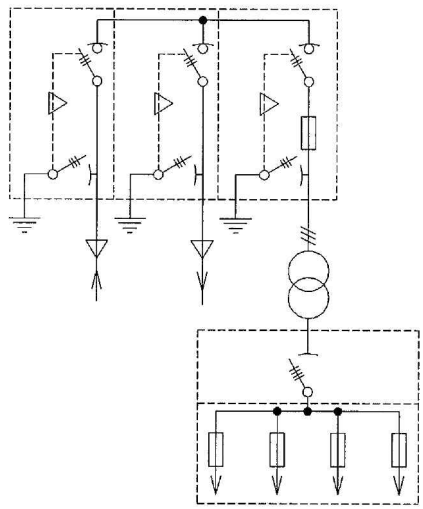


Fig. 6.31

En los centros de transformación subterráneos o semienterrados se realiza la toma de aire mediante patinillo adyacente al transformador con rejilla horizontal superior y sistema de recogida de aguas; también con pocetes con rejilla superior y recogida de aguas, con un conducto de hormigón en forma de s para comunicación con el local del transformador. La salida de ventilación se realiza mediante huecos horizontales en la cubierta con rejilla y sistema de recogida de aguas conectado al saneamiento o mediante rejilla en la parte superior de la fachada, cuando el centro de transformación es semienterrado.

■ Caudal de aire necesario

El caudal de aire es función de las pérdidas de potencia del transformador y de la diferencia de temperaturas de entrada y salida de aire (15 °C como máximo según proyecto tipo UNESA). Considerando que 1 m^3 de aire por segundo absorbe 1,16 kW por cada grado centígrado, el caudal de aire necesario:

$$Q = \frac{P_p}{1{,}16\,\Delta\theta_a}$$

Q: Caudal de aire (m^3/s).

P_p: Perdida de potencia del transformador a plena carga, perdidas en vacío o en el hierro más pérdidas en el cobre o en cortocircuito (kW).

$\Delta\Theta_a$: Incremento de temperatura del aire (°C).

© Ediciones Paraninfo

■ **Sección mínima de la rejilla**

La sección de la rejilla es función del caudal y de la velocidad de salida del aire:

$$S_r = \frac{Q}{v_s}$$

S_r: Sección neta de la rejilla (m^2).

v_s: Velocidad de salida del aire (m^3/s).

La sección total es superior a la sección neta debido a que las láminas de la rejilla (para no permitir el paso de agua, pequeños animales o de objetos metálicos según MIE RAT 13) disminuyen el paso de aire; por lo que la sección total mínima de la rejilla se aumenta como mínimo en un 40%.

La velocidad de salida de aire es función de la distancia vertical H (m) entre los centros de las dos rejillas:

$$v_s = 4{,}6\frac{\sqrt{H}}{\Delta\theta_a}$$

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

6.16-1 Un transformador de 800 kVA, 20/0,4 kV, tiene de pérdidas en vacío 1,6 kW y en cortocircuito 8,1 kW a plena carga. Calcular:

a) Caudal necesario para ventilación si el incremento de temperatura del aire es de 15 °C.

b) Velocidad de salida del aire si la altura entre las rejillas de entrada y salida es 2,1 m.

c) Sección neta de la rejilla.

a) El caudal de aire necesario $Q = \frac{P_p}{1{,}16\Delta\theta_a} = \frac{1{,}6 + 8{,}1}{1{,}16 \cdot 15} = 0{,}56\ m^3/s$

b) La velocidad de salida del aire $v_s = 4{,}6\frac{\sqrt{H}}{\Delta\theta_a} = 4{,}6\frac{\sqrt{2{,}1}}{15} = 0{,}44\ m/s$

c) La sección neta mínima de la rejilla $S_r = \frac{Q}{v_s} = \frac{0{,}56}{o{,}44} = 1{,}27\ m^2$

6.16-2 Calcular el caudal necesario para ventilación de un transformador de 1 600 kVA con pérdida de potencia a plena carga de 19,6 kW, para un incremento de temperatura del aire de 15 °C.

Solución: 1,126 m^3/s.

6.16-3 Un centro de transformación utiliza un transformador de 1 000 kVA con pérdida de potencia a plena carga de 12,2 kW, para ventilación se considera un incremento de temperatura del aire de 15 °C, y la altura entre las rejillas de entrada y salida de aire es de 2 m. Calcular:

a) Caudal de aire necesario.

b) Sección neta necesaria en las rejillas de ventilación.

Solución: a) 0,7 m^3/s; b) 1,63 m^2

© Ediciones Paraninfo

6.17. VERIFICACIONES PREVIAS A LA CONEXIÓN DE UN CENTRO DE TRANSFORMACIÓN

Para la conexión por primera vez a la red de un C.T., después de los requisitos administrativos:

1) Se revisa la instalación en todos sus elementos: ubicación, edificio, transformador, aparamenta, equipo de medida, red de tierras, etc.
   Los principales puntos a revisar son:
   - Limpieza de las instalaciones.
   - Limpieza y revisión de los contactos de toda la aparamenta, que deben tener la presión adecuada.
   - Revisión de las normas de explotación y de las normas de los aparatos a poner en servicio.
   - Comprobación del buen funcionamiento de los dispositivos de mando y enclavamiento de los aparatos, realizando las maniobras habituales, y verificación del tiempo de actuación de los relés.
   - Comprobación de las conexiones de las barras y que no hay peligro de cortocircuito entre ellas.
   - Observación del nivel de aceite del transformador y verificación del funcionamiento del relé de gases y del relé de temperatura.
   - Comprobación del buen aislamiento eléctrico de toda la instalación, verificando que las condiciones de la instalación están de acuerdo con las prescripciones reglamentarias.
   - Comprobación de los circuitos y las tomas de tierra, midiendo la resistencia de las tomas de tierra y las tensiones de paso y de contacto.
2) Antes de conectar a la red eléctrica, se avisa al titular de la instalación y a todo el personal relacionado con el C.T. A partir de este aviso se considera la instalación como en tensión.
3) Se conecta a la red por el lado de alta tensión y se comprueba que la salida de baja tensión está comprendida entre -7% y +7% de la tensión nominal, verificándose el funcionamiento de los relés de protección.
4) Se conecta la red de baja tensión, observando las posibles anomalías.
5) Se da de alta la instalación si el funcionamiento es correcto o si se han corregido las anomalías.

6.18. MANIOBRAS DE CONEXIÓN Y DESCONEXIÓN EN EL CENTRO DE TRANSFORMACIÓN

- *Desconexión*:
  1) Desconectar el aparato de corte de B.T.
  2) Desconectar el aparato de corte en A.T.
  3) Desconectar el seccionador.
  4) Conectar el seccionador de puesta a tierra.

© Ediciones Paraninfo

- *Conexión*:

Para la conexión se sigue el orden inverso.

Existe enclavamiento entre interruptor y seccionador en serie, para evitar que éste pueda accionarse con el interruptor cerrado; y entre aparato de corte y seccionador de puesta a tierra, para que no puedan estar cerrados a la vez.

Debe utilizarse el material de seguridad necesario para cada maniobra.

6.19. MANTENIMIENTO DE LOS CENTROS DE TRANSFORMACIÓN

Los criterios de mantenimiento de los C.T. se basan en el artículo 12 del Reglamento de centrales eléctricas y centros de transformación y en el artículo 163 del Real Decreto 1955/2000, sobre transporte, distribución, comercialización, suministro y autorización de instalaciones de energía eléctrica. Se tiene en cuenta, además, el Reglamento electrotécnico para baja tensión y la Ordenanza de seguridad e higiene en el trabajo.

Se efectúa al menos cada tres años por técnicos titulados designados por el titular de la instalación, realizando las operaciones de mantenimiento del edificio e instalaciones según un plan de actuación y cumplimentando los boletines, en los que habrán de consignar y certificar expresamente los datos de los reconocimientos y el cumplimiento de las condiciones reglamentarias o la propuesta de las medidas correctoras necesarias. Los boletines se mantendrán en poder del titular de la instalación quien deberá enviar copia a la Administración competente. Las intervenciones en el C.T. se anotan en el libro de instrucciones de control y mantenimiento (MIE RAT 14).

La inspección de la instalación se realiza por las Delegaciones de Industria o por otros órganos o entidades reconocidas, según criterios basados en la instrucción MIE RAT 13. Las inspecciones se suelen realizar con la instalación bajo tensión y del resultado de la inspección se toma acta, registrando las anomalías en: transformador, aparamenta, protecciones, embarrado, puestas a tierra, estructura y obra civil, etc. De este acta se entrega una copia al titular de la instalación y otra a la Administración competente.

6.20. CÁLCULO DE LA TOMA DE TIERRA

■ Resistividad del terreno

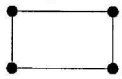
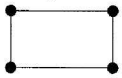
Se toma un valor ρ (Ωm), según el tipo de terreno de acuerdo con la instrucción MIE-RAT 13. También se puede medir la resistividad del terreno.

■ Configuración de la toma de tierra

Se escoge una configuración y se obtiene según tablas de UNESA la resistencia K_r (Ω/Ωm), la tensión de paso K_p (V/ΩAm) y la tensión de contacto K_c (V/ΩAm). En la tabla siguiente se dan estos valores para dos configuraciones rectangulares muy utilizadas, con una profundidad de enterramiento de 0,8 m, conductor de 50 mm^2 y picas de diámetro 14 mm.

© Ediciones Paraninfo

Tabla 6.6

CONFIGURACIÓN		LONGITUD DE LAS PICAS L_p (m)	RESISTENCIA K_r (Ω/ Ωm)	TENSIÓN DE PASO K_p (V/ ΩAm)	TENSIÓN DE CONTACTO K_c (V/ ΩAm)
RECTÁNGULO 4x3 m	Sin picas	-	0,131	0,0200	0,0816
	4 picas 	2	0,096	0,0160	0,0491
		4	0,077	0,0124	0,0347
		6	0,065	0,0101	0,0266
		8	0,0056	0,0084	0,0214
RECTÁNGULO 5x3 m	Sin picas	-	0,118	0,0177	0,0719
	4 picas 	2	0,089	0,0145	0,0447
		4	0,073	0,0114	0,0323
		6	0,062	0,0094	0,0250
		8	0,054	0,0079	0,0203

En la tabla siguiente se dan los parámetros característicos de la configuración de toma de tierra con picas de 14 mm de diámetro y longitud 4 m, unidas en hilera por un conductor de 50 mm^2 a una profundidad de 0,8 m, con separación entre ellas de 6 m.

Tabla 6.7

N° DE PICAS	2	3	4	6	8
RESISTENCIA K_r (Ω/ Ωm)	0,110	0,073	0,0558	0,0390	0,0305
TENSIÓN DE PASO K_p (V/ ΩAm)	0,0139	0,0087	0,00633	0,00408	0,00301

- **Resistencia de puesta a tierra**

  Es el valor R_T (Ω). $R_T = \rho \cdot K_r$

- **Intensidad de defecto a tierra**

  Es inversamente proporcional a la impedancia del circuito de puesta a tierra.

  - *Neutro aislado en la subestación de la que parte la línea de M.T.*

    Se calcula la reactancia capacitiva X_c (Ω), de puesta a tierra. $X_c = \dfrac{1}{3C\omega}$

    La pulsación de la corriente alterna de frecuencia 50 Hz $\omega = 2\pi f = 100 \cdot \pi$ rad/s

    La capacidad C (μF) $C = 0{,}006L_a + 0{,}25L_b$

    L_a: Longitud de la línea aérea de M.T. (km)

    L_b: Longitud de la línea subterránea de M.T. (km)

    La intensidad máxima I_d (A), de defecto a tierra $I_d = \dfrac{V_L}{\sqrt{3}\sqrt{R_T^2 + X_c^2}}$

    V_L: Tensión de línea (V).

© Ediciones Paraninfo

- *Neutro en la línea de M.T. puesto a tierra a través de una reactancia.*

  La intensidad de defecto a tierra $I_d = \dfrac{V_L}{\sqrt{3}\sqrt{(R_T + R_n)^2 + X_n^2}}$

  R_n: Resistencia de puesta a tierra del neutro de la red (Ω).

  X_n: Reactancia de puesta a tierra del neutro de la red (Ω).

  La corriente de defecto a tierra, originada por un fallo de aislamiento, debe ser mayor que la corriente de arranque I_a del relé de protección conectado sobre la conexión del neutro a tierra.

$$I_d \geq I_a$$

■ **Tensión de paso máxima**

Es el valor $V_{pmáx}$ (V). $V_{pmax} = K_p \cdot \rho \cdot I_d$

■ **Tensión de paso admisible**

Es el valor V_p (V). Se calcula según la instrucción MIE-RAT 13 del Reglamento de centrales eléctricas, subestaciones y centros de transformación.

$$V_p = \frac{10K}{t^n}\left(1 + \frac{6\rho}{1\,000}\right)$$

Los valores de K y n se escogen en función del tiempo t (s) de duración del defecto de acuerdo con el Reglamento de centrales eléctricas, subestaciones y centros de transformación, según la instrucción (MIE RAT 13). El tiempo de duración del defecto es un dato suministrado por la empresa distribuidora de energía, que suele ser inferior a 0,9 s. En este caso K=72 y n=1.

La tensión de paso máxima debe ser menor que la admisible.

■ **Tensión de paso admisible en el acceso al centro de transformación**

Es la tensión de paso $V_{p(acc)}$ (V), a la que puede quedar expuesta una persona cuando tiene un pie en el terreno de resistividad ρ y otro sobre el pavimento del centro de transformación de resistividad ρ'(hormigón con resistividad elevada):

$$V_{p(acc)} = \frac{10K}{t^n}\left(1 + \frac{3\rho + 3\rho'}{1\,000}\right)$$

Esta tensión de paso debe ser mayor que la tensión de contacto máxima.

■ **Tensión de contacto máxima**

Es el valor $V_{cmáx}$ (V). $V_{cmáx} = K_c \cdot I_d \cdot \rho$

■ **Tensión de contacto admisible**

Es el valor V_c (V). $V_c = \dfrac{K}{t^n}\left(1 + \dfrac{1{,}5\rho}{1\,000}\right)$

La tensión de contacto máxima debe ser menor que la admisible. Esto no se cumple en muchos casos por lo que adoptan las siguientes medidas de seguridad:

© Ediciones Paraninfo

- Las puertas y rejillas metálicas que den al exterior del centro no tendrán contacto con masas conductoras que pueden quedar bajo tensión por defectos o averías.
- Realización en el piso del local destinado a centro de transformación de un mallazo electrosoldado con redondos de diámetro inferior a 4 mm, formando una retícula no superior a 0,3×0,3 m. Este mallazo se cubre de una placa de 0,1 m de hormigón como mínimo, y se conecta a la red de tierra en dos puntos perfectamente opuestos. Así se consigue que el suelo del centro de transformación sea una superficie equipotencial.

■ **Tensión de defecto**

Es el valor V_d (V). $V_d = R_T \cdot I_d$

Esta tensión debe ser inferior al nivel de aislamiento de la instalación de B.T., que suele ser de 10 kV. Si esta tensión de defecto es menor o igual a la tensión de contacto máxima aplicada según MIE-RAT 13, se puede colocar una sola toma de tierra para protección del CT y utilización del edificio (ITC-BT-18).

$$V_d \leq V_{ca} = \frac{K}{t^n}$$

Cuando el C.T. no está en edificio propio, sino que forma parte de una edificación mayor, se realiza en el suelo una superficie equipotencial según la recomendación de UNESA, con lo que no pueden aparecer tensiones de paso y de contacto en el mismo, y la toma de tierra se suele efectuar con configuración lineal alejada del acceso frente al CT. En este caso la tensión de paso en el acceso debe ser mayor que la tensión de defecto.

■ **Separación entre tomas de tierra**

La separación D (m) entre las tomas de tierra de protección del CT y de utilización del edificio será como mínimo 15 m, para terrenos de resistividad $\rho < 100 \Omega m$.

Para terrenos de más resistividad se calcula (ITC-BT-18): $D \geq \frac{I_d \cdot \rho}{2\pi \cdot U}$

I_d: Intensidad de defecto a tierra en el lado de alta tensión, en amperios, que será facilitado por la empresa eléctrica.

En redes de distribución TT, $U = 1\,200$ V para tiempos de eliminación del defecto menores de 5 s y en caso contrario $U = 250$ V. En distribución TN, U será inferior a dos veces la tensión de contacto máxima admisible (ITC-BT-18).

No deben existir elementos conductores que conecten el recinto del centro de transformación o la zona de tomas de tierra con los locales de utilización.

Según recomendación UNESA, para un esquema de distribución TT, la toma de tierra de las masas de utilizacion debe ser independiente de la tierra del neutro. Se considera que pueden estar unidas si V_d es menor o igual a 1000V; en caso contrario la distancia ente estas tomas de tierra se calcula con $U = 1000$ V. La tierra del neutro, debe tener resistencia máxima de 37 Ω. En distribución TN, la resistencia de puesta a tierra del neutro se considera como máximo 2 Ω.

© Ediciones Paraninfo

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

6.20-1 La resistividad del terreno sobre el que está construido un centro de transformación es de 380 Ωm. La toma de tierra de protección se realiza colocando un rectángulo de 5×3 m alrededor del centro de transformación, con conductor de cobre de 50 mm² de sección, enterrado en zanjas de profundidad 0,8 m y cuatro picas de acero de 2 m de longitud y 14 mm de diámetro, situadas en los cuatro vértices del rectángulo y enterradas hasta una profundidad de 8 m. Para esta disposición, según tablas de UNESA, la resistencia $k_r=0{,}054\ \Omega/\Omega m$, la tensión de paso $k_p=0{,}0079\ V/\Omega Am$ y la tensión de contacto $K_c=0{,}0203\ V/\Omega Am$ (valores unitarios referidos a una intensidad de defecto de 1 A y a una resistividad de 1 Ωm). Calcular:

a) Resistencia de puesta a tierra.
b) Reactancia capacitiva de puesta a tierra, sabiendo que la longitud de la línea aérea de M.T. de 20 kV, dependiente de la subestación, es de 200 km y la longitud de la línea subterránea de M.T. 10 km.
c) Intensidad de defecto a tierra.
d) Tensión de paso máxima.
e) Tensión de paso admisible, para un tiempo de duración del defecto de 0,24 s.
f) Tensión de contacto máxima.
g) Tensión de contacto admisible.
h) Tensión de defecto.
i) Densidad de corriente en la línea de tierra si es de cobre de sección 25 mm².

a) La resistencia de puesta a tierra $R_T=\rho\cdot K_r = 380\cdot 0{,}054 = 20{,}52\ \Omega$

b) La capacidad $C = 0{,}006L_a + 0{,}25L_b = 0{,}006\cdot 200 + 0{,}25\cdot 10 = 3{,}7\ \mu F$

La reactancia capacitiva de puesta a tierra $X_c=\dfrac{1}{3C\omega} = \dfrac{1\cdot 10^6}{3\cdot 3{,}7\cdot 2\pi\cdot 50} = 286{,}77\ \Omega$

c) La intensidad máxima de defecto a tierra:

$$I_d=\frac{V_L}{\sqrt{3}\sqrt{R_T^2+X_c^2}} = \frac{20\cdot 10^3}{\sqrt{3}\cdot\sqrt{20{,}52^2+286{,}77^2}} = 40{,}16\ A$$

d) Tensión de paso máxima $V_{pmax}=K_p\cdot\rho\cdot I_d = 0{,}079\cdot 380\cdot 40{,}16 = 120{,}56\ V$

e) La tensión de paso admisible se calcula según la instrucción MIE-RAT 13. Para el cálculo K=72 y n=1:

$$V_p=\frac{10K}{t^n}\left(1+\frac{6\rho}{1\,000}\right) = \frac{10\cdot 72}{0{,}24}\left(1+\frac{6\cdot 380}{1\,000}\right) = 9\,840\ V$$

f) Tensión de contacto máxima $V_{cmáx}=K_c\cdot I_d\cdot\rho = 0{,}0203\cdot 40{,}16\cdot 380 = 309{,}8\ V$

g) Tensión de contacto admisible $V_c=\dfrac{K}{t^n}\left(1+\dfrac{1{,}5\rho}{1\,000}\right) = \dfrac{72}{0{,}24}\left(1+\dfrac{1{,}5\cdot 380}{1\,000}\right) = 471\ V$

h) Tensión de defecto $V_d=R_T\cdot I_d = 20{,}52\cdot 40{,}16 = 824\ V$

i) La densidad de corriente en el conductor de tierra:

$$\delta = \frac{I_d}{s} = \frac{40{,}16}{25} = 1{,}6\ A/mm^2 < 160\ A/mm^2 \quad (MIE-RAT\ 13)$$

© Ediciones Paraninfo

6.20-2 La toma de tierra de protección en un centro de transformación se realiza colocando un rectángulo de 4×3 m, con conductor de cobre de 50 mm² de sección, enterrado en zanjas de profundidad 0,8 m y cuatro picas de acero de 2 m de longitud y 14 mm de diámetro, situadas en los cuatro vértices del rectángulo. Para esta disposición, según tablas de UNESA, la resistencia k_r=0,096 Ω/Ωm, la tensión de paso k_p=0,0160 V/ΩAm y la tensión de contacto K_c=0,0491 V/ΩAm (valores referidos a una intensidad de defecto de 1 A y a una resistividad de 1 Ωm). La resistividad del terreno es 240 Ωm. La subestación tiene el neutro conectado a tierra con R_n=0 Ω y X_n=26 Ω. El tiempo de actuación de las protecciones es de 0,7 s y la intensidad de arranque del relé sobre el neutro es de 50 A. La línea de M.T. es de 20 kV. Calcular:

a) Resistencia de puesta a tierra.
b) Intensidad de defecto a tierra.
c) Tensión de paso máxima.
d) Tensión de contacto máxima.
e) Tensión de defecto.
f) Comprobar si las tensiones de paso y de contacto son admisibles.

Solución: a) 23,04 Ω; b) 332,4 A; c) 1 276,4 V; d) 3 917 V; e) 7 658,5 V; f) V_p=2509,7 V, V_c=139,9 V. La tensión de contacto es mayor que la admisible. Habrá que realizar otra configuración de electrodos o tomar medidas alternativas.

6.20-3 Calcular la tensión de paso admisible en el acceso al centro de transformación anterior, si el suelo es equipotencial con hormigón de resistividad 3 000 Ωm.

$$V_{p(acc)}=\frac{10K}{t^n}\left(1+\frac{3\rho+3\rho'}{1\,000}\right)=\frac{10\cdot 72}{0,7}\left(1+\frac{3\cdot 240+3\cdot 3\,000}{1\,000}\right)=11\,026\ \text{V}$$

Tensión mayor que la de contacto máxima en el exterior.

6.20-4 La toma de tierra de protección en un centro de transformación situado en el interior de un edificio, se realiza con conductor de cobre de 50 mm² de sección, enterrado en zanjas de profundidad 0,8 m y dos picas de acero cobreado de 4 m de longitud y 14 mm de diámetro, separadas 6 m y alejadas del acceso al C.T. Para esta disposición, según tablas UNESA, la resistencia k_r=0,11 Ω/Ωm y la tensión de paso k_p=0,0139 V/ΩAm. En el suelo del CT se construye una superficie equipotencial según la recomendación de UNESA. La resistividad del terreno es 280 Ωm. La intensidad de defecto a tierra es 320 A y el tiempo de actuación de las protecciones 0,7 s. Calcular:

a) Tensión de paso máxima y tensión de paso exterior admisible.
b) Tensión de paso admisible en el acceso con hormigón de resistividad 3 000 Ωm.
c) Tensión de defecto.

Solución: a) 1 245,4 V, 2 756,6 V; b) 11 150 V; c) 9 856 V.

6.20-5 En una toma de tierra, la intensidad de defecto a tierra es de 161 A y la resistencia de tierra es de 21 Ω. Calcular:

a) Tensión de defecto.
b) Separación mínima entre toma de tierra de neutro y toma de tierra de protección, si la resistividad del terreno es 380 Ωm y el tiempo de eliminación del defecto 0,8 s.

Solución: a) 3 381 V; b) 8,11 m

© Ediciones Paraninfo

PROBLEMAS DE RECAPITULACIÓN

P.6-1. Un centro de transformación se proyecta con un transformador de 630 kVA, 20/0,4 kV, tensión de cortocircuito 4% y 300 MVA de potencia de cortocircuito en la entrada de M.T. Calcular:

a) Intensidad nominal en el primario.
b) Intensidad de cortocircuito permanente en el primario, considerando en bornes la potencia de cortocircuito de M.T.
c) Intensidad de cortocircuito de choque el primario.
d) Intensidad nominal en el secundario
e) Intensidad de cortocircuito en los bornes del secundario considerando solamente la impedancia del transformador.
f) Fuerza máxima en el embarrado de M.T. si se utiliza pletina de cobre de 40×10 mm, con separación entre fases de 25 cm y separación entre apoyos de 1,2 m.
g) Coeficiente de trabajo de las barras.

Solución: a) 18,19 A; b) 8,66 kA; c) 22 kA; d) 909,3 A; e) 22,7 kA; f) 47,4 daN; g) 1 066 daN/cm^2.

P.6-2 En un centro de transformación se utiliza un transformador de 1 600 kVA, 20/0,4 kV y caída de tensión porcentual de cortocircuito $u_{cc}\% = 6$. Calcular, considerando la potencia de cortocircuito en la red de M.T. 450 MVA:

a) Intensidad de cortocircuito en bornes del primario, considerando en bornes la potencia de cortocircuito.
b) Resistencia y reactancia de cortocircuito del transformador referida al secundario, si las pérdidas en cortocircuito del transformador son 17 kW.
c) Intensidad de cortocircuito en bornes del secundario considerando la impedancia de la red de M.T. como reactancia.

Solución: a) 13 kA; b) $R_{cc} = 0{,}00106\ \Omega$; $X_{cc} = 0{,}0059\ \Omega$; c) 36,4 kA

P.6-3 Un apoyo de 11 m y longitud de empotramiento 2 m, con cruceta recta en la punta, soporta un transformador de intemperie a una altura sobre el suelo del centro de gravedad del transformador de 7 m. El vano de amarre, con conductores LA 56, es de 74 m. Calcular:

a) Fuerza transversal en la punta del apoyo debida a la acción del viento sobre los conductores y sobre el transformador, de superficie lateral 1,1 m^2.
b) Fuerza resultante en el extremo del apoyo si los conductores están sometidos a un tense máximo de 556 daN.

Solución: a) 148,5 daN; b) 1 674,6 daN.

P.6-4 Un transformador de 600 kVA, 20/0,4 kV, tiene de pérdidas totales 7,7 kW a plena carga. Calcular:

a) Caudal necesario para ventilación si el incremento de temperatura del aire es de 12 °C.
b) Velocidad de salida del aire si la altura entre las rejillas de entrada y salida es de 1,8 m.

© Ediciones Paraninfo

c) Sección neta de la rejilla de ventilación.
Solución: a) 0,553 m^3/s; b) 0,514 m/s; c) 1,08 m^2.

P.6-5 La resistividad del terreno sobre el que está construido un centro de transformación es de 120 Ωm. La toma de tierra de protección se realiza colocando un rectángulo de 4x3 m alrededor del centro de transformación, con conductor de cobre de 50 mm^2 de sección, enterrado en zanjas de profundidad 0,8 m y cuatro picas de acero cobreado de 2 m de longitud y 14 mm de diámetro, situadas en los cuatro vértices del rectángulo y enterradas hasta una profundidad de 4 m. Para esta disposición, según tablas de UNESA, la resistencia k_r=0,077 Ω/Ωm, la tensión de paso k_p=0,0124 V/ΩAm y la tensión de contacto K_c=0,0347 V/ΩAm (valores unitarios referidos a una intensidad de defecto de 1 A y a una resistividad de 1 Ωm. Calcular:
a) Resistencia de puesta a tierra.
b) Intensidad de defecto si la subestación es de neutro aislado, tensión 20 kV, longitud de la línea aérea dependiente de la subestación 110 km y de línea subterránea 15 km.
c) Tensiones de paso y de contacto máximas.
d) Tensiones de contacto y paso admisibles, para un tiempo de duración del defecto a tierra de 0,4 s.
e) Tensión de defecto.
Solución: a) 9,24 Ω; b) 48 A; c) 71,42 V, 200 V; d) 3 096 V, 212,4 V; e) 443,5 V.

P.6-6 La toma de tierra de protección en un centro de transformación situado en el interior de un edificio, se realiza con conductor de cobre de 50 mm^2 de sección, enterrado en zanjas de profundidad 0,8 m y tres picas de acero cobreado de 4 m de longitud y 14 mm de diámetro, colocadas en hilera, separadas 6 m y alejadas del acceso al C.T. Para esta disposición, según tablas de UNESA, la resistencia k_r=0,073 Ω/Ωm y la tensión de paso k_p=0,0087 V/ΩAm. En el suelo del C.T. se construye una superficie equipotencial según la recomendación de UNESA, con puertas y rejillas metálicas que den al exterior no conectadas al mallazo equipotencial. La resistividad del terreno es 250 Ωm. La intensidad de defecto a tierra es de 300 A y el tiempo de actuación de las protecciones 0,8 s. Calcular:
a) Resistencia de puesta a tierra
b) Tensión de paso máxima
c) Tensión de paso exterior admisible.
d) Tensión de paso admisible en el acceso con hormigón de resistividad 3 000 Ωm.
e) Tensión de defecto.
Solución: a) 18,25 Ω; b) 652,5 V; c) 2 250 V; d) 9 675 V; e) 5 475 V.

P.6-7 La toma de tierra del neutro en un centro de transformación se realiza con conductor de cobre de 50 mm^2 de sección, enterrado en zanjas de profundidad 0,8 m y dos picas de acero cobreado de 4 m de longitud y 14 mm de diámetro, colocadas en hilera, separadas 6 m. Para esta disposición, según tablas UNESA, la resistencia unitaria es k_r=0,11 Ω/Ωm. La resistividad del terreno es 200 Ωm. Calcular la resistencia de puesta a tierra.
Solución: 22 Ω

© Ediciones Paraninfo

7

TARIFACIÓN ELÉCTRICA

7.1. CONTADOR MONOFÁSICO DE INDUCCIÓN

Está constituido fundamentalmente (fig. 7.1) por una bobina de muchas espiras (a), con conductor de poca sección, conectada en paralelo, y otra bobina de pocas espiras (b), con conductor de gran sección, conectada en serie. En el campo magnético de las bobinas se halla un disco giratorio de aluminio (c) cuyo eje lleva un tornillo sinfín que acciona el mecanismo de relojería registrador (d). Un imán permanente (e) origina el frenado del disco por corrientes parásitas cuando éste gira.

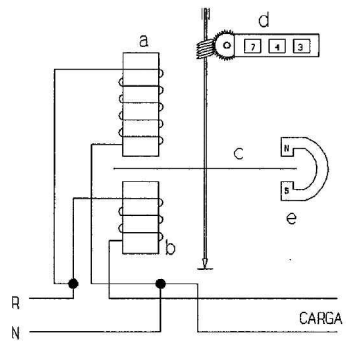


Fig. 7.1

Su funcionamiento está basado en la acción del campo magnético alternativo de las bobinas, recorridas por corriente alterna, sobre las corrientes parásitas del disco (engendradas por ese mismo campo) y que lo impulsan a girar.

Se utiliza como contador de energía en corriente alterna. Se representa por el símbolo kWh.

7.2. CONTADORES TRIFÁSICOS

Los contadores trifásicos constan de dos o tres sistemas de medida actuando sobre un mismo órgano móvil que acciona el mecanismo registrador.

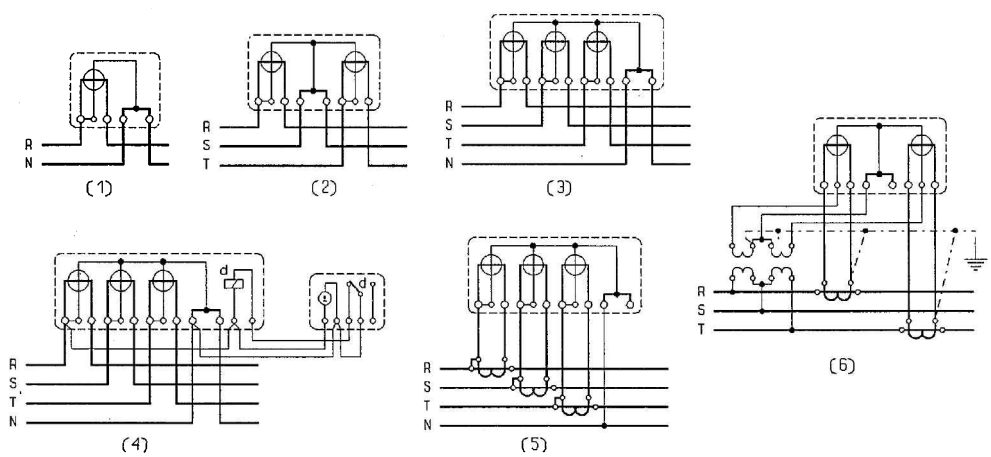


Fig. 7.2

© Ediciones Paraninfo

Los contadores trifásicos de energía activa tienen unas conexiones que se corresponden con las conexiones de medida de potencia con vatímetros (fig. 7.2). El esquema (1) indica un contador monofásico conectado directamente; los esquemas (2) y (3) indican contadores trifásicos a tres y cuatro hilos conectados directamente; el esquema (4) es de un contador trifásico a cuatro hilos con doble tarifa y reloj para cambio de la misma; el esquema (5) es de un contador trifásico a cuatro hilos conectado mediante transformadores de intensidad, y el esquema (6) corresponde a un contador a tres hilos para medida en alta tensión, conectado mediante transformadores de intensidad y de tensión.

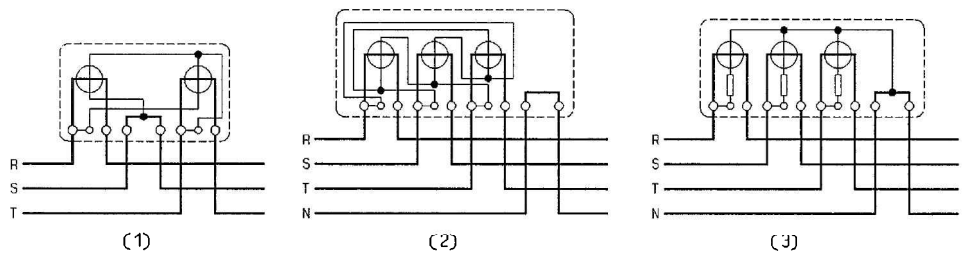


Fig. 7.3

Se construyen contadores trifásicos de energía reactiva, que tienen sus bobinas conexionadas de forma que miden en función del seno del ángulo de desfase entre la tensión y la intensidad (fig. 7.3). El esquema (1) corresponde a un contador trifásico a tres hilos, en el que la conexión de las fases en la sucesión que se indica hace que la medida sea de energía reactiva. El esquema (2) es de un contador trifásico a cuatro hilos, y el esquema (3) indica un contador en el cual el desfase necesario entre los flujos magnéticos para la medida de energía reactiva, se consigue mediante una resistencia óhmica en serie con la bobina de tensión y otra resistencia en paralelo con la bobina de intensidad (que no se representa). Este último contador no se suele utilizar por tener fácilmente averías y un consumo interno alto.

Se construyen contadores especiales de energía eléctrica; los más usados son:

- *Contadores de doble o de triple tarifa*. Constan de un impulsor y dos o tres mecanismos totalizadores, uno para cada tarifa (punta, llano y valle). Mediante un interruptor horario, queda acoplado al eje de giro del contador el mecanismo totalizador que corresponde según la hora.

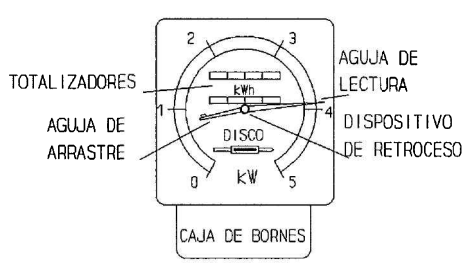


Fig. 7.4

© Ediciones Paraninfo

- *Contadores de máxima.* Constan, además del totalizador (fig. 7.4), de un mecanismo que señala la potencia máxima durante un período de tiempo (indicador) o la registran mediante un trazo en una cinta de papel (registrador). El contador con indicador de máxima lleva una escala graduada en kW. Una aguja de arrastre indica la máxima potencia durante 15 minutos, arrastra la aguja de lectura y vuelve a cero. La aguja indicadora registra la potencia máxima consumida en un tiempo. Cuando se efectúa la lectura del contador por parte de la empresa suministradora de energía, se coloca la aguja de lectura en la posición de cero. Se utilizan también maxímetros acumulativos, que en lugar de las agujas indicadoras están provistos de sistema mecánico que indica, mediante dígitos, la potencia media en cada período, la potencia máxima en cada período de facturación y la potencia que acumula cada vez que se pone a cero.

7.3. CONTADORES DE IMPULSOS

Utilizados en telemedida, que consiste en la medida y control de la energía consumida por un usuario mediante sistemas de control a distancia.

Para el sistema de telemedida son necesarios:

- Contadores de energía con emisor de impulsos. Un detector del giro del disco transforma esta señal en impulsos u oscilaciones de frecuencia.
- Equipo de concentradores de impulsos que reciben los impulsos de los contadores.
- Sistemas de transmisión de la información a través de la red de la energía eléctrica o de la red telefónica.

Los contadores de impulsos de energía activa y reactiva envían sus señales a un aparato llamado *tarificador*, que las convierte en unidades de energía y de potencia, y puede programarse según los períodos horarios y potencias contratadas.

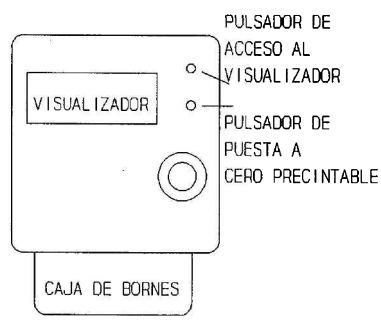


Fig. 7.5

7.4. CONTADORES ELECTRÓNICOS

Son sistemas estáticos con medida digital, formados por circuitos electrónicos. Son de gran precisión y de poco consumo. Estos contadores incorporan en un solo aparato las funciones de: contador de activa, contador de reactiva, maxímetro e interruptor horario. Los datos se visualizan en una pantalla de cristal líquido (fig. 7.5). Se programan según la tarifa eléctrica y pueden proporcionar datos sobre factor de potencia, energía aparente, fecha de la última lectura, etc.

Los equipos de medida a instalar para nuevos suministros de energía eléctrica

© Ediciones Paraninfo

hasta una potencia contratada de 15 kW y aquellos que se sustituyan para los antiguos suministros deben permitir la discriminación horaria de las medidas así como la telegestión. En la Orden ITC/3860/2007, de 28 de diciembre, se establece el Plan de sustitución de contadores de medida en los suministros de energía eléctrica de hasta 15 kW de potencia contratada con el fin de impulsar la implantación de los sistemas de telegestión. La sustitución contemplada en el Plan elaborado abarcará un periodo de 11 años, comenzando el 1 de enero de 2008 y finalizando el 31 de diciembre de 2018. El número de equipos a sustituir por cada una de las compañías distribuidoras se establece como un porcentaje del total del parque de contadores de medida de cada una de dichas empresas para este tipo de suministros, y deberá ajustarse a los valores que se señalan para cada uno de los intervalos de tiempo en que se divide el Plan. Antes del 1 de enero de 2014, deberá realizarse la implantación de los sistemas de telegestión y telemedida, así como la integración de los equipos de medida en dichos sistemas, dado que en esta fecha se habrán sustituido alrededor de un 60% de los equipos instalados. El cliente podrá optar por instalar los equipos en alquiler o adquirirlos en propiedad.

7.5. REGLETAS DE VERIFICACIÓN

La regleta de verificación es un elemento de comprobación que se sitúa entre los transformadores de medida y los contadores. Esta regleta permite:

- Comprobar el funcionamiento de los contadores.
- Conexionar los contadores a los transformadores de medida y desconectar los contadores sin interrumpir el suministro de energía.

7.6. COEFICIENTE DE FACTURACIÓN

Es el valor por el que se multiplica la lectura del contador para obtener la energía consumida.

El coeficiente de facturación $C_F = \frac{m_I}{m_C} C_M$

m_I: Relación de transformación del transformador de intensidad.
m_C: Relación de transformación del contador.
C_M: Constante mecánica del contador (suele ser potencia de 10).

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

7.6-1 Un contador de relación 75/5 A y constante mecánica 10, se conecta mediante transformadores de intensidad 150/5 A. Calcular el coeficiente de facturación.

El coeficiente de facturación $C_F = \frac{m_I}{m_C} C_M = \frac{150/5}{75/5} 10 = 20$

7.6-2 Un contador de energía activa tiene de relación 200/5 A y de constante mecánica 1. El contador de energía reactiva tiene de relación 100/5 A y constante mecánica 10.

© Ediciones Paraninfo

El cuadro de medida se conecta mediante transformadores de intensidad de relación 200/5 A. Calcular:
a) Coeficiente de facturación del contador de activa.
b) Coeficiente de facturación del contador de reactiva.
Solución: a) 1; b) 20.

7.6-3 Un cuadro de medida en B.T. consta de un contador de energía activa de relación 300/5 A y constante mecánica 100, con maxímetro de constante mecánica 10; un contador de energía reactiva de relación 200/5 A y constante mecánica 10. Los aparatos se conectan mediante transformadores de intensidad de relación 300/5 A. Calcular:
a) Coeficiente de facturación del contador de activa.
b) Coeficiente de facturación del maxímetro.
c) Coeficiente de facturación del contador de reactiva.
Solución: a) 100; b)10; c) 15.

7.6-4 Los aparatos de medida de un cuadro de B.T. están construidos para conectarse a cualquier transformador de intensidad (relación 5/5). El contador de energía activa de 2,5 (7,5) A tiene una constante mecánica de 1. El maxímetro tiene de contante mecánica 0,1 y el contador de energía reactiva, de 3 (6) A, tiene de constante mecánica 1. El cuadro de medida se conecta mediante transformadores de intensidad de relación de transformación 300/5 A. Calcular:
a) Coeficiente de facturación del contador de activa.
b) Coeficiente de facturación del maxímetro.
c) Coeficiente de facturación del contador de reactiva.
Solución: a) 60; b) 6; c) 60.

7.7. MEDIDA DEL FACTOR DE POTENCIA CON VOLTÍMETRO, AMPERÍMETRO Y VATÍMETRO

El factor de potencia instantáneo de una instalación es el cociente entre la potencia activa (P) y la aparente (S).

$$\cos \varphi = \frac{P}{S}$$

Con el vatímetro se mide la potencia activa y con el voltímetro y el amperímetro se halla la potencia aparente. Este método puede usarse en un circuito monofásico o en un circuito trifásico equilibrado.

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

7.7-1 A la línea de alimentación de una instalación monofásica se conecta un vatímetro, un voltímetro y un amperímetro, que indican 950 W, 223 V y 5 A respectivamente. Calcular el factor de potencia.

La potencia aparente $S = VI = 223 \cdot 5 = 1\,115$ VA

El factor de potencia $\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{950}{1\,115} = 0{,}852$

© Ediciones Paraninfo

7.7-2 Se desea medir la potencia consumida por una instalación trifásica equilibrada a cuatro hilos, mediante un vatímetro, voltímetro y amperímetro, para medir la potencia, la tensión y la intensidad de fase. Si las medidas indicadas por los aparatos son: 1,7 kW, 220 V y 9 A. Calcular:

a) Potencia activa absorbida por la instalación.
b) Potencia aparente.
c) Potencia reactiva.
d) Factor de potencia.

Solución: a) 5,1 kW; b) 5,94 kVA; c) 3,045 kVAr; d) 0,859.

7.8. MEDIDA DEL FACTOR DE POTENCIA CON FASÍMETRO

El fasímetro es un aparato electrodinámico. Consta esencialmente de una bobina fija y dos bobinas móviles (fig. 7.6), solidarias entre sí y con el índice.

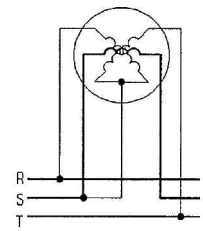


Fig. 7.6

Su funcionamiento está basado en que la bobina fija, conectada en serie con la carga, produce un campo magnético alternativo; mientras que las dos bobinas móviles crean un campo magnético giratorio al conectarlas a la tensión de la red (en un sistema monofásico estas dos bobinas se conectan en paralelo pero sus corrientes están desfasadas 90° mediante resistencias y bobinas de elevado coeficiente de autoinducción; mientras que en un sistema trifásico las dos bobinas se conectan a distintas fases).

La acción entre los dos campos magnéticos hace desplazarse el órgano móvil con el índice que indica sobre una escala el factor de potencia.

La conexión a la red de las bobinas móviles se realiza por cintas, de manera que el órgano móvil no tiene momento antagonista y el índice puede estar en cualquier posición en ausencia de corriente.

7.9. MEDIDA DEL FACTOR DE POTENCIA CON ANALIZADOR DE REDES

Se fabrican aparatos electrónicos, que se conectan a la tensión de una red de B.T. y disponen de pinzas amperimétricas (transformadores de intensidad con núcleo magnético partido, para permitir la colocación dentro del mismo del conductor cuya intensidad se quieren medir). Estos aparatos permiten comprobar el consumo de una instalación: tensión, intensidad, potencia activa, potencia reactiva y factor de potencia. Los datos se observan en una pantalla de cristal líquido, pudiendo además registrarse en papel o trasladarse a un ordenador.

7.10. MEDIDA DEL FACTOR DE POTENCIA CON CONTADORES DE ENERGÍA ACTIVA Y REACTIVA

El factor de potencia medio de una instalación es el cociente entre la energía activa W_a y la aparente W consumidas en un mismo intervalo de tiempo.

© Ediciones Paraninfo

$$\cos \varphi = \frac{W_a}{W}$$

La energía activa la mide el contador de energía activa y la energía aparente puede calcularse en función de la activa y de la reactiva W_r, medida con el contador de energía reactiva. Según el triángulo de energías (fig. 7.7):

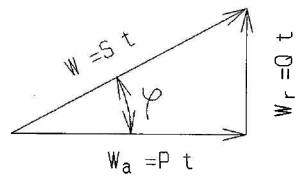


Fig. 7.7

$$W = \sqrt{W_a^2 + W_r^2}$$

Con las indicaciones del contador de energía activa y reactiva se calcula el factor de potencia medio de la instalación:

$$\cos \varphi = \frac{W_a}{\sqrt{W_a^2 + W_r^2}}$$

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

7.10-1 Las indicaciones de los contadores de un local en el momento de efectuar la medición son 78 523 kWh el de activa y el de reactiva 95 050 kVArh. Dentro de un mes, los contadores indican: 80 113 kWh y 97 631 kVArh. Calcular el factor de potencia medio de la instalación.

$$\cos \varphi = \frac{W_a}{\sqrt{W_a^2 + W_r^2}} = \frac{80\,113 - 78\,523}{\sqrt{(80\,113 - 78\,523)^2 + (97\,631 - 95\,050)^2}} = 0{,}525$$

7.10-2 Un local comercial consume en dos meses una energía activa de 2 300 kWh y una energía reactiva 1 230 kVArh. Calcular el factor de potencia medio en ese tiempo.

Solución: 0,882.

7.11. TARIFAS ELÉCTRICAS

Las opciones para la contratación del suministro de electricidad son las siguientes:

a) *Suministro de energía eléctrica a tarifa regulada*: En la actualidad y hasta la fecha de eliminación de las tarifas y de inicio del suministro de último recurso (SUR), los consumidores que no acuden a comprar su energía en el mercado libre, adquieren su energía a través de los distribuidores a unas tarifas integrales publicadas en el Boletín Oficial del Estado y cuyos precios se actualizan mediante Orden Ministerial. A partir de la desaparición de las tarifas, se inicia el SUR realizado por los comercializadores que el Gobierno, previa consulta a las Comunidades Autónomas, determine. Se determinará también un calendario para acogerse al SUR y el límite de potencia para dicho acceso.

b) *Suministro de energía eléctrica en el mercado liberalizado*: para aquellos consumidores que acudan a adquirir la energía para su suministro en el mercado

© Ediciones Paraninfo

libre. Estos consumidores debe abonar las tarifas de acceso a las redes y adquirir su energía en el mercado libre al precio que corresponda.

El acceso a las redes puede contratarse bien directamente con la empresa distribuidora, o bien a través de la empresa comercializadora, que debe pagar a la suministradora un peaje regulado, según la tarifa de acceso.

Para la adquisición de la energía en el mercado existen varias posibilidades:

1. A través de una comercializadora.
2. Como Consumidores Directos en Mercado, acudiendo directamente en el mercado diario.
3. Mediante un contrato bilateral o acudiendo a las emisiones primarias de energía. Si el consumidor desea comprar en el mercado o suscribir contrato bilateral físico, deberá previamente inscribirse en el Registro Administrativo de Distribuidores, Comercializadores y Consumidores Directos en Mercado como consumidor directo en mercado.

La formación del precio de la electricidad para el consumidor depende del tipo de mercado:

a) Precio en el mercado regulado

Las tarifas aplicables al suministro de energía eléctrica son de estructura binómica, con un término de potencia T_p (función de la potencia que el usuario contrata con la compañía suministradora y de la demanda de potencia que ha existido) y otro término de energía T_e (proporcional al consumo de energía). La suma de estos dos términos se llama facturación básica (BOE 14-01-95).

A la facturación básica se le añaden complementos de recargo o descuento en función de la energía reactiva consumida según la discriminación horaria. Además se le añaden a la facturación los impuestos, y los alquileres de los equipos de medida si son propiedad de la empresa suministradora.

El término de potencia se calcula multiplicando la potencia de facturación P_f por el precio unitario a:

$$T_p = P_f \cdot a$$

El término de energía se calcula multiplicando la energía activa consumida W_a por el precio unitario b:

$$T_e = W_a \cdot b$$

El precio unitario de referencia, para el término de potencia y para el término de la energía consumida, se publica en el Boletín Oficial del Estado.

b) Precio en el mercado libre

La tarifa de acceso a redes tiene componentes regulados, cuyo precio se publica en el Boletín Oficial del Estado:

-Término de potencia T_p (función de la potencia que el usuario contrata y de la demanda de potencia que ha existido) y por el que se paga debido a la disposición de una potencia en el punto de consumo.

© Ediciones Paraninfo

-Término de energía T_e (proporcional al consumo de energía) y por el que se paga una pequeña cantidad debido a la energía que circula por la red de suministro.

A esta tarifa de acceso se le suma la tarifa de energía (proporcional al consumo de energía), que será el precio de la energía en el mercado libre más el margen del comercializador (precio libre).

La forma de facturación en el mercado libre depende de los acuerdos de contrato a que han llegado las partes.

7.12. TARIFAS ELÉCTRICAS REGULADAS EN BAJA TENSIÓN

En la tabla siguiente se indican las tarifas eléctricas actuales de B.T. A cada una de ellas le corresponde un precio diferente de sus términos de potencia y energía, además de tener distintos complementos; por lo que es necesario en cada caso analizar que tarifa es más conveniente contratar y con qué potencia.

Tabla 7.1

Denominación	Potencia Contratada	Complementos aplicables	Aplicación
Tarifa social	No superior a 3 kW	No incluye término de potencia y su término de energía coincide con el de la tarifa 2.0.1	Para residencia habitual del titular. Debe tener instalado el correspondiente interruptor ICP.
1.0	No superior a 1 kW	Por energía reactiva si $\cos\varphi < 0{,}8$ Por discriminación horaria de dos períodos	General a todos los usos.
2.0.1	1 kW < P ≤2,5 kW	Por energía reactiva si $\cos\varphi < 0{,}8$ Por discriminación horaria de dos períodos	General a todos los usos.
2.0.2	2,5 kW < P≤ 5 kW	Por energía reactiva si $\cos\varphi < 0{,}8$ Por discriminación horaria de dos períodos	General a todos los usos.
2.0.3	5 kW < P ≤ 10 kW	Por energía reactiva si $\cos\varphi < 0{,}8$ Por discriminación horaria de dos períodos	General a todos los usos.
3.0.1	10 kW < P≤15 kW	Por energía reactiva si $\cos\varphi < 0{,}8$ Por discriminación horaria de dos períodos	General a todos los usos.
3.0.2	P > 15 kW	Por energía reactiva Por discriminación horaria	General a todos los usos. Tarifa de utilización en potencias elevadas.

Para estas tarifas, cuando no se les aplique el complemento por discriminación horaria, se establece un consumo mínimo 12,5 kWh al mes que está exento de facturación. Existe un límite de consumo por encima del cual se penalizan los excesos. La facturación para potencia menor o igual a 10 kW es mensual.

Para acceder a la aplicación de la tarifa social el titular del contrato deberá solicitarlo a la empresa suministradora de acuerdo con el modelo que será facilitado por la propia empresa, acompañada del certificado de empadronamiento del titular

© Ediciones Paraninfo

en el domicilio del suministro y de la declaración responsable del titular de la veracidad de la documentación presentada.

7.13. POTENCIA DE FACTURACIÓN

Como principio general los clientes pueden elegir la potencia a contratar P_c. La potencia a facturar P_f, que va a marcar el término de potencia, se calcula de varios modos, según los contadores maxímetros.:

- *Sin contador maxímetro*. Se instala un interruptor de control de potencia o limitador (ICP), según la potencia contratada. Entonces $P_f=P_c$.
  La compañía suministradora de energía no está obligada al suministro monofásico con potencia superior a un interruptor de 63 A (14490 W, para suministros monofásicos de tensión de 230 V).
  Para suministros monofásicos y trifásicos los interruptores de control de potencia son de corte omnipolar.
- *Con un maxímetro*. Si se contrata una sola potencia y el abonado tiene el equipo de medida adecuado. El maxímetro indica en el período de facturación la potencia máxima $P_{máx}$. La potencia a facturar depende de la relación entre esta potencia máxima y la potencia contratada, según la siguiente tabla.

Tabla 7.2

POTENCIA MÁXIMA	POTENCIA DE FACTURACIÓN
$P_{máx} < 0{,}85 \cdot P_c$	$P_f=0{,}85 \cdot P_c$
$0{,}85 \cdot P_c \leq P_{máx} \leq 1{,}05 \cdot P_c$	$P_f=P_{máx}$
$P_{máx} > 1{,}05 \cdot P_c$	$P_f=P_{máx} + 2(P_{máx} - 1{,}05 \cdot P_c)$

  No se tiene en cuenta la potencia máxima registrada durante las 24 horas siguientes a un corte de energía, siempre que pueda justificarse.
- *Con dos maxímetros*. Siempre que se hayan contratado dos potencia distintas (potencia en horas puntas y llano P_{c12}, y potencia en valle P_{c3}), con una discriminación horaria y si el abonado tiene el equipo de medida adecuado.
  Se calcula la potencia de facturación para cada potencia contratada P_{f12} y P_{f3}, según la indicación de potencia máxima de los dos maxímetros.
  La potencia a facturar en tarifa con un solo término de potencia:
  $P_f=P_{f12} + 0{,}2(P_{f3} - P_{f12})$
  Si $(P_{f3} - P_{f12}) < 0$, esta resta se considera nula.
- *Con tres maxímetros*. Aplicable a suministro que haya contratado tres potencias distintas (potencia en horas punta P_{c1}, potencia en horas llano P_{c2} y potencia en horas valle P_{c3}), con discriminación horaria y el abonado tenga el equipo de medida adecuado.

© Ediciones Paraninfo

Se calcula la potencia de facturación para cada potencia contratada en horas punta P_{f1}, en llano P_{f2} y en valle P_{f3}, según la indicación de potencia máxima de los tres maxímetros.

La potencia a facturar en tarifa con un solo término de potencia:

$P_f = P_{f1} + 0{,}5(P_{f2} - P_{f1}) + 0{,}2(P_{f3} - P_{f2})$

Si alguna resta $(P_{fn} - P_{fn-1}) < 0$, esta resta se considera nula y la potencia del sumando siguiente será $(P_{fn+1} - P_{fn-1})$.

La facturación por potencia de acceso a redes, que tiene que pagar la compañía comercializadora a la suministradora, se realiza por períodos anuales, con facturaciones mensuales a cuenta. Hay dos tipos de cálculo de facturación con contador maxímetro, aplicados en cada caso a un horario y calendario específico.

- Tipo de cálculo basado en tres potencias contratadas y utilizando 3 maxímetros. Las potencias contratadas para los distintos períodos deben ser siempre crecientes o iguales respecto a las de los períodos previos.
- Tipo de cálculo, utilizado solamente en alta tensión, basado en seis potencias contratadas y utilizando 6 maxímetros. Para calcular la potencia a facturar se utilizan también fórmulas (BOE 8-11-2001), según la potencia contratada y la indicación de los maxímetros.

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

7.13-1 La potencia contratada por una empresa es 50 kW. Calcular la potencia de facturación con indicación de un maxímetro (modo 2), en los casos siguientes:

a) El maxímetro indica 60 kW.
b) El maxímetro indica 45 kW.
c) El maxímetro indica 42 kW.

a) La potencia máxima $P_{máx} = 60\text{ kW} > 1{,}05 \cdot P_c = 1{,}05 \cdot 50 = 52{,}5\text{ kW}$
La potencia de facturación $P_f = P_{máx} + 2(P_{máx} - 1{,}05 \cdot P_c) = 60 + 2(60 - 52{,}5) = 75\text{ kW}$

b) $0{,}85 \cdot P_c = 0{,}85 \cdot 50 = 42{,}5\text{ kW}$
$P_{máx} = 45\text{ kW}$; $42{,}5 < 45 < 52{,}5$. La potencia de facturación $P_f = 45\text{ kW}$

c) $P_{máx} = 42\text{ kW} < 0{,}85 \cdot P_c = 42{,}5\text{ kW}$. La potencia de facturación 42,5 kW

7.13-2 El cuadro de medida de una empresa utiliza tres maxímetros. La potencia contratada en horas punta es de 50 kW. La potencia contratada en horas llano es de 150 kW y la potencia contratada en horas valle es de 250 kW. Calcular:

a) Potencia de facturación en horas punta si la indicación del maxímetro punta es de 51 kW.
b) Potencia de facturación en horas llano si la indicación del maxímetro de llano es de 120 kW.
c) Potencia de facturación en horas valle si la indicación del maxímetro de valle es de 245 kW.
d) Potencia de facturación total con trifas de solo un término de potencia.

Solución: a) 51 kW; b) 127,5 kW; c) 245 kW; d) 112,75 kW

© Ediciones Paraninfo

7.14. DISCRIMINACIÓN HORARIA EN TARIFAS ELÉCTRICAS REGULADAS

El complemento por discriminación horaria establecido en la actual estructura tarifaria, tiene en cuenta el distinto coste de la energía eléctrica en cada período horario. Su objetivo fundamental es lograr el aplanamiento de la curva de carga diaria del sistema eléctrico nacional.

Este complemento tiene dos modalidades distintas de aplicación:

1) *Discriminación horaria de dos períodos*: En el caso de las tarifas domésticas 2.01, 2.0.2, 2.0.3 y 3.0.1, se puede optar por la opción de doble discriminación horaria, que supone diferenciar el consumo en dos períodos: las horas punta (10 al día) y horas valle (14 al día), con un precio menor en las horas valle.

2) *Discriminación horaria de tres períodos*: De aplicación únicamente a la tarifa 3.0.2. (triple tarifa diaria). Variable para cada zona de aplicación la entrada y salida de las horas de punta, valle y llano. Dentro de una zona también varían según sea horario de invierno o de verano. Los períodos horarios diarios son: 4 horas (punta), 8 horas (valle) y las 12 horas restantes (llano), con un precio de energía distinto para cada período, siendo el mayor precio la energía consumida en horas punta y el menor para la energía consumida en horas valle (Orden ITC/3801/2008, de 26 de diciembre).

Las zonas en que se divide el mercado eléctrico, son las establecidas en ITC/2794/2007, de 27 de septiembre.

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

7.14-1 Una vivienda con discriminación horaria de dos períodos, tarifa 3.0.1, consume en un mes 162 kWh en horas punta y en horas valle 74 kWh. Calcular el término de energía, si el precio unitario de ésta es de 0,136250 euros/kWh para la energía consumida en horas punta y de 0,060103 euros/kWh para la energía consumida en horas valle.

El precio de la energía: $162 \cdot 0{,}136250 + 74 \cdot 0{,}060102 = 26{,}52$ euros.

7.14-2 Calcular el término de energía, tarifa 3.0.2, con discriminación horaria de tres períodos, para un consumo de energía activa en horas punta de 2 800 kWh, en horas llano 8 400 kWh y en horas valle 10 700 kWh. El precio unitario de la energía es de 0,143055 euros/kWh en punta, 0,115580 euros/kWh en llano y 0,078481 euros/kWh en horas valle.

Precio de la energía: $2800 \cdot 0143055 + 8400 \cdot 0{,}11558 + 10700 \cdot 0{,}78481 = 2211{,}17$ euros.

7.14-3 Calcular el término de energía, tarifa 3.0.2, con discriminación horaria de tres períodos, para un consumo de energía activa en el primer período de 1 050 kWh, en el segundo 3 400 kWh y en el tercero 4 900 kWh. El precio unitario de la energía es de 0,143055 euros/kWh en el primer período, 0,115580 euros/kWh en el segundo y 0,078481 euros/kWh en el tercero.

Solución: 927,74 €.

© Ediciones Paraninfo

7.15. COMPLEMENTO POR ENERGÍA REACTIVA EN TARIFAS REGULADAS.

Recargo o descuento aplicable a la facturación básica (suma de los términos de potencia y energía). Aplicable a la tarifa 3.0.2.

Determinado el factor de potencia medio con los contadores de energía activa y reactiva (con dos cifras decimales), el valor porcentual de recargo o bonificación se halla según las fórmulas (BOE 28-12-2005):

Para $0{,}95 < \cos\varphi \leq 1$; $K_r(\%) = \dfrac{37{,}026}{\cos^2\varphi} - 41{,}026$

Para $0{,}90 \leq \cos\varphi \leq 0{,}95$; $K_r(\%) = 0$

Para $\cos\varphi < 0{,}90$; $K_r(\%) = \dfrac{29{,}16}{\cos^2\varphi} - 36$

Se considera un sólo decimal y no se aplicarán recargos superiores al 50,7% ni descuentos superiores al 4%

Para las restantes tarifas 1.0, 2.0.1, 2.0.2, 2.0.3 y 3.0.1. Los suministros acogidos a estas tarifas deberán tener como mínimo un factor de potencia medio de 0,8 (en caso contrario la compañía suministradora de energía puede instalar por su cuenta un contador de energía reactiva adecuado y aplicar el complemento de energía reactiva). Cuando la instalación tenga factor de potencia inferior a 0,55, puede obligarse al abonado a mejorarlo.

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

7.15-1 Un local consume mensualmente 3 750 kWh de energía activa y 2 675 kVArh de energía reactiva. Calcular:

a) Factor de potencia medio.

b) Complemento por energía reactiva.

a) El factor de potencia medio $\cos\varphi = \dfrac{W_a}{\sqrt{W_a^2 + W_r^2}} = \dfrac{3\,750}{\sqrt{3\,750^2 + 2\,675^2}} = 0{,}814$

b) El valor porcentual de recargo por complemento por energía reactiva:

$$K_r\% = \frac{29{,}16}{\cos^2\varphi} - 36 = \frac{29{,}16}{0{,}81^2} - 36 = 8{,}4\%$$

7.15-2 Un comercio consume mensualmente 5450 kWh. El consumo de energía reactiva en ese tiempo es de 2 676 kVArh. Calcular:

a) Factor de potencia medio.

b) Complemento por energía reactiva.

Solución: a) 0,9; b) 0%

7.15-3 Un taller con contador de triple tarifa, consume en un mes en horas punta 3 400 kWh, en horas llano 4 300 kWh y en horas valle 7 400 kWh. El consumo de energía reactiva en ese tiempo es de 3 840 kVArh. Calcular:

© Ediciones Paraninfo

a) Consumo total de energía activa.
b) Factor de potencia medio.
c) Complemento por energía reactiva.

a) La energía activa total $W_a = 3\,400 + 4\,300 + 7\,400 = 15\,100$ kWh

b) El factor de potencia medio $\cos\varphi = \dfrac{W_a}{\sqrt{W_a^2 + W_r^2}} = \dfrac{15\,100}{\sqrt{15\,100^2 + 3\,840^2}} = 0{,}97$

b) El valor porcentual de recargo por complemento por energía reactiva:

$$K_r\% = \frac{37{,}026}{\cos^2\varphi} - 41{,}026 = \frac{37{,}026}{0{,}97^2} - 41{,}026 = -1{,}7\% \quad \text{(descuento)}$$

7.15-4 Un local de hostelería con contador de triple tarifa, consume mensualmente en horas punta 4 400 kWh, en horas llano 8 430 kWh y en horas valle es de 9 740 kWh. El consumo de energía reactiva es de 8 340 kVArh. Calcular:
a) Consumo total de energía activa.
b) Factor de potencia medio.
c) Complemento porcentual por energía reactiva.
Solución: a) 22570 kWh; b) 0,94; c) 0%

7.16. TARIFAS DE ACCESO EN BAJA TENSIÓN

Los peajes de acceso a las redes son únicos en todo el territorio nacional y no incluirán ningún tipo de impuestos. Además, tienen en cuenta las especialidades por niveles de tensión y las características de los consumos por horario y potencia.

Se establecen tarifas de acceso a las redes de transporte y distribución de energía eléctrica y se regulan las condiciones básicas de los contratos de adquisición de energía y de acceso a las redes en baja tensión (Real Decreto 1435/2002, de 27 de diciembre).

Tarifas de acceso existentes en baja tensión:
Tarifa 2.0 A: tarifa simple (1 ó 2 períodos horarios y potencia contratada menor o igual a 15 kW)
Tarifa 3.0 A: tarifa general (3 períodos horarios)

En la figura 7.8 se representa el esquema de medida indirecta en B.T. con doble tarifa y maxímetro. La regleta de verificación, situada entre los transformadores de intensidad y los contadores, permite la comprobación del funcionamiento de estos. El reloj conmutador horario permite cambiar la tarifa y marcar los períodos de funcionamiento del maxímetro. Estos contadores con relojes mecánicos están siendo sustituidos por contadores electrónicos programables.

7.17. ESTRUCTURA DE LAS TARIFAS DE ACCESO

La estructura actual de tarifas de acceso tiene una fórmula binomia compuesta por un término de potencia, un término de energía activa y, en su caso, término de energía reactiva. Estos términos se obtienen de la siguiente forma:

© Ediciones Paraninfo

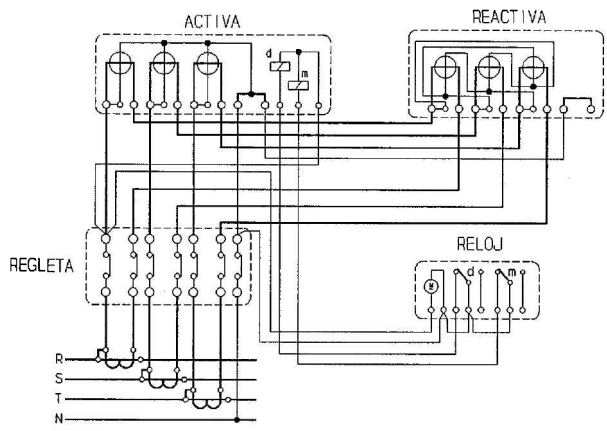


Fig. 7.8

1) *Término de Potencia*: Para cada uno de los períodos tarifarios aplicables a las tarifas, se contratará una potencia, aplicable durante todo el año. El término de facturación de potencia será el sumatorio resultante de multiplicar la potencia a facturar en cada período tarifario por el término de potencia correspondiente. La determinación de la potencia a facturar se realizará en función de las potencias contratadas en cada período tarifario y, en su caso, dependiendo de cada tarifa, las potencias realmente demandadas en el mismo durante el período de facturación considerado.

2) *Término de energía activa*: El término de facturación de energía activa será el sumatorio resultante de multiplicar la energía consumida y medida por contador en cada período tarifario por el precio término de energía correspondiente. El término de facturación de energía activa se facturará mensualmente, incluyendo la energía consumida en el mes correspondiente a cada período tarifario. En la tarifa simple de baja tensión la facturación será preferentemente mensual.

3) *Término de energía reactiva*:El término de facturación por energía reactiva será de aplicación a la tarifa 3.0.A, para lo cual se deberá disponer del contador de energía reactiva permanentemente instalado. Este término se aplicará sobre todos los períodos tarifarios, excepto en el período 3, siempre que el consumo de energía reactiva exceda el 33 por 100 del consumo de activa durante el período de facturación considerado (con factor de potencia menor de 0,95) y únicamente afectará a dichos excesos.

Los suministros acogidos a la tarifa simple (2.0A de un solo período) deberán disponer de los equipos de corrección del consumo de energía reactiva adecuados para conseguir como máximo un valor medio del mismo del 50 por 100 del consumo de energía activa; en caso contrario, la empresa distribuidora podrá exigir al consumidor la instalación, a su costa, del contador correspondiente o bien instalarlo con cargo a dicho consumidor cobrando el alquiler legalmente establecido y efectuar en el futuro la facturación a este consumidor del término por energía reactiva correspondiente en los períodos de lectura en los que el consumo de reactiva exceda los límites fijados a la distribución en la regulación correspondiente. En el caso de suministros acogidos a tarifa simple nocturna, esto se aplicará sólo al período tarifario correspondiente a las horas diurnas.

© Ediciones Paraninfo

Con carácter general, el contrato de tarifa de acceso será anual, existiendo excepción a esta norma en los casos de contratos de temporada (menos de 12 meses de forma repetitiva) y contratos eventuales (menos de 12 meses para un fin concreto; transitorio y esporádico), que tienen un recargo en el término de potencia.

7.18. OTROS CONCEPTOS DE LA FACTURACIÓN

- *Alquiler del equipo de medida.* Cuando los aparatos de medida son propiedad de la empresa suministradora de energía.
- *Impuesto sobre electricidad.* Es el 4,864% sobre los términos de potencia, energía y complementos, multiplicados por un coeficiente regulador de 1,05113.[1]
- *Impuesto sobre el valor añadido* (IVA). Se utiliza el tipo general 16% sobre el valor total.

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

7.18-1 Una vivienda con tarifa 2.0.3 y potencia contratada 5,5 kW consume en un mes 337 kWh. Calcular:

a) Término de potencia, si el precio unitario de ésta es de 1,642355 euros/kW· mes.
b) Término de energía, si el precio unitario de ésta es de 0,112480 euros/kWh.
c) Facturación total, si el alquiler del contador es de 0,54 euros/mes.

a) $T_p = 5{,}5 \cdot 1{,}642355 \cdot 1 = 9{,}03$ euros.
b) $T_e = 337 \cdot 0{,}112480 - 12{,}5 \cdot 0{,}112480 = 37{,}91 - 1{,}41 = 36{,}50$ euros.
c) La suma de los dos términos de la facturación $T_p + T_e = 45{,}53$ euros.

El impuesto sobre la electricidad $IE = \frac{4{,}864}{100} \cdot 1{,}051130 \cdot 45{,}53 = 2{,}33$ euros

El alquiler del contador $0{,}54 \cdot 1 = 0{,}54$ euros.

El impuesto sobre el valor añadido $IVA = \frac{16}{100} \cdot (45{,}53 + 2{,}33 + 0{,}54) = 7{,}74$ euros

Facturación total $= T_p + T_e + IE + Alquiler + IVA$: $45{,}53 + 2{,}33 + 0{,}54 + 7{,}74 = 56{,}14$ euros.

7.18-2 Una vivienda con potencia contratada 4,4 kW, tarifa 2.0.3, consume en un mes 215 kWh. Calcular:

a) Término de potencia, si el precio unitario de ésta es de 1,642355 euros/kW· mes.
b) Término de energía, si el precio unitario de ésta es de 0,112480 euros/kWh.
c) Facturación total, si el alquiler del contador es de 0,54 euros/mes.

Solución: a) 7,23 €; b) 22,77 €; c) 37,2 €.

7.18-3 Una vivienda con tarifa 2.0.3, potencia contratada 5,5 kW, tiene discriminación horaria de dos períodos y consume en un mes 127 kWh en horas punta y 145 kWh en horas valle. Calcular:

[1] Ley de acompañamiento de los presupuestos (BOE 31-12-97)

© Ediciones Paraninfo

a) Término de potencia, si el precio unitario de ésta es de 1,642355 euros/kW· mes.
b) Término de energía, si el precio unitario de ésta es de 0,135145 euros/kWh en horas punta y 0,059614 euros/kWh en horas valle.
c) Facturación total, si el alquiler del contador es de 1,11 euros/mes.
   a) $T_p = 5{,}5 \cdot 1{,}642355 \cdot 1 = 9{,}03$ euros.
   b) $T_e = 127 \cdot 0{,}135145 + 145 \cdot 0{,}059614 = 17{,}16 + 8{,}64 = 25{,}80$ euros.
   c) La suma de los dos términos de la facturación $T_p + T_e = 34{,}83$ euros.

El impuesto sobre la electricidad $\text{IE} = \frac{4{,}864}{100} \cdot 1{,}051130 \cdot 34{,}83 = 1{,}78$ euros

El alquiler del contador $1{,}11 \cdot 1 = 1{,}11$ euros.

El impuesto sobre el valor añadido $\text{IVA} = \frac{16}{100} \cdot (34{,}83 + 1{,}78 + 1{,}11) = 6{,}04$ euros

Facturación total $= T_p + T_e + \text{IE} + \text{Alquiler} + \text{IVA}$: $34{,}83 + 1{,}78 + 1{,}11 + 6{,}04 = 43{,}76$ euros.

7.18-4 Una vivienda con tarifa 2.0.2 y discriminación horaria de dos períodos, tiene de potencia contratada 4,4 kW y consume en un mes durante horas punta 173 kWh. Durante horas valle el consumo es de 185 kWh. Calcular:
a) Término de potencia, si el precio unitario de ésta es de 1,642355 euros/kW· mes.
b) Término de energía de consumo punta, si el precio unitario es 0,135145 euros/kWh.
c) Término de energía de consumo valle, si el precio unitario es 0,059614 euros/kWh.
d) Facturación total, sin considerar el alquiler de los aparatos de medida.
Solución: a) 7,23 €; b) 23,38 €; c) 11,03 €; d) 50,77 €.

7.18-5 Un local con tarifa 3.0.2, con discriminación horaria de tres períodos y potencia contratada a 400 V, 17,320 kW, tiene un consumo mensual de energía activa de 273 kWh en el primer período, 583 kWh en el segundo y 620 kWh en el tercero. El consumo de energía reactiva de 865 kVArh. Calcular:
a) Término de potencia, si el precio unitario de ésta es 1,77 euros/kW· mes.
b) Término de energía, si el precio unitario de ésta es 0,143055 euros/kWh en el primer período, 0,115580 euros/kWh en el segundo y 0,078481 euros/kWh en el tercero.
c) Complemento por energía reactiva.
d) Facturación total, sin considerar el alquiler de los aparatos de medida.
a) $T_p = 17{,}320 \cdot 1{,}77 \cdot 1 = 30{,}66$ euros.
b) $T_e = 273 \cdot 0{,}143055 + 593 \cdot 0{,}115580 + 620 \cdot 0{,}078481 = 39{,}05 + 67{,}38 + 48{,}66$
$T_e = 155{,}09$ euros.
c) La suma de los dos términos de la facturación $T_p + T_e = 185{,}75$ euros.
La energía activa total: $W_a = 273 + 583 + 620 = 1476$ kWh.

El factor de potencia medio $\cos\varphi = \frac{W_a}{\sqrt{W_a^2 + W_r^2}} = \frac{1\,476}{\sqrt{1\,476^2 + 865^2}} = 0{,}86$

El valor porcentual de recargo por complemento por energía reactiva:

$$K_r\% = \frac{29{,}16}{\cos^2\varphi} - 36 = \frac{29{,}16}{0{,}86^2} - 36 = 3{,}4\%$$

El recargo por energía reactiva $3{,}\frac{4}{100} \cdot 185{,}75 = 6{,}32$ euros

© Ediciones Paraninfo

El impuesto sobre la electricidad $IE = \frac{4,864}{100} \cdot 1,051130 \cdot (185,75+6,32) = 9,82$ euros

El impuesto sobre el valor añadido $IVA = \frac{16}{100} \cdot (185,75 + 6,32 + 9,82) = 32,3$ euros

Facturación total = 185,75+6,32+9,82+32,3 = 234,19 euros.

7.18-6 Una industria con tarifa 3.0.2, discriminación horaria con triple tarifa y potencia contratada 34,64 kW, tiene un consumo mensual de energía activa en horas punta de 2 130 kWh, en horas llano de 3 620 kWh y en horas valle de 4 117 kWh. El consumo de energía reactiva es de 3 953 kVArh. Calcular:

a) Término de potencia, si el precio unitario de ésta es de 1,77 euros/kW· mes.
b) Término de energía, si el precio unitario de ésta es 0,143055 euros/kWh en horas punta, 0,115580 euros/kWh en llano y 0,078481 euros/kWh en valle.
c) Complemento por energía reactiva.
d) Facturación total, sin considerar el alquiler de los aparatos de medida.

Solución: a) 61,31 €; b) 1046,22 €; c) 0 €; d) 1350,41 €.

7.18-7 Una industria con tarifa 3.0.2, discriminación horaria con triple tarifa y potencia contratada 65 kW, con un maxímetro, tiene un consumo mensual de energía activa en horas punta de 3 152 kWh, en horas llano de 7 270 kWh y en horas valle, es 9 223 kWh. El consumo de energía reactiva es de 6 270 kVArh. Calcular:

a) Potencia de facturación si el maxímetro indica 68 kW.
b) Término de potencia, si el precio unitario de ésta es de 1,77 euros/kW·mes.
c) Término de energía, si el precio unitario de ésta es 0,143055 euros/kWh en horas punta, 0,115580 euros/kWh en llano y 0,078481 euros/kWh en valle.
d) Complemento por energía reactiva.
e) Facturación total, sin considerar el alquiler de los aparatos de medida.

Solución: a)68 kW; b) 120,36 €; c) 2015,01 €; d) 0 €; e) 2603,67 €.

7.18-8 Una vivienda con tarifa social y potencia contratada 2,2 kW, consume en un mes 148 kWh. Calcular la facturación total si el precio de la energía es 0,112480 euros/kWh sin considerar el alquiler del contador:

Término de energía $T_e = 148 \cdot 0,112480 - 12,5 \cdot 0,112480 = 16,65 - 1,41 = 15,24$ euros.

El impuesto sobre la electricidad $IE = \frac{4,864}{100} \cdot 1,051130 \cdot 15,24 = 0,78$ euros

El impuesto sobre el valor añadido $IVA = \frac{16}{100} \cdot (15,24 + 0,78) = 2,56$ euros

Facturación total = 15,24+0,78+2,56 = 18,58 euros.

7.18-9 Una vivienda con tarifa social y potencia contratada 2,2 kW consume en un mes 164 kWh. Calcular:

a) Término de energía, si el precio unitario de ésta es de 0,112480 euros/kWh.
c) Facturación total, si es nulo el alquiler del contador.

Solución: a) 17,04 €; b) 20,78 €.

© Ediciones Paraninfo

7.19. TARIFAS ELÉCTRICAS DE ACCESO EN ALTA TENSIÓN

Las tarifas de acceso existentes actual mente alta tensión son:

Tarifa 3.1 A: Tarifa específica de aplicación a tensiones de 1 a 36 kV (3 períodos horarios y potencia contratada máxima 450 kW).

Tarifas 6: Tarifas generales para alta tensión (6 períodos horarios y 5 escalones de tensión).

El término de facturación por energía reactiva será de aplicación a cualquier tarifa, para lo cual se deberá disponer del contador de energía reactiva permanentemente instalado. Este término se aplicará sobre todos los períodos tarifarios, excepto en el período 3, para la tarifa 3.1A, y en el período 6, para las tarifas 6, siempre que el consumo de energía reactiva exceda el 33 por 100 del consumo de activa durante el período de facturación considerado (factor de potencia menor de 0,95) y únicamente afectará a dichos excesos.

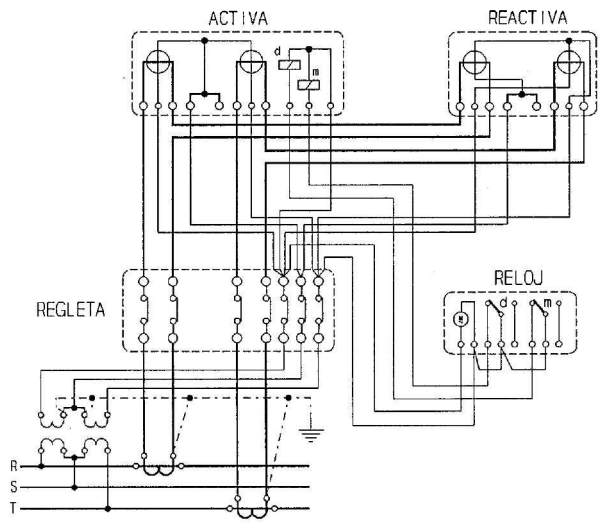


Fig. 7.9

En la figura 7.9 se representa un cuadro de medida en alta tensión, con contador de activa de doble tarifa y maxímetro, contador de reactiva, interruptor horario, regletas de verificación y transformadores de tensión e intensidad. Actualmente las empresas suministradoras prefieren el sistema de medida con tres transformadores de tensión y tres transformadores de intensidad. Estos contadores con interruptores horarios están siendo sustituidos por contadores electrónicos programables.

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

7.19-1 Una empresa recibe energía eléctrica a 20 kV, con tarifa 3.1A y tres períodos tarifarios. La potencia contratada es en cada período 250 kW. Un maxímetro indica en el primer período 251 kW, en el segundo 251 kW y en el tercero 265 kW. Calcular:

a) Potencia de facturación en cada período tarifario.

b) Término de potencia mensual, si el precio unitario es 15,090975 euros/kW·año en el primer período, 9,306199 euros/kW·año en el segundo y 2,134018 euros/kW·año en el tercero.

a) $0{,}85P_c = 0{,}85 \cdot 250 = 212{,}5$ kW

$1{,}05\ P_c = 1{,}05 \cdot 250 = 262{,}5$ kW

La potencia de facturación en el primer y segundo período: $P_{f1} = P_{f2} = P_{máx} = 251$ kW

© Ediciones Paraninfo

La potencia de facturación en el tercer período $P_{f3}=265+2(265-262,2)=270$ kW

Término de potencia $T_p=\dfrac{251\cdot15,090975+251\cdot9,306199+270\cdot2,134018}{12}=558,32$ euros

7.19-2 Una empresa recibe energía eléctrica a 20 kV, tarifa 3.1A con tres períodos tarifarios. Las energías consumidas durante un mes en el primer período son 2 415 kWh y 534 kVArh, en el segundo período 9 530 kWh y 4 835 kVArh; en el tercero 1 845 kWh y 210 kVArh. Calcular el término de facturación de energía reactiva si el precio unitario de ésta para factor de potencia mayor de 0,90 hasta 0,85 es de 0,013091 euros/kVArh.

El término de energía reactiva se puede aplicar a los dos primeros períodos.

En el primer período: $0,33\cdot2\,415=796,95>534$; sin aplicación.

En el segundo período: $0,33\cdot9\,530=3\,144,9<4\,835$; con aplicación.

Factor de potencia medio, segundo período $\cos\varphi=\dfrac{W_a}{\sqrt{W_a^2+W_r^2}}=\dfrac{9\,530}{\sqrt{9\,530^2+4\,835^2}}=0,89$

La facturación de energía reactiva $(4\,835-3\,144,9)\cdot0,013091=22,13$ euros.

7.19-3 Una industria recibe energía eléctrica a 20 kV,tarifa 3.1A con tres períodos tarifarios. La energía consumida durante un mes en el primer período es 1 415 kWh, en el segundo período 5 530 kWh y en el tercero 6 428 kWh. Calcular el término de energía a facturar para pagar a la compañia suministradora, si el precio unitario de ésta es 0,025591 euros/kWh en primer período, 0,022769 euros/kWh en el segundo período y 0,015201 euros/kWh en el tercero.

El término de energía fijo o regulado:

$1415\cdot0,025591+5530\cdot0,022769+6428\cdot0,015201=259,84$ euros.

7.19-4 Una empresa recibe energía eléctrica a 20 kV y tiene contratado la tarifa 3.1A con tres períodos tarifarios. El consumo de energía en un mes y las potencias:

PERÍODOS	W_a (kwh)	Wr (kVArh)	Potencia contratada (kW)	Potencia maxímetro (kW)
P_1	3360	1328	80	64
P_2	13373	6851	80	83,2
P_3	7512	2336	140	76

Calcular:

a) Término de potencia mensual, si el precio unitario es 15,090975 euros/kW·año en el primer período, 9,306199 euros/kW·año en el segundo y 2,134018 euros/kW·año en el tercero.

b) Término de energía total si el precio medio ponderado, incluido el término de energía de la tarifa de acceso, según contrato, es 0,10465 euros/kWh.

c) Término de facturación de energía reactiva si el precio unitario de ésta para factor de potencia menor de 0,95 hasta 0,90 es de 0,000013 euros/kVArh. Para factor de potencia menor de 0,90 hasta 0,85 es de 0,013091 euros/kVArh.

d) Facturación total si el alquiler del equipo de medida es 5,23 euros/mes.

© Ediciones Paraninfo

a) La potencia de facturación en el primer período es: $P_{f1} = 0{,}85 \cdot 80 = 68$ kW.
La potencia de facturación en el segundo período es: $P_{f2} = P_{máx} = 83{,}2$ kW.
La potencia de facturación en el tercer período $P_{f3} = 0{,}85 \cdot 140 = 119$ kW.

Término de potencia $T_p = \dfrac{68 \cdot 15{,}090975 + 83{,}2 \cdot 9{,}306199 + 119 \cdot 2{,}134018}{12} = 171{,}2$ euros

b) El término de energía: $T_e = (3\,360 + 13\,373 + 7\,512) \cdot 0{,}10465 = 2\,537{,}24$ euros.
c) La facturación por energía reactiva es aplicable al primero y segundo período.

Factor de potencia medio, primer período $\cos\varphi_1 = \dfrac{W_a}{\sqrt{W_a^2 + W_r^2}} = \dfrac{3\,360}{\sqrt{3\,360^2 + 1\,328^2}} = 0{,}93$

Factor de potencia medio, segundo período $\cos\varphi = \dfrac{W_a}{\sqrt{W_a^2 + W_r^2}} = \dfrac{13\,373}{\sqrt{13\,373^2 + 6\,851^2}} = 0{,}89$

La facturación de energía reactiva
$(1328 - 0{,}33 \cdot 3360) \cdot 0{,}000013 + (6\,851 - 0{,}33 \cdot 13373) \cdot 0{,}013091 = 0 + 31{,}91 = 31{,}91$ euros.
d) El impuesto sobre la electricidad

$$IE = \frac{4{,}864}{100} \cdot 1{,}051130 \cdot (171{,}2 + 2537{,}24 + 31{,}91) = 140{,}11 \text{ euros}$$

El alquiler del equipo de medida $5{,}23 \cdot 1 = 5{,}23$ euros.
El impuesto sobre el valor añadido

$$IVA = \frac{16}{100} \cdot (171{,}2 + 2537{,}24 + 31{,}91 + 140{,}11 + 5{,}23) = 0{,}16 \cdot 2\,885{,}69 = 461{,}71 \text{ euros}$$

Facturación total $= 2\,885{,}69 + 461{,}71 = 3\,347{,}4$ euros.

7.19-5 Una empresa recibe energía eléctrica a 20 kV y tiene contratado la tarifa 3.1A con tres períodos tarifarios. El consumo de energía en un mes y las potencias:

PERÍODOS	W_a (kwh)	Wr (kVArh)	Potencia contratada (kW)	Potencia maxímetro (kW)
P_1	1830	922	26	40
P_2	6598	3493	26	52
P_3	4725	2443	26	36

Calcular:
a) Término de potencia mensual, si el precio unitario es 15,090975 euros/kW·año en el primer período, 9,306199 euros/kW·año en el segundo y 2,134018 euros/kW·año en el tercero.
b) Término de energía total si el precio medio ponderado, incluido el término de energía de la tarifa de acceso, según contrato, es 0,10349 euros/kWh.
c) Término de facturación de energía reactiva si el precio unitario de ésta para factor de potencia mayor de 0,90 hasta 0,85 es de 0,013091 euros/kVArh.
d) Facturación total sin considerar el alquiler del equipo de medida.

Solución: a) 170,38 €; b) 1 361,2 €; c) 21,38 €; d) 1 893,54 €.

© Ediciones Paraninfo

7.20. MEDIDA EN B.T. Y FACTURACIÓN EN A.T.

Cuando el consumidor recibe energía en media tensión, como máximo a 36 kV, y dispone de un transformador de potencia no superior a 50 kVA o de potencia superior a 50 kVA en instalación intemperie sobre apoyo; si lo solicita el usuario, la medida puede realizarse en B.T. y la facturación en A.T.

Se tienen en cuenta las pérdidas en los transformadores de la forma siguiente:

•La potencia de facturación se aumenta un 4%.

•La energía consumida se aumenta un 4%. Se suman también 0,01 kWh por cada kVA de potencia nominal del transformador, durante cada hora del mes.

7.21. CORRECCIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA

Generalmente los receptores funcionan con factor de potencia inductivo e inferior a la unidad. Un receptor funcionando con bajo factor de potencia consume una gran intensidad para una potencia activa determinada.

■ Causas de un bajo factor de potencia

Los receptores que hacen funcionar una instalación con bajo factor de potencia son principalmente:

- Motores asíncronos o de inducción. La potencia reactiva que consumen estos motores es prácticamente constante bajo cualquier condición de carga, por lo que el factor de potencia del motor es bajo cuando funciona en vacío o con cargas mucho menores que la nominal.
- Transformadores. Como en los motores, la potencia reactiva que consumen los transformadores (necesaria para mantener el flujo magnético) es prácticamente constante bajo cualquier condición de carga, aunque menor que en los motores. El factor de potencia de los transformadores baja cuando funcionan en vacío o con poca carga, pero es más alto que en los motores asíncronos.
- Lámparas de descarga. Tienen un bajo factor de potencia debido a la reactancia que se conecta en serie con la lámpara.
- Instalación de soldadura eléctrica. Por la elevada reactancia del transformador de soldadura, el factor de potencia es muy bajo.
- Rectificadores y onduladores. La utilización de tiristores en circuitos de conversión corriente continua/corriente alterna hace variar el factor de potencia según el momento de inicio de conducción.

■ Necesidad de compensar el factor de potencia

La intensidad que circula por una línea para suministrar una determinada potencia activa es inversamente proporcional al factor de potencia de la instalación.

En una línea trifásica, la intensidad de línea:

© Ediciones Paraninfo

$$I_L = \frac{P}{\sqrt{3}\, V_L \cos\varphi}$$

I_L: Intensidad de línea (A).
P: Potencia activa (W).
V_L: Tensión de línea (V).

Un factor de potencia bajo hace que la intensidad de línea sea elevada; ello provoca en la línea un aumento de la caída de tensión y de las pérdidas de energía por efecto Joule.

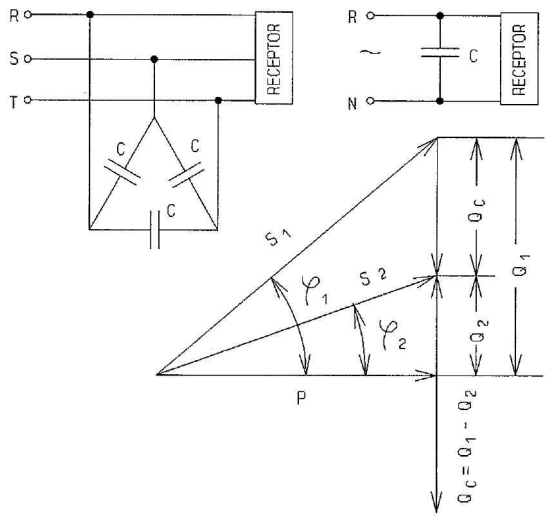


Fig. 7.10

■ **Modalidad de compensación**

Para compensar la energía reactiva debida a los receptores inductivos se utilizan los elementos de compensación:

- Sistemas de condensadores. Utilizados en alta y media tensión en la mayoría de las instalaciones industriales. Para la corrección del factor de potencia se utilizan condensadores conectados en paralelo (fig. 7.10). En instalaciones con equipos electrónicos, que generan armónicos; se utilizan equipos mixtos de compensación de reactiva con condensadores y filtros de armónicos.
- Compensadores síncronos. En redes de gran potencia y de muy alta tensión se utilizan motores síncronos funcionando en vacío como condensadores síncronos (de forma que la intensidad vaya adelantada respecto a la tensión).

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

7.21-1 Una instalación trifásica consume una potencia de 10,5 kW a 400 V, 50 Hz, con factor de potencia 0,6. Calcular:

a) Intensidad de línea.
b) Intensidad de línea si consume la misma potencia activa con factor de potencia 0,95.
c) Potencia perdida en la línea de alimentación en los dos casos anteriores, si su resistencia es de 0,4 Ω/fase.

a) La intensidad de línea $I_{L1} = \dfrac{P}{\sqrt{3}\, V_L \cos\varphi} = \dfrac{10\,500}{\sqrt{3}\cdot 400\cdot 0{,}6} = 25{,}26\ \text{A}$

b) Con factor de potencia 0,95, la intensidad de línea:

$$I_{L2} = \frac{P}{\sqrt{3}\, V_L \cos\varphi} = \frac{10\,500}{\sqrt{3}\cdot 400\cdot 0{,}95} = 15{,}95\ \text{A}$$

c) La potencia perdida en la línea con factor de potencia 0,6:

$$P_{p1} = 3\cdot R_L \cdot I_{L1}^2 = 3\cdot 0{,}4\cdot 25{,}26^2 = 765{,}68\ \text{W}$$

La potencia perdida en la línea con factor de potencia 0,95:

$$P_{p2} = 3\cdot R_L \cdot I_{L2}^2 = 3\cdot 0{,}4\cdot 15{,}95^2 = 305{,}28\ \text{W}$$

© Ediciones Paraninfo

7.21-2 Una industria consume 33 kW con factor de potencia 0,8 y tensión 400 V, 50 Hz. Calcular:

a) Intensidad de línea.
b) Intensidad de línea si se eleva el factor de potencia a 0,96.
c) Ahorro de potencia en la línea de alimentación si su resistencia por fase es 0,41 Ω.

Solución: a) 59,54 A; b) 49,62 A; c) 1 331,93 W.

7.22. CÁLCULO DE LA POTENCIA REACTIVA

El cálculo de la potencia reactiva Q_C de una batería de condensadores para corregir el factor de potencia de un receptor de potencia activa P, desde un valor de cos φ_1 a otro cos φ_2, se hace según el triángulo de potencias, representado en la figura 7.10.

$$Q_C = P(\operatorname{tg}\varphi_1 - \operatorname{tg}\varphi_2)$$

DEMOSTRACIÓN

Según el triángulo de potencias de la figura 7.10, la potencia reactiva inicial de la instalación: $Q_1 = P\operatorname{tg}\varphi_1$

La potencia reactiva final, después de conectados los condensadores:

$$Q_2 = P\operatorname{tg}\varphi_2$$

La potencia reactiva compensada por los condensadores:

$$Q_C = Q_1 - Q_2 = P(\operatorname{tg}\varphi_1 - \operatorname{tg}\varphi_2)$$

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

7.22-1 Una instalación alimentada por una línea trifásica de 400 V, 50 Hz, funciona consumiendo una potencia de 6 kW con un factor de potencia de 0,6 inductivo. Calcular:

a) Potencia reactiva que debe tener una batería de condensadores para elevar el factor de potencia a 0,9.
b) Capacidad de cada rama del triángulo de la batería de condensadores.

a) La potencia reactiva de capacidad:

$$Q_C = P(\operatorname{tg}\varphi_1 - \operatorname{tg}\varphi_2)$$
$$\cos\varphi_1 = 0{,}6;\quad \varphi_1 = 53{,}13°\ ;\quad \operatorname{tg}\varphi_1 = 1{,}333$$
$$\cos\varphi_2 = 0{,}9;\quad \varphi_2 = 25{,}84°;\quad \operatorname{tg}\varphi_2 = 0{,}484$$
$$Q_C = 6\cdot(1{,}333 - 0{,}484) = 5{,}094\ \text{kVAr}$$

c) Partiendo de la potencia reactiva de capacidad, la capacidad del condensador:

$$Q_C = 3X_C I_C^2;\ I_C = \frac{V}{X_C};\ Q_C = 3\frac{V^2}{X_C} = 3\cdot 2\pi f C V^2;\quad C = \frac{Q_C}{3\cdot 2\pi f V^2}$$
$$C = \frac{5\,094}{3\cdot 2\pi\cdot 50\cdot 400^2} = 3{,}38\cdot 10^{-5}\ \text{F} = 33{,}8\ \mu\text{F}$$

7.22-2 Para medir la potencia consumida por un motor trifásico se utiliza un vatímetro trifásico, y para medir la tensión e intensidad de línea se utiliza un voltímetro y un amperímetro. Considerando el sistema trifásico equilibrado de frecuencia 50 Hz y siendo las indicaciones de los aparatos: 5 418 W, 380 V, 10,3 A. Calcular:

© Ediciones Paraninfo

a) Factor de potencia.
b) Potencia reactiva que debe tener una batería de condensadores conectada en triángulo para elevar el factor de potencia a 0,9.
c) Capacidad de cada rama del triángulo de la batería de condensadores.
Solución: a) 0,8; b) 1,44 kVAr; c) 10,6 μF.

7.22-3 Un motor eléctrico trifásico, de 15 kW, 400/230 V, 50 Hz, factor de potencia 0,82, tiene de rendimiento a plena carga 85%. Calcular:
a) Potencia que consume el motor a plena carga.
b) Potencia reactiva necesaria de la batería de condensadores para elevar su factor de potencia a 0,93, cuando funciona a plena carga.
Solución: a) 17 647 W; b) 5,34 kVAr.

7.22-4 Una industria tiene un consumo mensual de energía activa de 31 450 kWh, y un consumo de energía reactiva de 32 345 kVArh. Calcular:
a) Potencia media, considerando 22 días laborables al mes, si la industria trabaja 12 horas diarias. A plena carga durante 8 horas y a un cuarto de plena carga durante 4 horas.
b) Factor de potencia medio.
c) Potencia reactiva que debe tener la batería de condensadores para mejorar el factor de potencia a 0,95.

a) Tiempo diario total de consumo a plena carga: $8 + \frac{1}{4}4 = 9$ horas

Horas mensuales $22 \cdot 9 = 198$ horas.

La potencia media: $\frac{31\,450}{198} = 159$ kW

b) Factor de potencia medio $\cos \varphi = \frac{W_a}{\sqrt{W_a^2 + W_r^2}} = \frac{31\,450}{\sqrt{31\,450^2 + 32\,345^2}} = 0{,}697$

c) La potencia reactiva de capacidad:

$$Q_C = P(\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2)$$
$$\cos \varphi_1 = 0{,}697; \quad \varphi_1 = 45{,}81° \; ; \quad \operatorname{tg} \varphi_1 = 1{,}029$$
$$\cos \varphi_2 = 0{,}95; \quad \varphi_2 = 18{,}19°; \quad \operatorname{tg} \varphi_2 = 0{,}329$$
$$Q_C = 159 \cdot (1{,}029 - 0{,}329) = 111 \text{ kVAr}$$

7.22-5 Una industria tiene un consumo mensual de energía activa de 6 542 kWh, y un consumo de energía reactiva de 4 552 kVArh. Calcular:
a) Potencia media, considerando 22 días laborables al mes, si la industria trabaja 10 horas diarias. A plena carga durante 8 horas y a un cuarto de plena carga durante 2 horas.
b) Factor de potencia medio.
c) Potencia reactiva que debe tener la batería de condensadores para mejorar el factor de potencia a 0,96.
Solución: a) 35 kW; b) 0,82; c) 14,22 kVAr.

© Ediciones Paraninfo

7.22-6 Una industria trabaja 16 horas diarias a plena carga con un total de 352 horas mensuales. En un año, el menor consumo mensual fue de 30 102 kWh y 32 880 kVArh, y el mayor consumo fue de 32 132 kWh y 35 295 kVArh. Calcular para estos dos consumos mensuales:

a) Potencia media.
b) Factor de potencia medio.
c) Potencia reactiva que necesita la batería de condensadores para elevar el factor de potencia a 0,96.

Solución: a) 85,5 kW; 91,3 kW; b) 0,675; 0,673; c) 68,5 kVAr; 73,7 kVAr

7.23. INSTALACIÓN DE LA BATERÍA DE CONDENSADORES

■ Formas de compensación

La instalación de las baterías de condensadores para compensar el factor de potencia de la instalación puede realizarse:

- En el inicio de la instalación. Compensación global o centralizada, mediante la cual se compensa la energía reactiva total de la instalación.
- En las derivaciones a cuadros secundarios. Compensación parcial o de grupo, mediante la cual se compensa la energía reactiva consumida por varios receptores.
- En bornes de cada receptor. Compensación individual, con la batería de condensadores conectada directamente a los bornes de la carga. En motores asíncronos trifásicos la potencia reactiva de la batería debe estar comprendida entre el 20%-30% del valor de la potencia aparente absorbida.

Suele utilizarse la compensación global, con conexión en los bornes de los cuadros generales de B.T. Esta compensación puede efectuarse:

- Por compensación automática, mediante un dispositivo automático regulador, medidor del factor de potencia, que conecta o desconecta escalones de baterías de condensadores según el factor de potencia del conjunto de la instalación. Los aparatos de maniobra pueden ser contactores (fig. 7.11), o interruptores estáticos a base de tiristores, que realizan la conexión de los distintos tramos de baterías de condensadores según la señal que reciben del regulador. La variación del factor de potencia no será superior al 10% de un valor medio en un prolongado período de funcionamiento (ITC-BT-43).
- Por una batería de condensadores de capacidad fija. En este caso la potencia reactiva de la batería en kVAr, no debe sobrepasar el 15% de la potencia nominal en kVA del transformador situado en el centro de transformación que alimenta la instalación, para evitar posibles elevaciones de tensión en caso de funcionamiento en vacío o con muy poca carga.

■ Conexión de la batería de condensadores

Debido a fenómenos transitorios, la intensidad de corriente en el instante de conexión puede ser elevada.

© Ediciones Paraninfo

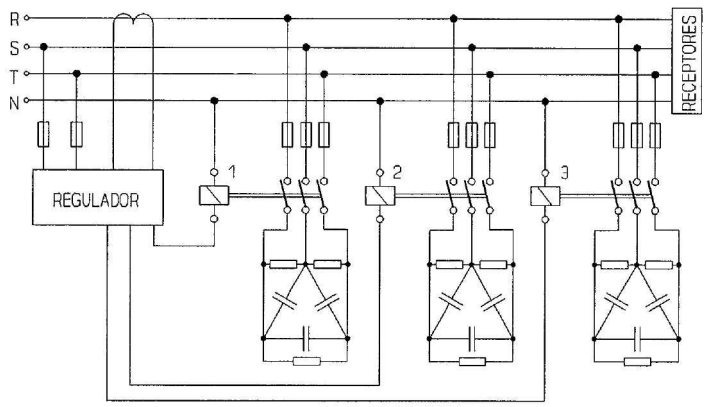


Fig. 7.11

En funcionamiento normal la batería de condensadores debe poder soportar una intensidad de corriente de 1,3 veces la nominal.

La conexión de la batería a la instalación de B.T. se realiza mediante:

- Aparatos de maniobra. Los aparatos utilizados en la conexión de la batería, interruptores y contactores, se dimensionan, igual que los conductores de conexión, para un valor de 1,5 a 1,8 veces la intensidad nominal de la batería (ITC-BT-48).
- Fusibles. Utilizados para protección contra cortocircuitos, se dimensionan en baja tensión, para una intensidad 1,6 a 2 veces la intensidad nominal de la batería.

■ **Desconexión de la batería de condensadores**

Cuando se desconecta la batería de condensadores, ésta tiende a conservar el valor de la tensión del momento de desconexión; por lo que debe tener un circuito de descarga, que origine al cabo de un tiempo, la disminución de tensión por descarga de los condensadores.

Se utilizan resistencias de descarga, que pueden estar conectadas permanentemente o conectarse a la batería en el momento de la desconexión.

En la compensación individual de motores de elevada potencia pueden aparecer sobretensiones en el momento de la desconexión, si el motor continúa girando y los condensadores se descargan sobre sus devanados. Para evitarlo, la batería de condensadores se conecta con un aparato de maniobra independiente del de maniobra del motor. Al desconectar el motor quedan simultáneamente desconectados los condensadores (ITC-BT-43).

© Ediciones Paraninfo

PROBLEMAS DE RECAPITULACIÓN

P.7-1. El equipo de medida de una instalación tiene un contador de energía activa tiene de relación 200/5 A y constante mecánica 10. El contador de energía reactiva tiene de relación 100/5 A y constante mecánica 10. El cuadro de medida se conecta mediante transformadores de intensidad de relación 100/5 A. Calcular:

a) Coeficiente de facturación del contador de activa.
b) Coeficiente de facturación del contador de reactiva.

Solución: a) 5; b) 10

P.7-2. La potencia contratada por una empresa en un período tarifario es 33 kW. Calcular la potencia de facturación con indicación de un maxímetro, en el caso de que el maxímetro indique 35 kW.

Solución: 35,7 kW

P.7-3. En el cuadro de medida de un local se utilizan tres maxímetros. La potencia contratada en horas punta es de 100 kW. La potencia contratada en horas llano es de 150 kW y la potencia contratada en horas valle es de 200 kW. Calcular la potencia de facturación total en cada período si la indicación del maxímetro punta es de 105 kW, la del maxímetro de llano es de 148 kW y la del maxímetro de valle es de 225 kW.

Solución: 147,9 kW.

P.7-4.Una vivienda con tarifa 2.0.2 y discriminación horaria de dos períodos, tiene de potencia contratada 4,4 kW y consume en un mes durante horas punta 65 kWh. Durante horas valle el consumo es de 185 kWh. Calcular:

a) Término de potencia, si el precio unitario de ésta es de 1,642355 euros/kW· mes.
b) Término de energía, si el precio unitario de consumo punta es 0,135145 euros/kWh y en valle el precio unitario es 0,050614 euros/kWh.
d) Facturación total, sin considerar el alquiler de los aparatos de medida.

Solución: a) 7,23 €; b) 19,81 €; c) 32,97 €.

P.7-5. Un local con contador de triple tarifa, consume durante un mes en horas punta 3 460 kWh, en horas llano 3450 kWh y valle 3 534 kWh. El consumo de energía reactiva en ese tiempo es de 4 750 kVArh. Calcular:

a) Factor de potencia medio.
b) Porcentaje de complemento por energía reactiva.

Solución: a) 0,91; b) 0%

P.7-6. Un local con tarifa 3.0.2, con discriminación horaria de tres períodos y potencia de facturación de 31,18 kW, tiene un consumo mensual de energía activa de 875 kWh en el primer período, 1147 kWh en el segundo y 2120 kWh en el tercero. El consumo de energía reactiva de 1 975 kVArh. Calcular:

a) Término de potencia, si el precio unitario de ésta es 1,77 euros/kW· mes.

© Ediciones Paraninfo

b) Término de energía, si el precio unitario de ésta es 0,143055 euros/kWh en el primer período, 0,115580 euros/kWh en el segundo y 0,078481 euros/kWh en el tercero.
c) Complemento por energía reactiva.
d) Facturación total, sin considerar el alquiler de los aparatos de medida.
Solución: a) 55,19 €; b) 424,12 €; c) 0 €; d) 584,43 €.

P.7-7 Una empresa recibe energía eléctrica a 20 kV y tiene contratado la tarifa 3.1A con tres períodos tarifarios. El consumo de energía en un mes y las potencias:

PERÍODOS	W_a (kwh)	Wr (kVArh)	Potencia contratada (kW)	Potencia maxímetro (kW)
P_1	4450	2490	90	70
P_2	14546	7974	90	76
P_3	10512	3566	120	101

Calcular:
a) Término de potencia mensual, si el precio unitario es 15,090975 euros/kW·año en el primer período, 9,306199 euros/kW·año en el segundo y 2,134018 euros/kW·año en el tercero.
b) Término de energía total si el precio medio ponderado, incluido el término de energía de la tarifa de acceso, según contrato, es 0,10745 euros/kWh.
c) Término de facturación de energía reactiva si el precio unitario de ésta para factor de potencia menor de 0,90 hasta 0,85 es de 0,013091 euros/kVArh.
d) Facturación total sin considerar el alquiler del equipo de medida.
Solución: a) 173,67 €; b) 3 170,63 €; c) 59,92 €; d) 4 144,69 €.

P.7-8. A la línea de alimentación de una instalación trifásica, de frecuencia 50 Hz se conectan dos vatímetros para medir la potencia consumida, un amperímetro para medir la intensidad de línea y un voltímetro para medir la tensión de línea. Las medidas que indican los aparatos son: 8 654 W, 16,3 A y 380 V. Calcular:
a) Factor de potencia.
b) Potencia reactiva que debe tener la batería de condensadores conectada en triángulo para elevar el factor de potencia a 0,96.
c) Capacidad de cada rama de la batería de condensadores conectada en triángulo.
Solución: a) 0,807; b) 3 808 VAr; c) 28 μF.

P.7-9. Una industria trabaja 16 horas diarias a plena carga con una total de 352 horas mensuales. En un año, el mayor consumo mensual fue de 32 395 kWh y 34 982 kVArh. Calcular:
a) Potencia media.
b) Factor de potencia medio.
c) Potencia reactiva que necesita la batería de condensadores para elevar el factor de potencia a 0,97.
Solución: a) 92 kW; b) 0,679; c) 76,4 kVAr.

© Ediciones Paraninfo

P.7-10. A un motor asíncrono trifásico de potencia nominal 22 kW, 380/660 V, 50 Hz, factor de potencia 0,87, se le conecta una batería de condensadores en triángulo para elevar el factor de potencia a 0,96, cuando funciona a plena carga conectado a 380 V. Calcular:
a) Potencia absorbida por el motor a plena carga si el rendimiento es el 90%.
b) Potencia reactiva de la batería de condensadores.
c) Capacidad de cada rama del triángulo de la batería de condensadores.
d) Intensidad de línea a plena carga, sin conectar la batería de condensadores.
e) Intensidad de línea a plena carga después de conectada la batería.
Solución: a) 24,44 kW: b) 6,72 kVAr; c) 49,38 μF; d) 42,68 A; e) 38,68 A.

P.7-11. Un estacionamiento subterráneo de vehículos está iluminado por 162 lámparas de 56 W, 230 V, cos φ=0,42 inductivo. La línea de alimentación es trifásica con neutro 400/230 V y las lámparas están conectadas simétricamente en estrella. Calcular:
a) Potencia activa que consume la instalación.
b) Potencia reactiva que debe tener una batería de condensadores conectada en triángulo para elevar el factor de potencia de la instalación de iluminación a 0,98.
Solución: a) 9 072 W; b) 17,76 kVAr.

P.7-12. Con una batería de condensadores conectada en triángulo se necesita compensar el factor de potencia a 0,98 de un grupo de motores asíncronos trifásicos, de tensión nominal 400 V, 50 Hz, formado por:
- Cuatro motores de 11 kW, cos φ=0,84, rendimiento 87%.
- Ocho motores de 3 kW, cos φ=0,82, rendimiento 80%.

Considerando que los motores funcionan a plena carga, calcular:
a) Potencia activa y reactiva total que consumen los motores.
b) Factor de potencia del conjunto de los motores.
c) Potencia reactiva que debe tener la batería de condensadores.
Solución: a) 80,57 kW, 53,6 kVAr; b) 0,8325; c) 37,25 kVAr.

© Ediciones Paraninfo

8 INSTALACIONES DE ENLACE E INTERIORES

8.1. INSTALACIONES DE ENLACE

Son las instalaciones que unen la línea de distribución con las instalaciones interiores o receptoras. Las instalaciones de enlace en B.T. parten de la acometida (a) (fig. 8.1), y están formadas por: caja general de protección (b), línea general de alimentación con interruptor general (c), instalación de contadores (d) y derivaciones individuales (e).

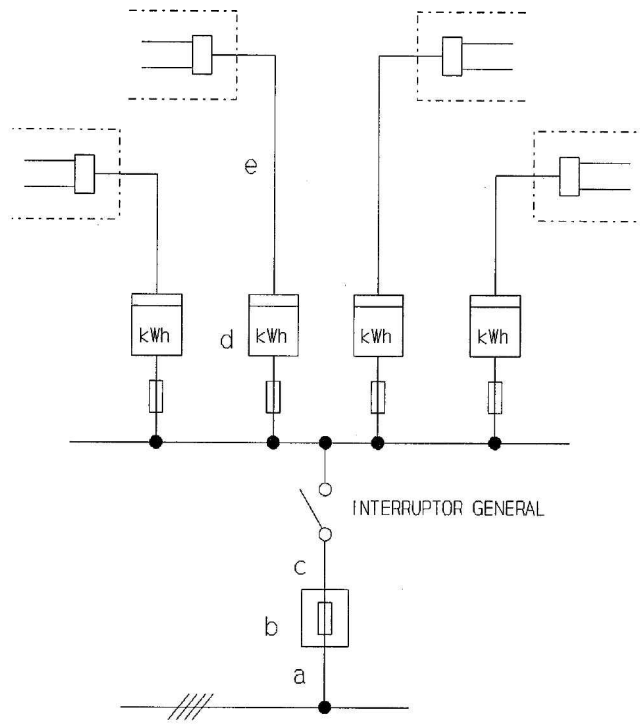


Fig. 8.1

Las secciones mínimas de los conductores y demás características de las acometidas e instalaciones de enlace, deben adaptarse a las especificaciones particulares de las empresas suministradoras de energía eléctrica, aprobadas por lo órganos competentes de las Comunidades Autónomas, en caso de que se limiten a su ámbito territorial, o por el Ministerio de Ciencia y Tecnología, en caso de aplicarse en más de una Comunidad Autónoma, (Artículo 14 del Reglamento electrotécnico para baja tensión).

8.2. ACOMETIDA EN B.T.

Es la parte de la instalación de distribución de la empresa suministradora de energía eléctrica, que alimenta a la caja o cajas generales de protección.

La instalación se realiza según el REBT (ITC-BT-11) y de acuerdo con las especificaciones de la empresa suministradora.

La acometida puede ser aérea, subterránea o mixta. Se utilizan cables de cobre o aluminio, con tensión asignada 0,6/1 kV.

© Ediciones Paraninfo

8.3. ACOMETIDA AÉREA

Consiste en conductores colocados sobre postes o por la fachada de los edificios, siendo el origen de la instalación la red de distribución aérea.

El conductor más utilizado actualmente es de aluminio del tipo RZ 0,6/1 kV, conductores aislados con polietileno reticulado de color negro resistente a la intemperie, formando haces de cables unipolares sin cubierta de protección común.

La caída de tensión la establece la empresa distribuidora y la intensidad estará dentro de lo permitido según la instrucción ITC-BT-06 del REBT La altura mínima sobre calles y carreteras no será inferior a 6 m.

La acometida aérea, según la forma de la instalación puede ser:

a) *Acometida aérea tensada sobre apoyos*. Los conductores se suelen instalar sobre apoyos de hormigón, mediante ganchos de fijación y soportes, con vanos máximos de 40 a 50 m. Los conductores pueden instalarse tensados directamente (cable de poca sección), tensados sobre neutro fiador o tensados sobre fiador de acero.

b) *Acometida aérea posada sobre fachada*. Los conductores se instalan sujetos a la pared mediante abrazaderas, con una distancia entre éstas de 35 a 70 cm según la sección de los conductores. Protegida bajo tubo o canal rígido a alturas inferiores a 2,5 m.

8.4. ACOMETIDA SUBTERRÁNEA

Consiste en conductores bajo tierra que tienen su origen en una red de distribución subterránea. Suelen utilizarse cables formados por conductores de aluminio, aislados con XLPE y cubierta de PVC, (conductor RV).

La instalación se realizará según la instrucción ITC-BT-07 y puede ser con entrada y salida o en derivación. Según su formación la acometida subterránea puede ser con conductores aislados directamente enterrados en zanjas, con conductores aislados enterrados bajo tubo o con conductores colocados en galerías subterráneas.

El trazado de la acometida en urbanizaciones sigue las zonas públicas como paseos o aceras.

En la instalación en zanja los conductores se tienden sobre arena cribada y protegidos por ladrillo, teja o loseta de hormigón. En la instalación bajo tubo, éste es de plástico rígido o fibrocemento. En los cruces de calzada, cimentaciones, muros y paredes, la instalación es bajo tubo hormigonado.

8.5. ACOMETIDA MIXTA

Acometida formada por una parte aérea y otra subterránea. Para cada una de las ramas se siguen las normas correspondientes. Cuando en la acometida se realiza el cambio de subterránea a aérea o a la inversa, los conductores van protegidos por un tubo rígido hasta una altura mínimas de 2,5 m sobre el suelo. La boca del tubo se tapa para evitar que penetre el agua de lluvia en su interior.

© Ediciones Paraninfo

8.6. CAJA GENERAL DE PROTECCIÓN Y BASES TRIPOLARES VERTICALES

Las cajas generales de protección enlazan la acometida con la línea general de alimentación. Su función es alojar los elementos de protección de esa línea. Están formadas por una envolvente aislante, precintable, que contiene los bornes de conexión, las bases para cortacircuitos fusibles en los conductores de fase y neutro seccionable mediante pletina.

Los tipos de cajas seleccionados para edificios destinados preferentemente a viviendas, según proyecto tipo UNESA se indican en la figura 8.2.

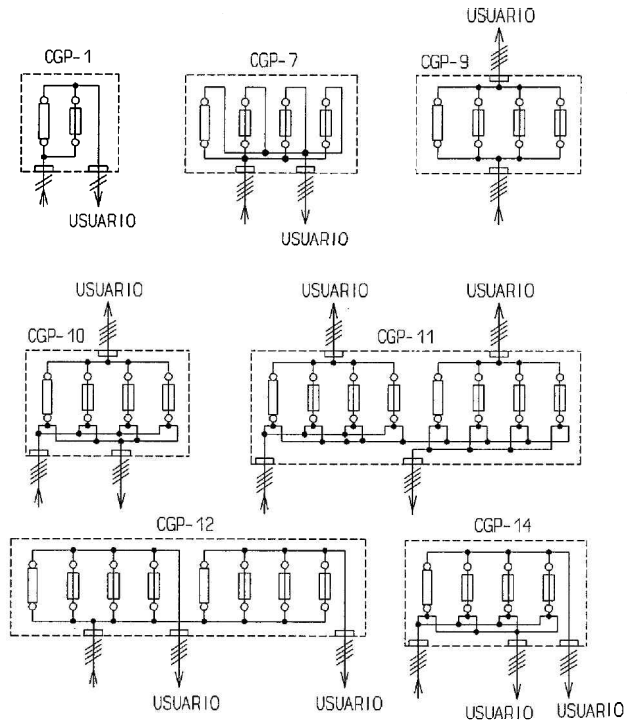


Fig. 8.2

La caja general de protección (C.G.P.), lleva las siguientes indicaciones: marca y tipo de fabricante, intensidad nominal (A), tensión nominal 440 V, designación UNESA del tipo seleccionado y año de fabricación.

■ Instalación de la C.G.P.

La instalación se realiza según el REBT (ITC-BT-13) y de acuerdo con las especificaciones de la empresa suministradora. La C.G.P. se instala en el límite de propiedad y con acceso directo desde la vía pública.

- Si la red de distribución es aérea:
  1) En montaje superficial en fachada o cerramiento.
  2) En hornacina en fachada o cerramiento.
  3) En apoyo de la red de distribución o en apoyo de la acometida.
- Si la red de distribución es subterránea la C.G.P. se sitúa en hornacina, en fachada o cerramiento.

Si el suministro es a uno o dos usuarios alimentados desde un mismo lugar, se puede utilizar la caja de protección y medida (C.P.M.), que reúne en un sólo elemento la caja general de protección y el conjunto de aparatos de medida. Su instalación puede ser sobre fachada o encajada en la pared de fachada o cerramiento.

© Ediciones Paraninfo

Se utiliza en general una C.G.P. por línea de alimentación. El número y tipo de C.G.P. depende de la potencia prevista para el edificio. Si son necesarias más de dos cajas se suele utilizar las barras de distribución con bases tripolares verticales (B.T.V.).

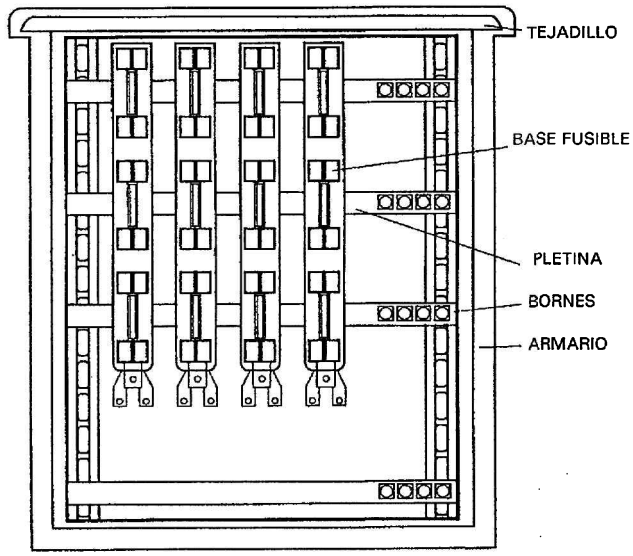


Fig. 8.3

Cuando exista un centro de transformación en el edificio, la línea instalación se alimenta desde el cuadro de B.T. del transformador, que lleva fusibles de protección y se considera como C.G.P. Es necesario reservar un local para CT si la previsión de carga sobrepasa los 100 kW, según Real Decreto 1955/2000 que regula el transporte, distribución, comercialización y autorización de instalaciones eléctricas (artículo 13 del REBT).

■ **Instalación de bases tripolares verticales**

Están constituidas por un armario en el cual van sujetas horizontalmente por aisladores cuatro pletinas de cobre. Sobre las tres pletinas de fase se conectan verticalmente los zócalos que sirven de soporte a las tres bases unipolares para cortocircuitos fusibles (fig. 8.3).

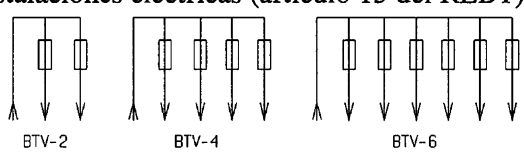


Fig. 8.4

Los esquemas de las B.T.V. más utilizadas se indican en la figura 8.4.

8.7. LÍNEA GENERAL DE ALIMENTACIÓN

Es la línea que une la C.G.P. con los equipos de medida de energía eléctrica.

La instalación se realiza según el REBT (ITC-BT-14) y de acuerdo con las especificaciones de la empresa suministradora. El trazado de la línea repartidora será lo más rectilíneo posible por zonas de uso común. Los conductores serán de cobre o aluminio, unipolares, sección mínima 10 mm^2 para cobre y 16 mm^2 para aluminio, tensión de aislamiento 0,6/1 kV, no propagadores de incendio y con baja emisión de humos y opacidad reducida (los cables RZ1 y DZ1, según norma UNE-EN 21123, cumplen esta condición). La instalación puede estar constituida por:

© Ediciones Paraninfo

- Conductores aislados en el interior de tubos empotrados.
- Conductores aislados en el interior de tubos enterrados.
- Conductores aislados en el interior de tubos en montaje superficial.
- Conductores aislados en el interior de canales protectoras.
- Canalizaciones prefabricadas.
- Conductores aislados en el interior de conductos cerrados de obra de fábrica.

El cálculo de la sección de los conductores se realiza según la carga prevista (ITC-BT-10), considerando la caída de tensión y la intensidad permitida según la norma UNE 20460-5-523. La caída de tensión permitida es del 1% cuando los contadores están parcialmente concentrados y del 0,5% cuando los contadores están totalmente concentrados (ITC-BT-14).

Tabla 8.1: Instalación bajo tubo de la línea general de alimentación (ITC-BT-14)

Secciones (mm^2)	Fase	10 (Cu)	16 (Cu)	16 (Al)	25	35	50	70	95	120	150	185	240
	Neutro	10	10	16	16	16	25	35	50	70	70	95	120
Diámetro exterior de los tubos (mm)		75	75	75	110	110	125	140	140	160	160	180	200

En general, salvo justificación por cálculo, la sección del conductor neutro será igual a la del conductor de fase.
Otro tipo de canalizaciones permitirán ampliar un 100% la sección de los conductores.

8.8. EQUIPO DE MEDIDA

Es el conjunto de contadores y demás elementos destinados a medir el consumo de energía eléctrica.

La instalación se realiza según el REBT (ITC-BT-16) y de acuerdo con las normas de la empresa suministradora. Para consumo de más de 250 A se necesita más de una línea de general de alimentación.

El equipo de medida para contadores concentrados en local o en armario (para 16 contadores como máximo) está formado fundamentalmente de las unidades funcionales siguientes: Interruptor general de maniobra (máximo 250 A), embarrado general y fusibles de seguridad, medida, mando de cambio de tarifa (opcional), embarrado de protección y bornes de salida, telecomunicaciones (opcional).

El local para la centralización de contadores es cerrado, dedicado sólo a este fin, situado preferentemente en la planta baja del edificio, lo más cerca posible a la entrada y cerca de la canalización vertical de las derivaciones individuales. Su acceso es por lugares de uso común. Están construidos con materiales no inflamables, ventilados, con alumbrado de emergencia y puertas de acceso que se abren hacia el exterior.

8.9. DERIVACIÓN INDIVIDUAL

Es la parte de la instalación que partiendo de la línea general de alimentación une suministra energía eléctrica a una instalación de usuario.

La instalación se realiza según el REBT (ITC-BT-15) y de acuerdo con las especificaciones de la empresa suministradora, podrán estar constituidas por los mismos sistemas de instalación que la línea general de alimentación.

Cada derivación individual será independiente, constará de conductor neutro, fase o fases y protección; pero además incluye un conductor de 1,5 mm^2 de sección, y color

© Ediciones Paraninfo

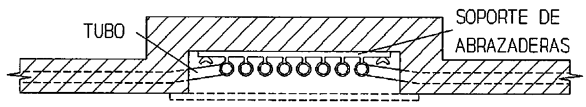


Fig. 8.5

rojo como hilo de mando de diferentes tarifas. Los conductores serán de cobre o aluminio, normalmente unipolares, sección mínima 6 mm^2, aislamiento 450/750 V (en cables multiconductores para tubos enterrados, aislamiento 0,6/1 kV), no propagadores de incendio y con baja emisión de humos y opacidad reducida, (el cable ES07Z1 cumple esta condición). La instalación en canaladura empotrada (fig. 8.5) o adosada al hueco de escalera, por lugares de uso común (excepto por recintos protegidos contra incendios según la NBE-CPI-96), será cerrada y precintable, tendrá placas cortafuegos cada tres plantas.

El cálculo de las derivaciones individuales se realiza según la potencia prevista en la derivación (ITC-BT-10), teniendo en cuenta la intensidad admisible en los conductores según el REBT (ITC-BT-19, norma UNE 20460-5-523).La caída de tensión permitida es del 0,5% cuando los contadores están parcialmente centralizados, del 1% cuando los contadores están totalmente centralizados, y del 1,5% para suministros individuales sin línea general de alimentación (ITC-BT-15).

Los tubos y canales protectores tendrán una sección mínima que permita ampliar la sección de los conductores un 100%. El diámetro exterior mínimo del tubo es del 32 mm. Se dispondrá un tubo de reserva por cada 10 derivaciones y en locales donde no esté definida su partición se dejará como mínimo un tubo por cada 50 m^2 de superficie. El diámetro mínimo de los tubos según la sección nominal del conductor y número de conductores se calculan en tablas según la instrucción ITC-BT-21.

Tabla 8.2: Canalizaciones fijas en superficie. Tubos preferentemente rígidos y en casos especiales curvables

Sección nominal de los conductores unipolares (mm^2)	Diámetro exterior de los tubos (mm)				
	Número de conductores				
	1	2	3	4	5
1,5	12	12	16	16	16
2,5	12	12	16	16	20
4	12	16	20	20	20
6	12	16	20	20	25
10	16	20	25	32	32
16	16	25	32	32	32
25	20	32	32	40	40
35	25	32	40	40	50
50	25	40	50	50	50
70	32	40	50	63	63
95	32	50	63	63	75
120	40	50	63	75	75
150	40	63	75	75	--
185	50	63	75	--	--
240	50	75	--	--	--

Para mas de 5 conductores por tubo o cables de secciones diferentes, su sección interior será como mínimo, igual a 2,5 veces la sección ocupada por los conductores.

© Ediciones Paraninfo

Tabla 8.3: Canalizaciones empotradas. Tubos rígidos, curvables o flexibles

Sección nominal de los conductores unipolares (mm^2)	Diámetro exterior de los tubos (mm)				
	Número de conductores				
	1	2	3	4	5
1,5	12	12	16	16	20
2,5	12	16	20	20	20
4	12	16	20	20	25
6	12	16	25	25	25
10	16	25	25	32	32
16	20	25	32	32	40
25	25	32	40	40	50
35	25	40	40	50	50
50	32	40	50	50	63
70	32	50	63	63	63
95	40	50	63	75	75
120	40	63	75	75	--
150	50	63	75	--	--
185	50	75	--	--	--
240	63	75	--	--	--

Para mas de 5 conductores por tubo o cables de secciones diferentes, su sección interior será como mínimo, igual a 3 veces la sección ocupada por los conductores.

Tabla 8.4: Canalizaciones enterradas.

Sección nominal de los conductores unipolares (mm^2)	Diámetro exterior de los tubos (mm)				
	Número de conductores				
	≤ 6	7	8	9	10
1,5	25	32	32	32	32
2,5	32	32	40	40	40
4	40	40	40	40	50
6	50	50	50	63	63
10	63	63	63	75	75
16	63	75	75	75	90
25	90	90	90	110	110
35	90	110	110	110	125
50	110	110	125	125	140
70	125	125	140	160	160
95	140	140	160	160	180
120	160	160	180	180	200
150	180	180	200	200	225
185	180	200	225	225	250
240	225	225	250	250	--

Para mas de 10 conductores por tubo o cables de secciones diferentes, su sección interior será como mínimo, igual a 4 veces la sección ocupada por los conductores.

© Ediciones Paraninfo

8.10. CUADRO PRIVADO DE MANDO Y PROTECCIÓN

Cerca del punto de entrada de la derivación individual en el local o vivienda del usuario se coloca el cuadro de distribución, de donde parten los circuitos interiores del abonado. En la entrada de la derivación individual y antes de la conexión de los dispositivos del cuadro, se coloca la caja independiente y precintable, para el interruptor de control de potencia (ICP), según la potencia contratada (excepto contratación por maxímetro). En el cuadro se instalan: Un interruptor general automático de corte omnipolar, de poder de corte mínimo 4,5 kA; interruptor diferencial; dispositivos de protección contra sobrecargas y cortocircuitos, de corte omnipolar, para cada circuito; dispositivo de protección contra sobretensiones, si es necesario (ITC-BT-23). Si se instalan varios interruptores diferenciales en serie existirá selectividad entre ellos.

La instalación se realiza según el REBT (ITC-BT-17) y de acuerdo con las especificaciones de la empresa suministradora. La altura de colocación del cuadro será entre 1,40 m y 2 m para viviendas y como mínimo 1 m para locales comerciales.

8.11. INSTALACIONES INTERIORES

Según el uso a que se destinan, las instalaciones de baja tensión (B.T.) en el interior de edificios se clasifican en:

- *Instalaciones domésticas*, en el interior de edificios destinados principalmente a viviendas.
- *Instalaciones en edificios singulares*, en el interior de edificios destinados a usos diversos (oficinas, comercios, cines, etc.).
- *Instalaciones industriales*, en el interior de fábricas y talleres.

8.12. CANALIZACIONES ELÉCTRICAS EN B.T.

Las canalizaciones o instalaciones eléctricas de B.T. en el interior de edificios según el REBT (ITC-BT-19 para prescripciones generales, e ITC-BT-20 para sistemas de instalación), además de la norma UNE 20,460. Las canalizaciones pueden realizarse empotradas o en superficie.

1) *Empotradas*
   - Bajo tubo: con conductores aislados en el interior de tubo, siendo el más utilizado el de plástico flexible.
   - Directamente: con conductores aislados especialmente para ser empotrados en forma directa o en huecos de construcción.
2) *En superficie*
   - Protegidas: con conductores aislados bajo tubo rígido (plástico o acero), también bajo canales protectoras o bajo molduras.
   - Canalización al aire: con conductores aislados especialmente para ser fijados sobre superficie o sobre bandejas.

© Ediciones Paraninfo

8.13. PROCESO DE TRABAJO EN UNA INSTALACIÓN EMPOTRADA BAJO TUBO

El orden de realización del trabajo es el siguiente:

1) Trazado de la instalación, marcando el lugar de la canalización y la posición de cajas de registro (donde se realizan los empalmes y derivaciones), cajas de mecanismos, tomas de corriente y puntos de luz.
2) Colocación y sujeción de tubos, cajas de registro y de mecanismos en los canales o rozas realizados en paredes, techos y suelos, siguiendo el trazado de la instalación.
3) Introducción en los tubos de los cables necesarios para proceder al conexionado de la instalación, colocando los mecanismos correspondientes.

Finalmente, después del conexionado, se comprueba el funcionamiento de la instalación.

8.14. INSTALACIONES DOMÉSTICAS

En edificios destinados principalmente a viviendas la instalación se divide en dos partes: instalación de enlace e instalación en el interior de la vivienda.

1) Instalación de enlace. comprendida entre la vivienda y la línea de distribución.
   Las instalaciones de enlace son las que partiendo de la acometida están formadas por: caja general de protección, línea general de alimentación, interruptor general de maniobra, centralización de contadores y derivación individual.
2) Instalación en el interior de la vivienda. Tiene su origen en el cuadro de distribución privado (fig. 8.6), que comprende los elementos de mando y protección de la instalación interior de la vivienda, y de él parten los circuitos interiores.

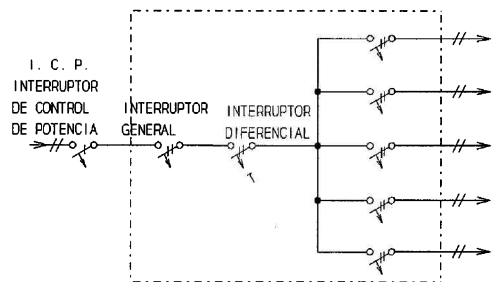


Fig. 8.6

Si la demanda de potencia del edificio supera los 100 kW (según el Real Decreto 1955/2000) se debe reservar un local para centro de transformación, que suele estar ubicado en la planta baja o sótano, con las dimensiones necesarias fijadas por la empresa suministradora de energía. En este caso la acometida al edificio será en alta tensión y las líneas generales de alimentación parten del cuadro de B.T. del transformador.

■ Grado de electrificación de las viviendas

De acuerdo con la superficie de las viviendas se establecen dos grados de electrificación, según la instrucción (ITC-BT-10).

© Ediciones Paraninfo

- *Electrificación básica*, para una superficie máxima de 160 m^2 y 5 circuitos (ITC-BT-25), con una previsión de potencia no inferior a 5 750 W (25 A a 230 V).
- *Electrificación elevada*, para una superficie mayor de 160 m^2, o con más de los 5 circuitos básicos (ITC-BT-25), con una previsión de potencia no inferior a 9 200 W (40 A a 230 V).

- **Previsión de cargas**

1) *Carga correspondiente a un conjunto de viviendas.* Se obtiene multiplicando la media aritmética de las potencia máximas previstas en cada vivienda por un coeficiente de simultaneidad (ITC-BT-10). Se utiliza la tabla siguiente:

Tabla 8.5

Nº de viviendas (n)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
Coeficiente de simultaneidad	1	2	3	3,8	4,6	5,4	6,2	7	7,8	8,5	9,2	9,9	10,6	11,3	11,9	12,5	13,1	13,7	14,3	14,8	15,3

Para n>21 el coeficiente de simultaneidad se calcula por la fórmula $15{,}3+(n-21)\cdot 0{,}5$.
Para edificios con viviendas de tarifa nocturna el coeficiente de simultaneidad será 1.

2) *Carga correspondiente a los servicios generales del edificio.* Es la carga correspondiente a la suma de las potencias de ascensores, montacargas, alumbrado de portal y escaleras así como todo el servicio eléctrico general del edificio (coeficiente de simultaneidad 1, ITC-BT-10).
Como datos orientativos pueden considerarse los siguientes para alumbrado de zonas comunes, portal, trasteros:
   - Alumbrado de incandescencia, 15-30 W/m^2.
   - Alumbrado de fluorescencia, 5-10 W/m^2.

3) *Carga correspondiente a los garajes.* Se considerará un mínimo de potencia por local de 3 450 W y se calculará según la superficie del local (coeficiente de simultaneidad 1, ITC-BT-10):
   - Garajes de ventilación natural 10 W/m^2
   - Garajes de ventilación forzada 20 W/m^2

4) *Carga correspondiente a los locales comerciales y oficinas.* Se tomará como previsión de carga mínima 100 W/m^2, con un mínimo por local de 3 450 W a 230 V (coeficiente de simultaneidad 1, ITC-BT-10).

6) *Carga correspondiente a lámparas o tubos de descarga.* La carga mínima prevista en los circuitos de alimentación a lámparas o tubos de descarga, según la instrucción (ITC-BT-44), será en voltiamperios de 1,8 veces la potencia en vatios de las lámparas.

7) *Carga correspondiente a una instalación de motores.* Los circuitos de alimentación de motores, según la instrucción (ITC-BT-47) deben tener la carga mínima prevista siguiente:

© Ediciones Paraninfo

- Para alimentación de un solo motor, el 125% de la intensidad nominal o de plena carga del motor.
- Para alimentación de varios motores, el 125% de la intensidad de plena carga del motor de mayor potencia más la intensidad a plena carga del resto de los motores.

En la alimentación de motores de equipos de elevación la caída de tensión en el arranque no debe ser superior al 5% (ITC-BT-32).

Las empresas suministradoras están obligadas, siempre que lo solicite el cliente, a un suministro que permita el funcionamiento de cualquier receptor monofásico de potencia menor a 5 750 W, hasta un máximo de 14 490 W, a 230 V (ITC-BT-10).

8.15. INSTALACIONES EN EL INTERIOR DE LA VIVIENDA

a) *Naturaleza de los conductores.* Según la instrucción ITC-BT-19 los conductores empleados en las instalaciones interiores pueden ser de cobre o aluminio. De cobre en viviendas (ITC-BT-26), usualmente tipo H07V-U, H07V-R y HO7V-K.

b) *Identificación de los conductores en una instalación interior.* Los conductores se identificarán por el color del aislante (ITC-BT-19):
   - Azul claro para el neutro.
   - Negro, marrón o gris para los conductores de fase.
   - Amarillo-verde para el conductor de protección.

c) *Sección del conductor neutro.* En instalaciones interiores, para tener en cuenta las corrientes armónicas por cargas no lineales y posibles desequilibrios, salvo justificación por cálculo, la sección del neutro será como mínimo igual a la de las fases (ITC-BT-19).

d) *Circuitos en el interior de la vivienda.* Las tablas 8.6 y 8.7, resume la instalación en el interior de las viviendas según el REBT (ITC-BT-25) con los circuitos mínimos y puntos de utilización según los grados de electrificación.
   Se utilizan también otros circuitos: señalización acústica, portero eléctrico, antenas receptoras de TV, telefonía, seguridad, etc.
   La caída de tensión máxima en el interior de la vivienda, desde el cuadro general de mando y protección es el 3%, considerando la intensidad nominal del interruptor automático que protege el circuito (ITC-BT-25).
   La resistencia de aislamiento mínima en instalaciones interiores, para canalizaciones que no excedan de 100 m de longitud, será mayor o igual a 0,5 MΩ, para tensiones menores o iguales a 500 V; excepto muy bajas tensiones de seguridad o protección, que será mayor o igual a 0,25 MΩ (ITC-BT-19).
   Las conexiones no pueden realizarse por simple retorcimiento y para secciones superiores a 6 mm^2, la conexión será por medio de terminales (ITC-BT-19).
   Los circuitos de mando de automatización, alimentados a muy baja tensión de seguridad, pueden conectarse antes del interruptor diferencial (ITC-BT-25).
   Todos los circuitos deben llevar conductor de protección (ITC-BT-26).

© Ediciones Paraninfo

Tabla 8.6: Características eléctricas de los circuitos interiores en viviendas (ITC-BT-25)

Electrificación		Circuitos	Potencia prevista por toma (W)	Factor simultaneidad F_s	Factor utilización F_u	Máximo nº de puntos de utilización o tomas por circuito	Tipo de toma	Interruptor automático (A)	Conductores. Sección mínima (*) mm^2	Tubo o conducto. Diámetro exterior mm
Elevada $S > 160\ m^2$	Básica	C_1 Iluminación	200	0,75	0,5	30	Punto de luz (con conductor de protección)	10	1,5	16
		C_2 Tomas de uso general	3 450	0,2	0,25	20	Base 16 A 2p+T	16	2,5	20
		C_3 Cocina y horno	5 400	0,5	0,75	2	Base 25 A 2p+T	25	6	25
		C_4 Lavadora, lavavajillas y termo eléctrico	3 450	0,66	0,75	3	Base 16 A 2p+T	20	4(**)	20
		C_5 Baño, cuarto de cocina	3 450	0,4	0,5	6	Base 16 A 2p+T	16	2,5	20
		C_6 Circuito adicional C_1	Circuito adicional tipo C_1, por cada 30 puntos de luz							
		C_7 Circuito adicional C_2	Circuito adicional tipo C_2, por cada 20 tomas de corriente de uso general o para superficie útil de la vivienda mayor de $160\ m^2$							
		C_8 Calefacción	5 750 por circuito					25	6	25
		C_9 Aire acondicionado	5 750 por circuito					25	6	25
		C_{10} Secadora	3 450	1	0,75	1	Base 16 a 2p+T	16	2,5	20
		C_{11} Automatización	2 300 por circuito					10	1,5	16
		C_{12} Circuitos adicionales de los tipos C_3 o C_4, cuando se prevean, o del tipo C_5, cuando su número de tomas de corriente exceda de 6.								

(*) Este valor corresponde a una instalación de dos conductores y tierra con aislamiento de PVC bajo tubo empotrado en obra.
(**) Cada toma individual puede conectarse mediante un conductor de sección 2,5 mm^2 que parta de una caja derivación del circuito de 4 mm^2.
Las bases de tomas de corriente deben ir combinadas con fusibles o interruptores automáticos de 16 A, que no son necesarios si se dispone de circuitos independientes para cada aparato con interruptor automático de 16 A en cada circuito.
- La tensión considerada es de 230 V entre fase y neutro.
- Intensidad de corriente por cada circuito = nºde tomas x Intensidad por toma o receptor x F_s x F_u
- Potencia por cada circuito = nºde tomas x Potencia por toma o receptor x F_s x F_u

Protección general: Interruptor general automático de corte omnipolar de intensidad mínima 25 A. Interruptor diferencial de sensibilidad máxima 30 mA por cada cinco circuitos.

Tabla 8.7: Puntos de utilización mínimos en cada estancia (ITC-BT-25)

Estancia	Circuito	Mecanismos	Superficie o longitud
Acceso	C_1 Iluminación	1 Pulsador timbre	
Vestíbulo	C_1 Iluminación	1 Punto de luz. 1 Interruptor de 10 A	
	C_2 Tomas de uso general	1 Base 16 A 2p+T	
Sala de estar o salón	C_1 Iluminación	1 Punto de luz. 1 Interruptor de 10 A	hasta 10 m^2 (2 si S > 10 m^2) uno por cada punto de luz
	C_2 Tomas de uso general	3 Bases 16 A 2p+T(*)	una por cada 6 m^2, redondeando al entero superior
	C_8 Calefacción	1 Toma de calefacción	hasta 10 m^2 (2 si S > 10 m^2
	C_9 Aire acondicionado	1 Toma de aire acondicionado	hasta 10 m^2 (2 si S > 10 m^2
Dormitorios	C_1 Iluminación	1 Punto de luz. 1 Interruptor de 10 A	hasta 10 m^2 (2 si S > 10 m^2) uno por cada punto de luz
	C_2 Tomas de uso general	3 Bases 16 A 2p+T(*)	una por cada 6 m^2, redondeando al entero superior
	C_8 Calefacción	1 Toma de calefacción	
	C_9 Aire acondicionado	1 Toma de aire acondicionado	
Baños	C_1 Iluminación	1 Punto de luz. 1 Interruptor de 10 A	
	C_5 Baño, cuarto de cocina	1 Base 16 A 2p+T	
	C_8 Calefacción	1 Toma de calefacción	
Pasillos o distribuidores	C_1 Iluminación	1 Punto de luz. 1 Interruptor/conmutadorde 10 A	uno cada 5 m de longitud. uno en cada acceso
	C_2 Tomas de uso general	1 Base 16 A 2p+T	hasta 5 m (dos si L > 5 m)
	C_8 Calefacción	1 Toma de calefacción	
Cocina	C_1 Iluminación	1 Punto de luz. 1 Interruptor de 10 A	hasta 10 m^2 (2 si S > 10 m^2) uno por cada punto de luz
	C_2 Tomas de uso general	2 Bases 16 A 2p+T	extractor y frigorífico
	C_3 Cocina y horno	1 Base 25 A 2p+T	cocina/horno
	C_4 Lavadora, lavavajillas y termo eléctrico	3 Base 16 A 2p+T	lavadora, lavavajillas y termo
	C_5 Baño, cuarto de cocina	3 Base 16 A 2p+T(**)	encima del plano de trabajo
	C_8 Calefacción	1 Toma de calefacción	
	C_{10} Secadora	1 Base 16 A 2p+T	secadora
Terrazas y vestidores	C_1 Iluminación	1 Punto de luz. 1 Interruptor de 10 A	hasta 10 m^2 (2 si S > 10 m^2) uno por cada punto de luz
Garajes unifamiliares y otros	C_1 Iluminación	1 Punto de luz. 1 Interruptor de 10 A	hasta 10 m^2 (2 si S > 10 m^2) uno por cada punto de luz
	C_2 Tomas de uso general	1 Base 16 A 2p+T	hasta 10 m^2 (2 si S > 10 m^2)

(*) La toma del receptor de TV debe ser múltiple, pero se considerará como un solo punto de utilización.

(**) Se colocará fuera del volumen delimitado por los planos verticales situados a 0,5 m del fregadero y de la encimera de cocción o cocina

© Ediciones Paraninfo

e) *Instalación en cuartos de baño.* Según la instrucción ITC-BT-27, en los cuartos de baño se definen cuatro volúmenes (fig. 8.7), con la aparamenta permitida en cada uno de ellos y su grado de protección.

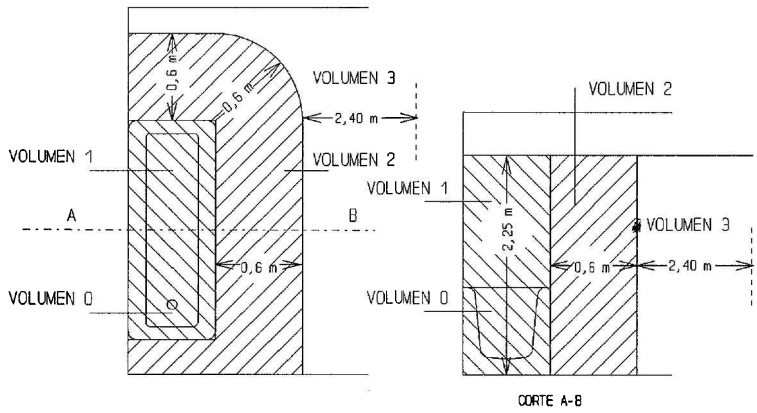


Fig. 8.7

- Volumen 0: Interior de bañera o ducha. No admite ningún mecanismo.
- Volumen 1: Situado sobre el volumen 0, limitado por planos verticales tangentes a los bordes exteriores de la bañera baño-aseo o ducha y un plano horizontal situado a una altura de 2,25 m del suelo. Admite interruptores de circuitos de muy baja tensión de seguridad (MBTS), máximo 12 V.
- Volumen 2: Situado entre el volumen 1 y planos verticales paralelos a una distancia de 0,6 m. Admite interruptores o tomas de MBTS y la instalación de bloques de alimentación de afeitadoras.
- Volumen 3: Situado entre el volumen 2 y planos verticales paralelos a una distancia de 2,4 m. Admite los mecanismos del volumen 2 y tomas de corriente, con transformadores de aislamiento o protegidas por interruptor automático e interruptor diferencial de alta sensibilidad (máximo 30 mA).

Una conexión equipotencial local suplementaria debe unir el conductor de protección asociado con las partes conductoras de los equipos de clase I en los volúmenes 1,2 y 3, incluidas las tomas de corriente, con las partes conductoras externas situadas en los volúmenes 0, 1, 2 y 3. (canalizaciones metálicas de calefacción, agua, gas o de la estructura del edificio).

f) *Instalación en cocinas.* En la cocina, además del alumbrado, se instalan con circuitos distintos: Tomas de corriente para uso general, además de extractor y frigorífico (bases 16 A 2p+T); la cocina y el horno eléctricos (base 25 A 2p+T), lavadora, lavavajillas y termo eléctricos (bases 16 A 2p+T), secadora (base 16 A 2p+T) y calefacción eléctrica.

Sobre las encimeras de trabajo de la cocina, para la alimentación de pequeños electrodomésticos o aparatos auxiliares, se instalan tomas de corriente (bases 16 A 2p+T) pertenecientes al circuito de baño y cocina,

© Ediciones Paraninfo

situados fuera del volumen delimitado por los planos verticales situados a 0,5 m del fregadero y de la encimera de cocción o cocina (ITC-BT-25).

8.16. INSTALACIÓN DE ASCENSOR

Es un aparato elevador que se desplaza entre guías y tiene una cabina que permite su utilización por personas.

a) *Sistemas de accionamiento.*
- Accionamiento eléctrico. La máquina de accionamiento es un motor eléctrico. Es el sistema más utilizado.
- Accionamiento hidráulico. La máquina de accionamiento es un grupo hidráulico.

b) *Constitución del ascensor de accionamiento eléctrico.*

1) Cuarto de máquinas. En este local se encuentra instalado el motor con sus accesorios de tracción, cuadro eléctrico de maniobra y limitador de velocidad. El cuarto suele situarse en la parte alta del edificio (fig. 8.8) sobre el recinto en el que se mueve el ascensor. Sus dimensiones son función de las de la cabina, permitiendo solamente el acceso del personal de conservación y con la posibilidad de mover la maquinaria. Debe estar ventilado e iluminado. El motor eléctrico puede ser de una velocidad o de dos velocidades (velocidad reducida para el frenado). En el motor de una velocidad, la reducción de velocidad antes de la parada se consigue de varias formas (desconexión del motor y conexión a corriente continua, variación de tensión o variación de frecuencia). La Norma Técnica de Edificación NTE-ITA indica los valores aproximados de consumo de los aparatos elevadores, según la tabla:

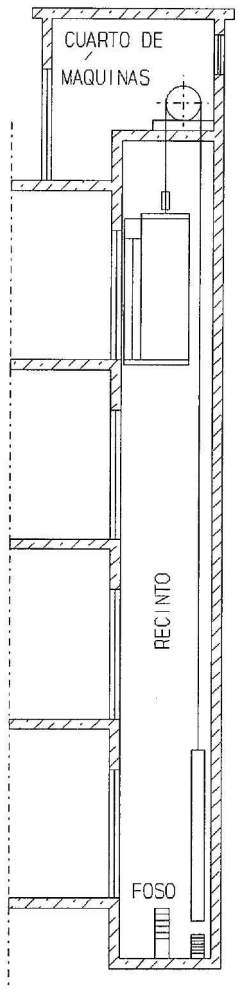


Fig. 8.8

Tabla 8.8

TIPO ASCENSOR	CARGA (kg)	Nº DE PERSONAS	VELOCIDAD (m/s)	POTENCIA (kW)
ITA 1	400	5	0,63	4,5
ITA 2	400	5	1,00	7,5
ITA 3	630	8	1,00	11,5
ITA 4	630	8	1,60	18,5
ITA 5	1000	13	1,60	29,5
ITA 6	1000	13	2,50	46,0

La instalación eléctrica debe cumplir la instrucción ITC-BT-32. La línea de alimentación al motor deberá dimensionarse de forma que la intensidad de arranque no provoque una caída de tensión superior al 5%.

© Ediciones Paraninfo

2) Recinto. Espacio por el que se mueven la cabina y el contrapeso. En él van los siguientes elementos:
   - Cabina. Es el elemento que efectúa el recorrido y destinado a transportar personas. Su estructura es metálica y su movimiento se controla mediante pulsadores (pulsador para cada parada, pulsador de mantenimiento de apertura de puertas, pulsador de alarma). La cabina debe llevar puertas, que suelen ser automáticas de tipo telescópico.
   - Contrapeso. Es el elemento que equilibra el peso de la cabina y la mitad de la carga que puede transportar. Va unido a la cabina por cables metálicos que pasan por la polea del mecanismo de tracción.
   - Guías. Son los elementos mecánicos que dirigen el movimiento de la cabina o del contrapeso.
   - Paracaídas. Es un sistema mecánico que colocado en la cabina o en el contrapeso, con el fin de parar automáticamente el ascensor en caso de elevada velocidad de descenso.
3) Foso. Es la parte inferior del recinto, donde van colocados los amortiguadores de impacto por si la cabina se desplaza fuera del nivel de las últimas paradas.

c) *Constitución del ascensor de accionamiento hidráulico.* La constitución es igual que la del ascensor de accionamiento eléctrico, pero en lugar de motor eléctrico, la máquina de accionamiento es un sistema hidráulico con motobomba y un émbolo impulsor, conectado directamente o por cables a la cabina y colocado en el foso. El ascensor más utilizado es el de tracción directa (fig. 8.9) con longitud de desplazamiento máxima de unos 8 m.

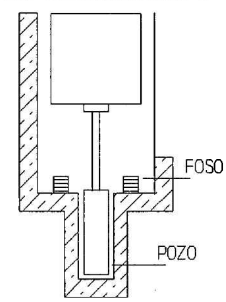


Fig. 8.9

d) *Maniobras en el ascensor.* Las maniobras más utilizadas son función del uso del ascensor:
   - Automática simple. Las llamadas se atienden solamente con el ascensor parado, de forma que mientras está la cabina desplazándose no se registran ni atienden llamadas. Se aplica en edificios con poco tráfico.
   - Automática colectiva. Las llamadas se registran con la cabina en desplazamiento y se atienden en el sentido en que fueron realizadas.

La instalación del ascensor debe cumplir el Reglamento de Aparatos Elevadores del Ministerio de Industria.

Según la Norma Técnica de Edificación (NTA-ITA), será necesario la utilización de ascensores en edificios de viviendas cuando la altura entre la cota de la acera a eje de portal y la cota de pavimento de la última planta sea mayor de 10,75 m; en edificios de apartamentos, oficinas y hoteles con 3 o más plantas por encima de la de acceso y en hospitales con una o más plantas sobre la de acceso.

© Ediciones Paraninfo

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

8.16-1 Un edificio de 5 plantas, 2 viviendas de 90 m² por planta, tiene un motor de ascensor de 5,5 CV, 400/230 V, 8,5/14,8 A, 50 Hz, cos φ=0,82. Para servicios generales utiliza 20 lámparas fluorescentes 18 W, 230 V. Tiene 3 locales comerciales de 30 m², una oficina de 50 m², un garaje con ventilación forzada y superficie 180 m². Dibujar el esquema unifilar del cuadro de mando y protección de un vivienda y calcular:

a) Previsión de cargas del edificio.
b) Línea general de alimentación, trifásica con neutro, para contadores totalmente concentrados. Longitud 20 m.
c) Derivación individual monofásica a una vivienda. Longitud 20 m.
d) Caída de tensión en la derivación al motor del ascensor en el arranque, si el conductor utilizado es de cobre de sección 6 mm² y la longitud 30 m.

La línea general está formada por conductores unipolares de cobre, aislados con polietileno reticulado (RZ1 0,6/1 kV), en instalación bajo tubo empotrado en obra. Para derivaciones individuales se utilizan conductores unipolares de cobre, aislados con termoplástico para 750 V, (ES07Z1) en instalación bajo tubo empotrado en obra. La tensión de servicio es trifásica con neutro 400/230 V y las caídas de tensión serán las máximas permitidas por el REBT

a) La carga total del conjunto de viviendas se calcula según el REBT, instrucción 10, (ITC-BT-10).

Por la superficie de las viviendas se establece el grado de electrificación, que en este caso corresponde a electrificación básica, con una potencia por vivienda de 5 750 W.

Para obtener la potencia correspondiente al conjunto de viviendas se utilizan factores de simultaneidad. En este caso, para 10 viviendas el coeficiente es 8,5 según la instrucción ITC-BT-10, (tabla 8.5 del libro).

La potencia media de las viviendas $P_{vm} = \dfrac{10 \cdot 5\,750}{10} = 5\,750$ W

La potencia del conjunto de viviendas $P_v = 5\,750 \cdot 8{,}5 = 48\,875$ W

La carga correspondiente a locales comerciales, según el REBT, instrucción 10 es de 100 W/m² con un mínimo de 3 450 W.

$$P_{comercio} = 100 \cdot 30 = 3\,000 \text{ W}$$

Es necesario escoger la potencia mínima de 3 450 W, por lo que la potencia de los comercios será $P_c = 3 \cdot 3\,450 = 10\,350$ W

La carga correspondiente al local destinado a oficina, según el REBT, instrucción 10 es de 100 W/m² con un mínimo de 3 450 W.

$$P_o = 100 \cdot 50 = 5\,000 \text{ W}$$

La potencia a instalar en el garaje se calcula, considerando ventilación forzada con una carga de 20 W/m² (ITC-BT-10), con un mínimo de 3 450 W.

$$P_g = 20 \cdot 180 = 3\,600 \text{ W}$$

La potencia de alumbrado en los locales para servicios comunes se calcula multiplicando la potencia de las lámparas por 1,8 (ITC-BT-44).

$$P_s = 18 \cdot 20 \cdot 1{,}8 = 648 \text{ W}$$

La potencia a considerar en el motor del ascensor, según el REBT, instrucción, 47, para un solo motor, será la calculada a partir de la intensidad nominal

© Ediciones Paraninfo

aumentada el 125%; pero en la misma instrucción, se indica que para aparatos elevadores, a efectos de cálculo de intensidad de arranque, se considerará la de régimen multiplicada por 1,3.

Aplicando el coeficiente 1,3 $P_m = \sqrt{3} \cdot 400 \cdot 1{,}3 \cdot 8{,}5 \cdot 0{,}82 = 6\,277{,}6$ W

La previsión de cargas del edificio será la suma de todas las potencias

$$P = P_v + P_c + P_o + P_g + P_s + P_m = 74\,750{,}6 \text{ W}$$

b) La caída de tensión máxima en la línea general de alimentación, según el REBT, instrucción 014, es de 0,5% para contadores totalmente concentrados

$$u = \frac{0{,}5 \cdot 400}{100} = 2 \text{ V}$$

La sección de la línea general $s = \dfrac{LP}{cuV_L} = \dfrac{20 \cdot 74\,750{,}6}{56 \cdot 2 \cdot 400} = 33{,}37 \text{ mm}^2$

En el caso de considerar para la línea general las más extremas condiciones de servicio (90ºC), la conductividad del cobre será 56/1,28=43,75 m/Ωmm², y la sección 42,7 mm², que corresponde a la sección comercial de 50 mm².

La sección de 50 mm², según el REBT, instrucción 19, norma UNE 20460-5-523: 2004, (tabla 2.10 del libro) admite para la canalización indicada 145 A.

La intensidad total del edificio, considerando un factor de potencia global de 0,9

$$I_L = \frac{P}{\sqrt{3}\, V_L \cos\varphi} = \frac{74\,750{,}6}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0{,}9} = 119{,}9 \text{ A}$$

Esta intensidad es menor que la permitida por el conductor de 50 mm², por lo que la línea general de alimentación tendrá tres conductores de sección 50 mm² para fases y un conductor de sección mínima 25 mm² para neutro (3x50+1x25).

El tubo tendrá, como mínimo, de diámetro exterior 125 mm (ITC-BT-14).

c) La caída de tensión máxima en las derivaciones individuales a las viviendas, para contadores totalmente concentrados, será de. 1% (ITC-BT-15).

$$u = \frac{1 \cdot 230}{100} = 2{,}3 \text{ V}$$

La sección de la derivación individual a una vivienda, con potencia de 5 750 W.

$$s = \frac{2LP}{cuV_L} = \frac{2 \cdot 20 \cdot 5\,750}{56 \cdot 2{,}3 \cdot 230} = 7{,}76 \text{ mm}^2$$

La sección comercial más próxima por exceso es de 10 mm², que según el REBT, instrucción 19, (tabla 2.10 del libro), admite una intensidad de 50 A.

La intensidad que circula por la derivación con un factor de potencia unidad

$$I = \frac{P}{V\cos\varphi} = \frac{5\,750}{230 \cdot 1} = 25 \text{ A}$$

Esta intensidad es menor que la admitida en ese conductor, por lo que la sección es válida. La derivación será con fase y neutro de sección 10 mm², y un conductor de protección, con sección 10 mm², además del conductor de mando de 1,5 mm², y tubo de diámetro exterior mínimo 32 mm (ITC-BT-15).

La sección del conductor de protección se escoge en función de la sección de los conductores de fase, según la instrucción ITC-BT-19 (tabla 8.10 del libro).

d) La caída de tensión en la derivación al motor del ascensor se considera teniendo en cuenta la instrucción ITC-BT-32, que indica como caída de tensión máxima

© Ediciones Paraninfo

permitida desde el origen de la instalación es el 5% en el arranque. La caída de tensión en la línea general es como máximo el 0,5%, por lo que queda para la derivación al motor el 4,5%.

La intensidad a considerar en el arranque (ITC-BT-47)

Tabla 8.9

MOTORES DE CORRIENTE ALTERNA	
Potencia nominal del motor	Constante máxima de proporcionalidad entre la intensidad de la corriente de arranque y la de plena carga.
De 0,75 a 1,5 kW	4,5
De 1,5 a 5,0 kW	3,0
De 5,0 a 15,0 kW	2,0
De más de 15,0 kW	1,5

En los motores de ascensores y aparatos de elevación la constante de proporcionalidad se multiplica por 1,3.

La intensidad de arranque máxima es: $3 \cdot 8{,}5 \cdot 1{,}3 = 33{,}15$ A.

La caída de tensión en la derivación, de sección 6 mm^2.

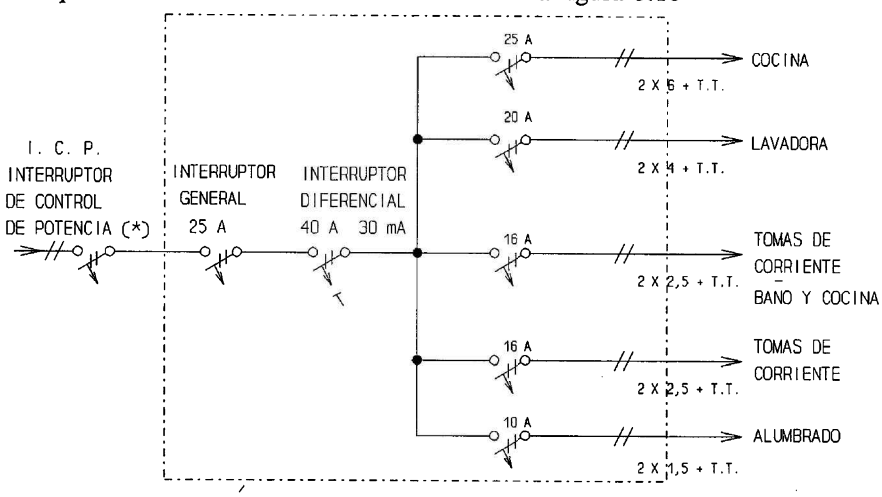
$$u = \frac{\sqrt{3}\, L I_L \cos\varphi}{cs} = \frac{\sqrt{3} \cdot 40 \cdot 33{,}15 \cdot 0{,}82}{56 \cdot 6} = 4{,}2 \text{ V}$$

En tanto por cien $u\,\% = \dfrac{4{,}2 \cdot 100}{400} = 1{,}05\ \%$

El cuadro de control y protección del motor del ascensor, así como del alumbrado de la cabina, cuarto de máquinas y recinto (que por ser su consumo muy pequeño no se consideró en el cálculo), suele situarse inmediato al motor, y está alimentado por las tres fases y neutro, por lo que la derivación tendrá 4 conductores de sección 6 mm^2 y el conductor de protección (4x6+T.T.).

La secciones mínimas, halladas por cálculo, deben adaptarse a las especificaciones particulares de las empresas suministradoras de energía eléctrica.

El esquema del cuadro de vivienda se indica en la figura 8.10



(*) DIMENSIONADO SEGUN LA POTENCIA CONTRATADA

Fig. 8.10: Cuadro de mando y protección de una vivienda de electrificación básica.

© Ediciones Paraninfo

8.16-2 Un edificio de 6 plantas tiene dos viviendas por planta, de 90 m^2 de superficie en las cinco primeras plantas y de 165 m^2 en la 6ª planta. En el entresuelo tiene dos locales para oficinas de 60 m^2 cada uno. En la planta baja tiene dos locales comerciales de 40 m^2 cada uno y otro de 30 m^2. En el sótano tiene un garaje en el que se instalan 30 luminarias con un tubo fluorescente de 36 W cada una, el motor de apertura de la puerta, de 0,5 kW 230 y la máquina de renovación de aire que consume 2 kW. En el alumbrado de servicios comunes, antena colectiva y portero automático el consumo es de 3 kW. En el motor del ascensor se considera un consumo de 4 kW. La instalación de calefacción, situada en el sótano tiene un consumo de 2 kW.

La línea general de alimentación está formada por conductores unipolares, de cobre, aislados con XLPE para 1 kV (tipo RZ1), en instalación bajo tubo empotrado en obra.

Para derivaciones individuales se utilizan conductores unipolares de cobre, aislados con termoplástico para 750 V, (ES07Z1) en instalación bajo tubo, empotrado en obra.

La tensión de servicio es trifásica con neutro 400/230 V y las caídas de tensión serán las máximas permitidas por el REBT

Calcular:

a) Potencia media de las viviendas y previsión de cargas en las mismas.
b) Línea general de alimentación, trifásica con neutro, para contadores totalmente concentrados. Longitud 15 m.
c) Derivación individual monofásica de longitud 24 m, a una vivienda de electrificación elevada.
d) Derivación individual trifásica al garaje aparcamiento, considerando una caída de tensión máxima del 1%. Longitud 8 m.

Solución: a) 6 325 W, 62 617,5 W; b) 70 mm^2; c) 16 mm^2; d) 6 mm^2.

8.17. INSTALACIONES EN EDIFICIOS SINGULARES

En edificios destinados a usos diversos (comercios, oficinas, etc.) el esquema general típico de la instalación es el siguiente (fig. 8.11): acometida (a), caja general de protección (b), línea de enlace (c), cuadro de contadores (d), cuadros generales de distribución de fuerza y alumbrado (e), cuadros secundarios de fuerza y alumbrado (f), y derivaciones individuales a los receptores (g).

Los cuadros generales de distribución de fuerza y de alumbrado deben llevar un interruptor automático general y por cada salida un interruptor magnetotérmico. Los dos cuadros de fuerza y alumbrado suelen formar un conjunto único, aunque con circuitos perfectamente separados. Además de la bornas de conexión principales (fases y neutro) los cuadros tienen una conexión a tierra, de donde parte el conductor de protección.

Los cuadros secundarios constan, habitualmente, de un interruptor automático general, seguido de interrup-

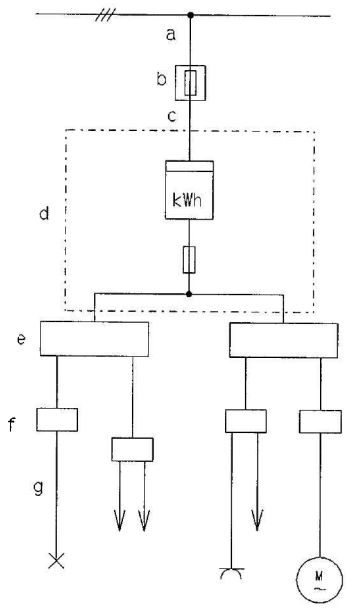


Fig. 8.11

© Ediciones Paraninfo

tor diferencial, y por cada salida un interruptor magnetotérmico. Todos los interruptores automáticos deben ser de corte omnipolar..

Cualquiera que sea el diseño de los cuadros, las salidas deben estar protegidas contra sobreintensidades (sobrecargas y cortocircuitos) y contra contactos indirectos.

En edificios comerciales o de oficinas se tomará como previsión de carga mínima 100 W por metro cuadrado y por planta, con un mínimo por local de 3 450 W a 230 V y coeficiente de simultaneidad 1.(ITC-BT-10).

En las instalaciones interiores según la instrucción ITC-BT-19, la caída de tensión desde el origen de la instalación interior, considerando todos los aparatos susceptibles de funcionar simultáneamente, debe ser inferior al 3% para alumbrado y al 5% para los demás usos.

En estos edificios se necesitan en algunos casos, instalaciones auxiliares de suministro de energía eléctrica, además de alumbrados especiales.

Cuando en la instalación se utilizan equipos electrónicos, se originan armónicos (intensidades de frecuencias múltiplos de 50 Hz), que distorsionan la forma de onda senoidal, por lo que se utilizan filtros o compensadores de armónicos para limitarlos. El tercer armónico, de frecuencia 150 Hz, provoca intensidades de corriente por el neutro, por lo que no se reduce su sección respecto a los conductores de fase. En instalaciones interiores, para tener en cuenta las corrientes armónicas y posibles desequilibrios, salvo justificación por cálculo, la sección del neutro será como mínimo igual a la de las fases (ITC-BT-19).

8.18. INSTALACIONES DE EMERGENCIA

Son instalaciones que tienen por objeto solucionar los fallos del suministro normal de energía eléctrica.

■ Suministros complementarios

Son las que a efectos de seguridad y continuidad del suministro, complementan a un suministro normal (artículo 10 del REBT). Comprenderá los suministros siguientes:

- *Suministro de socorro*. Para una potencia receptora mínima del 15% del suministro normal. Deben disponer de suministro de socorro: locales de espectáculos y actividades recreativas, cualquiera que sea su ocupación y los locales de reunión, trabajo y usos sanitarios con una ocupación prevista de más de 300 personas, según la intrucción ITC-BT-28.
- *Suministro de reserva*. Para mantener en servicio elementos de funcionamiento indispensables de la instalación receptora con una potencia mínima del 25% de la potencia de suministro normal. Deben disponer de suministro de reserva: estadios y pabellones deportivos, estaciones de viajeros, aeropuertos, estacionamientos subterráneos para más de 100 vehículos, centros comerciales de más de 2 000 m^2 de superficie, así como hospitales, clínicas, sanatorios y ambulatorios (ITC-BT-28).
- *Suministro duplicado*. Que es capaz de mantener un servicio mayor del 50% del suministro normal.

■ Alumbrado de emergencia

Las instalaciones de alumbrado de emergencia tienen por objeto asegurar, aun faltando el alumbrado general, la iluminación en los locales y accesos hasta las salidas,

© Ediciones Paraninfo

para una eventual evacuación del público, o iluminar otros puntos que se señalen. La alimentación será con fuentes propias de energía, automática con corte breve (máximo 0,5 s). Deben tener de alumbrado de emergencia los locales de pública concurrencia: todos los locales de espectáculos y actividades recreativas, locales de reunión, trabajo y usos sanitarios, según su capacidad de ocupación (ITC-BT-28). Se incluyen dentro de estos alumbrados:

- *Alumbrado de seguridad.* Para garantizar la seguridad de las personas que evacuen una zona o que tienen que terminar un trabajo potencialmente peligroso antes de abandonar la zona. Entra en funcionamiento cuando falle el alumbrado general o la tensión de alimentación baje a menos del 70%. Este alumbrado comprende:
  - Alumbrado de evacuación: Iluminación mínima de 1 lux a nivel del suelo y en el eje de los pasos principales, y 5 lux en los cuadros de alumbrado y de protección contra incendios. Funcionamiento mínimo 1 h.
  - Alumbrado ambiente o anti-pánico. Iluminación mínima de 0,5 lux en toda el área considerada. Funcionamiento mínimo 1 h.
  - Alumbrado de zonas de alto riesgo. Iluminancia mínima de 15 lux o el 10% de la iluminancia normal en zonas de alto riesgo. Tiempo mínimo el necesario para abandonar la zona.

  Deben disponer de alumbrado de seguridad: Recintos cuya ocupación sea más de 100 personas, recorridos generales de evacuación de zonas destinadas a usos residencial, hospitalario o cualquier otro uso que estén previstos para la evacuación de más de 100 personas, aseos generales en edificios de acceso público, estacionamientos de más de 5 vehículos, sobre de las puestas de salida, cerca de las escaleras, en cambios de nivel, etc. (ITC-BT 28). Las luminarias se situarán como mínimo a 2 m por encima del nivel del suelo (Código Técnico de la Edificación).
- *Alumbrado de reemplazamiento.* Permite la continuación de las actividades normales durante un mínimo de 2 h. Deben disponer de alumbrado de reemplazamiento: Los establecimientos sanitarios, en zonas de hospitalización (mínimo 5 lux), en salas de intervención, cura, tratamiento intensivo, paritorios y urgencias (iluminación igual al alumbrado normal), según la instrucción ITC-BT-28.

La instalación de locales de pública concurrencia será con cables no propagadores de incendio y con emisión de humos y opacidad reducida, (tipo RZ1 o ES07Z1). Para circuitos de seguridad no autónomos, o circuitos de servicio con fuentes autónomas centralizadas deben ser además resistentes al fuego, con objeto de mantener el servicio durante y después del incendio.

Existirán en alumbrado de emergencia alimentado por fuente central, como mínimo dos líneas diferentes, protegidas por interruptor automático de 10 A como máximo. Cada línea no podrá alimentar a más de 12 puntos de luz.

■ **Grupos electrógenos**

La fuente propia de energía estará constituida por baterías de acumuladores o aparatos autónomos automáticos, o grupos electrógenos. En los establecimientos sanitarios, hoteles, locales de espectáculos de gran capacidad, estaciones de viajeros, estacionamientos subterráneas, aeropuertos y establecimientos comerciales con gran afluencia de público, las fuentes propias de energía deberán poder suministrar energía

© Ediciones Paraninfo

a los alumbrados especiales y tener la potencia necesaria para atender servicios urgentes e indispensables.

El grupo electrógeno está formado por un alternador movido por un motor (generalmente Diesel), que cuando falla el suministro general se pone en marcha, manual o automáticamente. El arranque automático se realiza mediante el dispositivo de control, que arranca el motor, abre el contactor de la red y cierra el grupo electrógeno (fig. 8.12). El alternador suministra energía a los receptores prioritarios hasta que se restablece la tensión de red, en cuyo momento el equipo de control abre el contactor de grupo y cierra el de red, restableciendo el suministro.

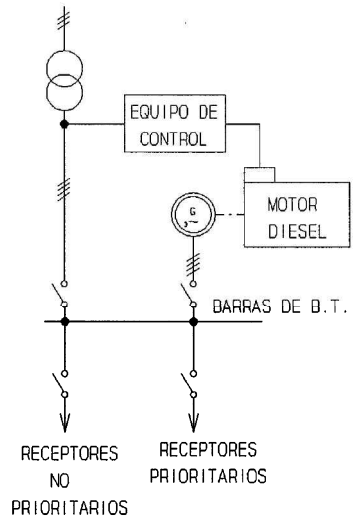


Fig. 8.12

Los sistemas de arranque del motor Diesel pueden ser: manuales, por aire comprimido o eléctrico. El sistema eléctrico es el más utilizado y consiste en un motor de corriente continua alimentado por batería de acumuladores.

La elección de la potencia del grupo electrógeno es función de la potencia que demanda la instalación en el arranque. Por ello es necesario determinar si se conectan al grupo todas las cargas simultáneamente o si la conexión se realiza de forma escalonada.

■ **Equipos de suministro de alimentación ininterrumpida (SAI)**

El sistema más utilizado está constituido por una batería de acumuladores y dos unidades básicas, cargador de baterías y ondulador, que transforma la corriente continua en alterna de frecuencia constante. Cuando falla la red de alimentación el suministro queda asegurado sin interrupción.

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

8.18-1 En un comercio que ocupa la planta baja de un edificio destinado a viviendas se quieren instalar los receptores siguientes:

Alumbrado:

Nueve pantallas de dos tubos fluorescentes de 36 W, 230 V en cada una de las seis secciones del comercio.

Treinta y cinco puntos de luz fluorescentes de 18 W, 230 V, para pasillos y escaleras.

Fuerza:

Dos motores de 3 CV, 400/230 V, 5/8,7 A, 50 Hz, $\cos\varphi=0{,}8$.

Un motor de 4 CV, 400/230 V, 6,5/11,5 A, 50 Hz, $\cos\varphi=0{,}82$.

La tensión de servicio es trifásica con neutro 400/230 V, 50 Hz.

Calcular:

a) Previsión de cargas del local.

b) Sección de la derivación individual del cuadro de contadores al cuadro general del local, trifásica con neutro. Longitud 35 m.

© Ediciones Paraninfo

c) Derivación del cuadro general del local al cuadro de control de motores, trifásico con neutro. Longitud 12 m.

d) Diferencial y magnetotérmico para protección de la línea del control de motores.

Los conductores serán de cobre, unipolares, aislados para 750 V, en instalación bajo tubo empotrado en obra. Los conductores interiores del tipo H07V y la derivación individual del tipo ES07Z1. La caída de tensión considerada en las derivaciones es el 1%.

a) La previsión de cargas de alumbrado se calcula, según la instrucción 44 del REBT, teniendo en cuenta el coeficiente 1,8 para lámparas de descarga.
Potencia total de alumbrado $P_a = 9 \cdot 6 \cdot 2 \cdot 36 \cdot 1{,}8 + 35 \cdot 18 \cdot 1{,}8 = 8\,132{,}4$ W.
La previsión de cargas para fuerza, según la instrucción 47 del REBT se calcula para la instalación de varios motores, teniendo en cuenta que la carga nominal del mayor debe incrementarse en un 125%.

$$P_m = \sqrt{3} \cdot 400 \cdot 6{,}5 \cdot 1{,}25 \cdot 0{,}82 + 2 \cdot \sqrt{3} \cdot 400 \cdot 5 \cdot 0{,}8 = 10\,158{,}5 \text{ W}$$

La previsión de carga del local:

$$P = P_a + P_m = 8\,132{,}4 + 10\,158{,}5 = 18\,290{,}9 \text{ W}$$

b) La caída de tensión en la derivación individual al local $u = \dfrac{1 \cdot 400}{100} = 4$ V

La sección de los conductores $s = \dfrac{LP}{cu V_L} = \dfrac{35 \cdot 18\,290{,}9}{56 \cdot 4 \cdot 400} = 7{,}14$ mm^2

La sección comercial más próxima por exceso es de 10 mm^2, que según el REBT, instrucción 19, admite la intensidad de 44 A (tabla 2.10 del libro).
La intensidad que circula por el conductor, considerando como factor de potencia global de la instalación el más pequeño (0,8) para calcular el caso más desfavorable

$$I = \frac{P}{\sqrt{3}\, V_L \cos\varphi} = \frac{18\,290{,}9}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0{,}8} = 33 \text{ A}$$

Esta intensidad es menor a la admitida en la sección de 10 mm^2, por lo que la derivación estará formada por tres conductores de sección 10 mm^2 para fases y otro conductor de sección 10 mm^2 para neutro, además del conductor de protección (4x10+T.T.).

c) En la derivación al cuadro de motores la caída de tensión $u = \dfrac{1 \cdot 400}{100} = 4$ V

La sección de los conductores $s = \dfrac{LP}{cu V_L} = \dfrac{12 \cdot 10\,158{,}5}{56 \cdot 4 \cdot 400} = 1{,}36$ mm^2

La sección comercial más próxima es de 1,5 mm^2, que según el REBT, instrucción 19, admite 13,5 A.
La intensidad que circula por el conductor considerando como factor de potencia global de los motores el más pequeño (0,8) para calcular en el caso más desfavorable.

© Ediciones Paraninfo

$$I = \frac{P}{\sqrt{3}\, V_L \cos\varphi} = \frac{10\,158{,}5}{\sqrt{3}\cdot 400\cdot 0{,}8} = 18{,}33 \text{ A}$$

Esta intensidad es mayor que la admitida para esa sección, por lo que se escoge la sección de 4 mm^2 que, según ITC-BT-19,(tabla 2.10 del libro) admite 24 A. Esta derivación estará formada por cuatro conductores de cobre, de sección 4 mm^2 para las tres fases y neutro, además del conductor de protección (4x4+T.T.).

d) El interruptor diferencial tendrá como mínimo una intensidad nominal de 25 A, mayor que la intensidad que circulará por el conductor. La sensibilidad con caracter general se escoge de 30 mA. Las características del diferencial pueden ser: 40 A, 30 mA, 400 V.

El interruptor magnetotérmico debe tener una intensidad nominal que cumpla la condición: $18{,}33\text{ A} \leq I_n \leq 24\text{ A}$.

El poder de corte, considerando que el magnetotérmico está alejado del centro de transformación de alimentación, es suficiente de 6 kA.

Las características del magnetotérmico pueden ser: 20 A, 6 kA, 400 V, tipo D.

8.18-2 En un local comercial se desean instalar los siguientes receptores:

Alumbrado:

Siete pantallas de 2 tubos fluorescentes de 58 W, 230 V.

Doce lámparas de incandescencia de 60 W, 230 V.

Fuerza:

Dos motores de 2 CV, 400/230 V, 3,6/6,3 A, 50 Hz, $\cos\varphi = 0{,}81$.

Un motor de 4 CV, 400/230 V, 6,5/11,5 A, 50 Hz, $\cos\varphi = 0{,}82$.

Instalación de calefacción de 6 kW, 400/230 V, $\cos\varphi = 1$

Calcular la sección mínima de la derivación individual desde el cuadro de contadores al cuadro general del local, trifásico con neutro. Longitud 25 m. Caída de tensión permitida 1%.La tensión de servicio es trifásica con neutro, 400/230 V, 50 Hz.

Los conductores son de cobre, unipolares, aislados con poliolefina termoplástica para 750 V, en instalación empotrada en obra bajo tubo.

Solución: 6 mm^2

8.18-3 Un supermercado tiene una instalación según el esquema de la figura 8.13, con un cuadro general de fuerza y alumbrado. Las potencias a instalar y los receptores están indicados en el esquema. Las lámparas para alumbrado interior son fluorescentes. Por cada línea de tomas de corriente se considera como potencia a suministrar simultáneamente 1 kW. La tensión de servicio es trifásica con neutro 400/230 V.

La instalación interior está formada por conductores de cobre unipolares, tipo H07V, en instalación empotrada bajo tubo. La derivación individual al cuadro general, con conductores unipolares de cobre tipo ES07Z1, tiene de longitud 5 m. La longitud máxima de las derivaciones que parten del cuadro es de 15 m para alumbrado y 20 m para otras aplicaciones.

Calcular e indicar sobre el esquema las secciones de los conductores, diámetro de los tubos y características de los aparatos de medida y protección.

© Ediciones Paraninfo

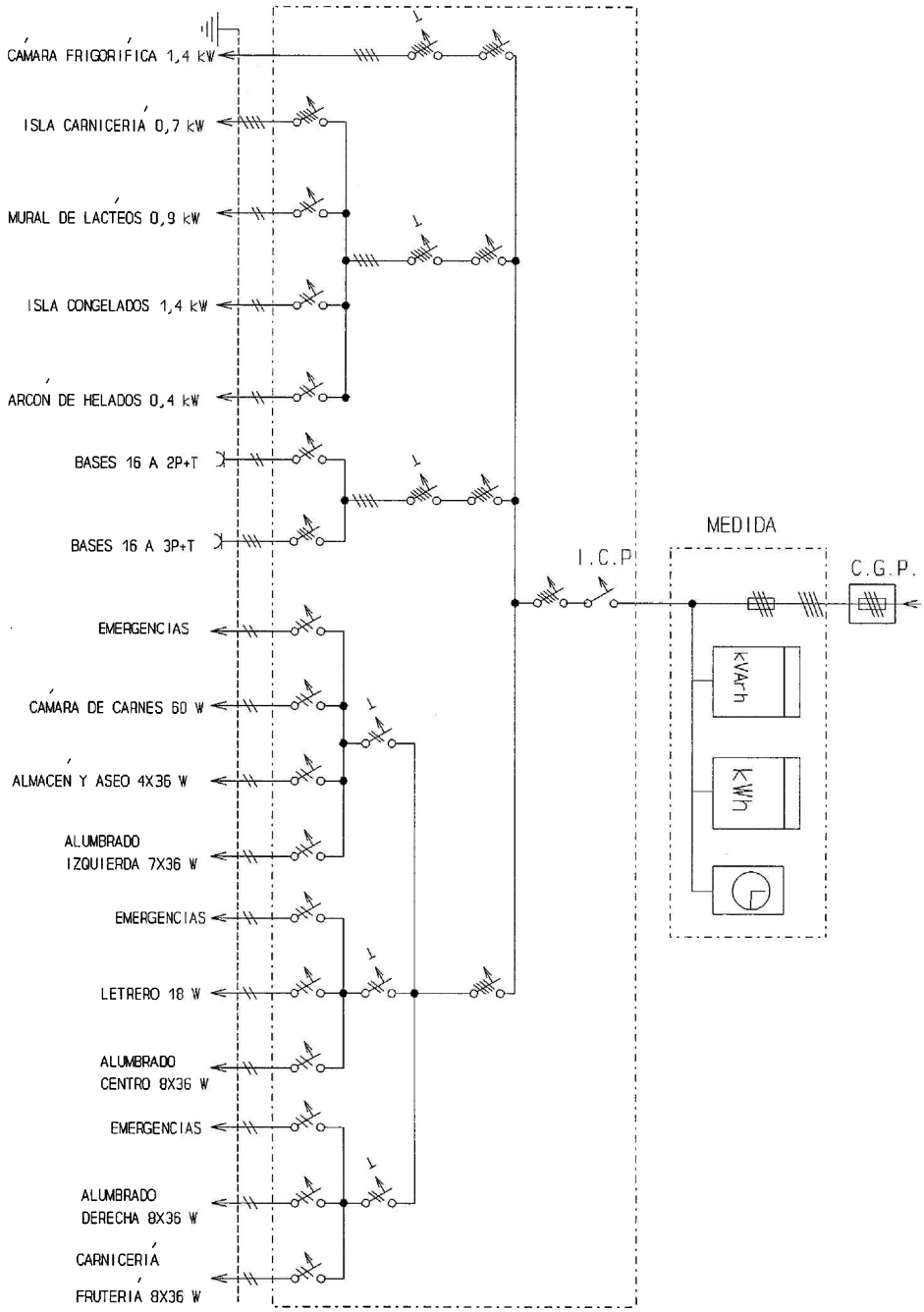


Fig. 8.13

© Ediciones Paraninfo

8.19. INSTALACIONES INDUSTRIALES

Hay que distinguir dos casos:

1) Instalación con acometida en B.T.: En industrias cuya demanda de potencia es pequeña. El esquema general típico es igual que el de los edificios singulares, según el tipo de industria.
2) Instalaciones con acometida en A.T. (fig. 8.14): En industrias cuya demanda de potencia es grande (la compañía suministradora no está obligada a atender suministros en BT superiores a 50 kW), la energía suele suministrarse en A.T., por lo que es preciso instalar un centro de transformación.
   El esquema general típico de la instalación con un centro de transformación de abonado es el siguiente: acometida (a), aparamenta de maniobra y protección en A.T. (b), contadores totalizadores en A.T.(c), transformador de potencia (d) y cuadro de distribución de fuerza y alumbrado para B.T.(e).

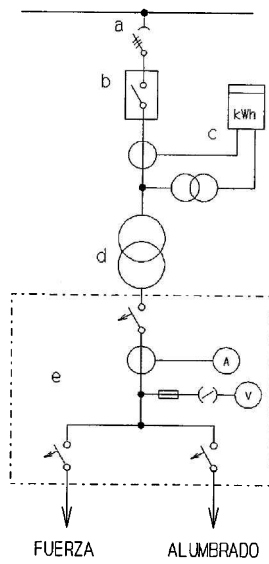


Fig. 8.14

La aparamenta de maniobra y protección depende del diseño de la instalación. El cuadro general de distribución en B.T. suele llevar un interruptor automático general de corte omnipolar, aparatos indicadores de tensión e intensidad, interruptores generales automáticos para fuerza y alumbrado.

Los cuadros secundarios de distribución están constituidos igual que en las instalaciones en edificios singulares, adaptándose en cada caso a las particularidades de la instalación.

Carga correspondiente a edificios destinados a concentración de industrias: Previsión de carga mínima 125 W por metro cuadrado y por planta, con un mínimo por local de 10 490 W a 230 V y coeficiente de simultaneidad 1 (ITC-BT-10).

Para *instalaciones industriales que se alimentan en alta tensión con transformador de distribución propio*, el origen de la instalación se considera en la salida del transformador. Las caídas de tensión máximas serán del 4,5% para alumbrado y del 6,5% para los demás usos (ITC-BT-19).

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

8.19-1 Se desea instalar una nave industrial con los siguientes receptores:

Alumbrado:

Catorce puntos de luz con lámparas de vapor de mercurio de 125 W, 230 V.
Seis puntos de luz con lámparas fluorescente de 36 W, 230 V.

Fuerza:

Un motor de 10 CV, 400/230 V, 15,2/26,4 A, 50 Hz, $\cos\varphi=0,82$.
Un motor de 15 CV, 690/400 V, 12,6/21,7 A, 50 Hz, $\cos\varphi=0,84$.
Un motor de 2 CV, 400/230 V, 3,6/6,3 A, 50 Hz, $\cos\varphi=0,81$.

La conexión se hará según el esquema unifilar de la figura 8.15, en donde se indican longitudes, número de conductores y caídas de tensión permitidas. La tensión de servicio es trifásica 400/230 V, 50 Hz.Calcular:

© Ediciones Paraninfo

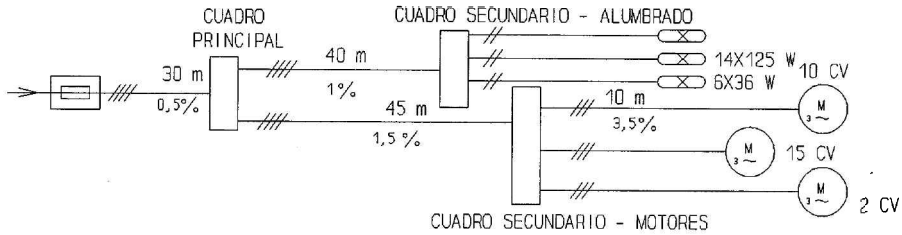


Fig. 8.15

a) Previsión de cargas de la industria.
b) Sección de la línea de alimentación o derivación individual a la industria.
c) Sección de la derivación individual al cuadro de control de motores.
d) Sección de la derivación al motor de 10 CV desde su cuadro de control.
e) Sección de la derivación al cuadro secundario de alumbrado.

La línea de alimentación estará formada por conductores de cobre, unipolares, aislados con XLPE para 1 kV, en instalación empotrada en obra bajo tubo.

Las derivaciones estarán formadas por conductores de cobre, unipolares, aislados con PVC para 750 V, en instalación bajo tubo en montaje superficial.

a) La previsión de cargas de alumbrado se calcula, según la instrucción 44 del REBT, teniendo en cuenta el coeficiente 1,8 para lámparas de descarga.

$$P_a = 14 \cdot 125 \cdot 1{,}8 + 36 \cdot 6 \cdot 1{,}8 = 3\,538{,}8 \text{ W}$$

La previsión de cargas para fuerza, según la instrucción 47 del REBT se calcula para la instalación de varios motores, teniendo en cuenta que la carga nominal del mayor debe incrementarse en un 125%.

$$P_m = \sqrt{3} \cdot 400 \cdot 21{,}7 \cdot 1{,}25 \cdot 0{,}84 + \sqrt{3} \cdot 400 \cdot 15{,}2 \cdot 0{,}82 + \sqrt{3} \cdot 400 \cdot 3{,}6 \cdot 0{,}81 = 26\,441{,}5 \text{ W}$$

La potencia total $P = P_m + P_a = 26\,441{,}5 + 3\,538{,}8 = 29\,980{,}3$ W

b) La caída de tensión en la línea de alimentación $u = \dfrac{0{,}5 \cdot 400}{100} = 2$ V

La sección de los conductores $s = \dfrac{LP}{cuV_L} = \dfrac{30 \cdot 29\,980{,}3}{56 \cdot 2 \cdot 400} = 20{,}1 \text{ mm}^2$

La sección comercial más próxima por exceso es de 25 mm², que según el REBT instrucción 19, norma UNE 20460-5-523:2004, (tabla 2.10 del libro) admite 95A

La intensidad que circula por el conductor, considerando como factor de potencia global de la instalación el más pequeño (0,81) para el caso más desfavorable

$$I = \frac{P}{\sqrt{3}\, V_L \cos\varphi} = \frac{29\,980{,}3}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0{,}81} = 53{,}42 \text{ A}$$

Esta intensidad es menor que la admitida, por lo que la línea de alimentación estará formada por tres conductores de fase con sección 25 mm² y el conductor neutro con sección mínima 16 mm², (se debe utilizar igual sección que la fase).

c) En la derivación al cuadro de motores la caída de tensión $u = \dfrac{1{,}5 \cdot 400}{100} = 6$ V

La sección de los conductores $s = \dfrac{LP}{cuV_L} = \dfrac{45 \cdot 26\,441{,}5}{56 \cdot 6 \cdot 400} = 8{,}85 \text{ mm}^2$

La sección comercial más próxima por exceso es de 10 mm², que según el REBT, instrucción 19, (tabla 2.10 del libro) admite 44 A.

© Ediciones Paraninfo

La intensidad que circula por el conductor, considerando como factor de potencia global de los motores el más pequeño (0,81) para el caso más desfavorable.

$$I = \frac{P}{\sqrt{3}\, V_L \cos\varphi} = \frac{26\,441,5}{\sqrt{3}\cdot 400\cdot 0,81} = 47,1 \text{ A}$$

Esta intensidad es mayor que la admitida para la sección de 10 mm², por lo que se escoge la sección superior, de 16 mm² que admite 59 A (ITC-BT-19). La derivación estará formada por cuatro conductores, de sección 16 m² para las tres fases y el neutro, además del conductor de protección (4x16+T.T.). Si no se justifica la ausencia de desequilibrios de carga en la derivación, la sección del neutro será igual a la de fase (ITC-BT-19).

d) Derivación al motor de 10 CV

La caída de tensión $u = \frac{3,5\cdot 400}{100} = 14$ V

Para el cálculo de la sección la carga nominal del motor debe incrementarse en un 125%, según la instrucción 47 del REBT

$$P_{ml} = \sqrt{3}\cdot 400\cdot 15,2\cdot 1,25\cdot 0,82 = 10\,794,14 \text{ W}$$

La sección de los conductores $s = \frac{LP}{cuV_L} = \frac{10\cdot 10\,794,14}{56\cdot 14\cdot 400} = 0,34$ mm²

La sección comercial más próxima por exceso es de 1,5 mm², que según el REBT, instrucción 19, (tabla 2.10 del libro) admite 13,5 A.

La intensidad que circula por el conductor. $I_{ml} = 15,2\cdot 1,25 = 19$ A

Esta intensidad es mayor que la admitida para esa sección, por lo que se escoge la sección mínima de 4 mm² que, según la instrucción ITC-BT-19 admite 24 A. Esta derivación estará formada por tres conductores de cobre, de sección 4 mm² para las tres fases, además del conductor de protección (3x4+T.T.).

e) La derivación al cuadro de alumbrado se hace trifásica con neutro con objeto de repartir la carga de alumbrado entre las tres fases.

La caída de tensión en la derivación al cuadro de alumbrado $u = \frac{1\cdot 400}{100} = 4$ V

La sección de la derivación $s = \frac{LP}{cuV_L} = \frac{40\cdot 3\,538,8}{56\cdot 4\cdot 400} = 1,57$ mm²

La sección comercial más próxima por exceso es de 2,5 mm², que según la instrucción ITC-BT-19, admite una intensidad de 18,5 A (tabla 2.10 del libro).

La intensidad que circula por la derivación con un factor de potencia unidad

$$I = \frac{P}{\sqrt{3}\, V_L \cos\varphi} = \frac{3\,538,8}{\sqrt{3}\cdot 400\cdot 1} = 5,1 \text{ A}$$

Esta intensidad es menor que la admitida en ese conductor, por lo que la sección mínima es válida. La derivación será tres fases y neutro de sección mínima 2,5 mm², y un conductor de protección o de toma de tierra (4x2,5+T.T.).

8.19-2 En un taller se instalan los siguientes receptores:

Fuerza:

Un motor de 10 CV, 400/230 V, 15,2/26,4 A, 50 Hz, $\cos\varphi$=0,82

Un motor de 2 CV, 400/230 V, 3,6/6,3 A, 50 Hz, $\cos\varphi$=0,81.

Dos líneas de tomas de corriente de 16 A, trifásicas con neutro y conductor de protección, con una potencia a considerar de 1 kW en cada línea.

© Ediciones Paraninfo

Alumbrado:

Seis luminarias con una lámpara de vapor de mercurio de 125 W, 230 V.

Seis luminarias con 2 tubos fluorescentes de 36 W, 230 V, cada una.

Calcular:

a) Sección mínima de la línea de alimentación, trifásica con neutro, de la caja general de protección al cuadro general. Longitud 30 m. Caída de tensión considerada 0,5 %, (La caída de tensión máxima permitida para suministros individuales, sin línea general de alimentación es del 1,5 según la instrucción ITC-BT-15).

b) Sección mínima de la derivación al cuadro de fuerza. Longitud 20 m. Caída de tensión admisible 1 %.

La tensión de servicio es trifásica con neutro, 400/230 V, 50 Hz.

La línea general de alimentación estará formada por conductores de cobre unipolares, aislados con XLPE para 0,6/1 V, en canalización bajo tubo empotrado en obra.

Las derivaciones estarán formadas por conductores de cobre, unipolares, aislados con PVC para 750 V, en canalización bajo tubo en montaje superficial.

Solución: a) 16 mm^2; b) 4 mm^2.

8.19-3 Una nave industrial de uso indefinido lleva una instalación según el esquema unifilar de la figura 8.16, con un cuadro general de mando y protección. Las potencias a instalar y los receptores están indicadas en el esquema. Las lámparas para alumbrado interior son fluorescentes y de vapor de mercurio (para almacén), mientras que las de alumbrado exterior son de vapor de sodio. Por cada línea de tomas de corriente se considera como potencia a suministrar simultáneamente 1 kW.

La línea de alimentación o derivación individual, a la tensión 400/230 V. de longitud 16 m, está formada por conductores de cobre, unipolares RZ1 0,6/1 kV, en instalación empotrada en obra bajo tubo.

La instalación interior está formada por conductores de cobre unipolares, tipo H07V, en montaje superficial bajo tubo. La longitud máxima de las derivaciones que parten del cuadro es de 12 m.

Calcular e indicar sobre el esquema, las secciones de los conductores, diámetro de los tubos y características de los aparatos de medida y protección.

8.19-4 Un almacén de maquinaria agrícola lleva una instalación según el esquema unifilar de la figura 8.17, con un cuadro general de alumbrado y un cuadro de protección de otras aplicaciones. Las potencias a instalar y los receptores están indicadas en el esquema. Las lámparas para alumbrado interior son fluorescentes y de vapor de mercurio (para almacén), mientras que las de alumbrado exterior son de vapor de sodio. Por cada línea de tomas de corriente se considera como potencia a suministrar simultáneamente 1 kW. Tensión de alimentación trifásica con neutro 400/230 V.

La línea general de alimentación, de longitud 10 m, y la derivación individual, de longitud 5 m, están formadas conductores de cobre, unipolares, RZ1 0,6/1 kV, en instalación empotrada en obra bajo tubo.

La instalación interior está formada por conductores de cobre unipolares, H07V, en montaje superficial bajo tubo. La longitud máxima de las derivaciones es de 25 m para alumbrado y 20 m para otras aplicaciones.

Calcular e indicar sobre el esquema las secciones de los conductores, diámetro de los tubos y características de los aparatos de medida y protección.

© Ediciones Paraninfo

8.19-5 Una fábrica de decoración de cerámica, con acometida en A.T. a un transformador tipo intemperie, lleva una instalación según el esquema unifilar de las figuras 8.18 y 8.19, desde el interruptor de secundario del transformador, con un cuadro general de fuerza y dos cuadros de protección de alumbrado. Las potencias a instalar y los receptores están indicadas en el esquema. Las lámparas para alumbrado interior son fluorescentes y de vapor de mercurio, mientras que las de alumbrado exterior son de vapor de sodio. Por cada línea de tomas de corriente se considera como potencia a suministrar simultáneamente 1 kW. La alimentación en BT es trifásica 400/230 V, 50 Hz.

La línea de alimentación, de longitud 30 m, está formada por un cable tetrapolar, con conductores de cobre, RZ1 0,6/1 kV, en instalación enterrada bajo tubo.

La instalación interior está formada por conductores de cobre unipolares, H07V-K, en instalación empotrada bajo tubo. La longitud del cuadro general al cuadro de alumbrado 1 (para la nave principal) es de 22 m y de este al cuadro de alumbrado 2 (almacén y fabricación de porcelana) es de 12 m. La longitud máxima de las derivaciones es de 20 m para alumbrado y 30 m para los receptores de fuerza.

Calcular e indicar sobre los esquemas, las secciones de los conductores, diámetro de los tubos y características de los aparatos de medida y protección.

8.19-6 Para alimentar una nave industrial se proyecta la instalación de enlace en M.T. y el centro de transformación (CT), con las siguientes características según las indicaciones de la empresa suministradora de energía:

Entronque con la línea de distribución aérea de 20 kV:

- Seccionador de cuchillas unipolares 24 kV/400-630 A, con trinquete.
- Autoválvulas 24 kV/10 kA con dispositivo de desconexión a tierra. Línea de tierra con conductor de cobre de 50 mm^2 de sección, bajo tubo de plástico rígido de diámetro 50 mm, conectado mediante soldadura de alto punto de fusión, a cuatro picas de acero cobreado de diámetro 14 mm.
- Terminaciones tipo intemperie de material plástico 24 kV.

Línea de M.T. subterránea a 20 kV.

- Tres cables unipolares DHV 12/20 kV 1×50 mm^2 Al, con tubo de PVC, diámetro 125 mm, longitud 5 m y capuchón protege aguas.
- Tres tubos de fibrocemento bajo losa de hormigón con diámetro 120 mm, a una profundidad de 1,2 m. Seis arquetas de dimensiones $1,2\times1,2$ m, con tapa de fundición de 0,6 m de diámetro. Longitud de la canalización 200 m.

Centro de transformación interior con cabinas de A.T. prefabricadas 24 kV/630-400 A, *embarrados de cobre y alumbrado interior*:

- Cabina de remonte, con terminales de interior de 24 kV y seccionador de 400 A.
- Cabina de protección con disyuntor en SF6, tensión de servicio 24 kV, poder de corte 250 MVA a 20 kV. Disparo del disyuntor por termostato o sonda térmica del transformador. Equipo de relés directos de sobreintensidad y tiempos dependientes (regulables entre I_n y $2\times I_n$ A y tiempo entre 0,5 y 3 s, tarados a la intensidad $1,5\times I_n=18$ A y 0,5 s) disparo instantáneo en cortocircuito.
- Cabina de medida, con 2 transformadores de tensión 22/0,110 kV, clase 0,5, 50 VA, 24 kV y dos transformadores de intensidad, relación X/5 A, clase 0,5, 15 VA, 24 kV.

© Ediciones Paraninfo

- Cabina de By-Pass, con tres seccionadores de 400 A, 24 kV, para la comprobación por la empresa distribuidora del equipo de medida con transformadores patrones independientes.
- Transformador de 400 kVA; 20/0,400 kV, u_{cc}=4,1%, en baño de aceite con sonda térmica.

Equipo de medida en A.T.:

- Armario de plástico con puerta transparente y precintable, ubicado en el CT, de dimensiones 750×100×300 mm.
- Contador de energía activa a tres hilos, de doble tarifa con maxímetro.
- Contador de energía reactiva a tres hilos.
- Discriminador horario programable.
- Regleta de verificación y placa para montaje y colocación de todos los elementos.

Conexión al cuadro de B.T. Cables unipolares de cobre RV 0,6/1 kV 150 mm², dos por fase y uno para neutro.

Cuadro de B.T. Armario metálico con:

- Interruptor tetrapolar 1 000 A/750 V
- Cuatro columnas aisladas seccionables 400 A.
- Fusibles 250 A.

Red de tierras para CT:

- Red de tierras para neutro del transformador con conductor aislado RV 0,6/1kV de cobre de 50 mm² de sección y longitud 15 m (bajo tubo de PVC de diámetro 50 mm) conectado a 4 picas de tierra de acero cobreado de diámetro 14 mm, mediante soldadura de alto punto de fusión.
- Red de tierras para masas con conductor de cobre desnudo, de sección 50 mm², conectado a 4 picas de tierra de diámetro 14 mm, con soldadura aluminotérmica.

Iluminación del CT:

- Iluminación general del local del CT con dos pantallas fluorescentes estancas de potencia 2×36 W.
- Iluminación de emergencia con dos bloques autónomos de 300 lúmenes.

Señalizaciones del CT y material de seguridad:

- Cuadro de primeros auxilios.
- Armario metálico con gafas y mascarillas.
- Extintor de incendios.
- Rótulos.

Dibujar el esquema unifilar de la instalación y el esquema multifilar del cuadro de contadores. Calcular:

a) Intensidades nominales en primario y secundario del transformador.
b) Intensidad de cortocircuito máxima en la línea de M.T. si la potencia de cortocircuito en el punto de entronque es de 500 MVA.
c) Intensidad de cortocircuito en el secundario del transformador considerando la red de alimentación de potencia infinita.
d) Caída de tensión en la línea de M.T. a plena carga con factor de potencia 0,8, si la resistencia del cable es de 0,4 Ω/km y la reactancia 0,1 Ω/km
e) Presupuesto de los materiales de la instalación utilizando catálogos de casas comerciales.

Solución: a)11,54 A, 577,35 A; b)14,43 kA; c)14,1 kA; d)1,52 V

© Ediciones Paraninfo

8.19-7 Para la alimentación de una nave industrial se proyecta un centro de transformación intemperie y la línea de enlace aérea a 20 kV para conexión del CT a la red de distribución de M.T.. La instalación tiene las siguientes características:

Entronque con la línea de distribución aérea de 20 kV:

- Apoyo de seccionamiento HV 1 000 R-12, con cruceta recta y cadenas de amarre de dos discos y rótula larga. Vano reducido (20 m) hasta el apoyo de la compañía suministradora de energía.
- Seccionador unipolar 24 kV/400 A con trinquete.

Línea de M.T. aérea a 20 kV.

- Conductor LA-30
- Apoyo de alineación HV 630 R-12, con cruceta tipo bóveda y cadena de suspensión de dos discos y rótula corta. Vano hasta el poste en entronque 70 m.
- Apoyo de protección del centro de transformación HV 1 000 R-12, con cruceta recta y cadenas de amarre. Vano hasta el apoyo de alineación 80 m.
- Cortacircuitos de expulsión-seccionamiento 24 kV/100 A (fusible de 6 A), situados en el apoyo de protección.

Centro de transformación intemperie:

- Apoyo metálico de celosía C 3000-12 con cadenas de amarre y forrado antiescala. Vano hasta el apoyo de protección 30 m.
- Autoválvulas 24 kV/10 kA con desconexión a tierra.
- Transformador de 100 kVA, 20/0,400 kV, $u_{cc}=4\%$, en baño de aceite.
- Cable de conexión del transformador al cuadro de B.T., tipo RV 0,6/1 kV $3\times95+1\times50$, de cobre.
- Cuadro de B.T. situado en el apoyo. Armario de poliéster, interruptor tetrapolar. columnas aisladas seccionables 400 A con fusibles de 200 A.
- Línea de puesta a tierra de las masas y autoválvulas, con conductor de cobre sin aislamiento de sección 50 mm^2, bajo tubo rígido de PVC de diámetro 50 mm a largo del apoyo. Conexión mediante soldadura de alto punto de fusión a cuatro picas de acero cobreado de diámetro 14 mm.
- Línea de puesta a tierra del neutro, realizada con conductor de cobre RV 0,6/1 kV, de sección 50 mm^2, bajo tubo rígido de PVC de diámetro 50 mm. Conectada mediante soldadura de alto punto de fusión a cuatro picas de acero cobreado, de diámetro 14 mm.

Dibujar el esquema unifilar de la instalación y calcular:

a) Intensidades nominales en primario y secundario del transformador.
b) Intensidad de cortocircuito máxima en la línea de M.T. si la potencia de cortocircuito en el punto de entronque es de 400 MVA.
c) Intensidad de cortocircuito en el secundario del transformador considerando la red de alimentación de potencia infinita.
d) Caída de tensión a plena carga en la línea de M.T. con factor de potencia 0,8, si la separación entre los conductores es de 1,6-1,6-3,2 m.
e) Presupuesto de los materiales de la instalación utilizando catálogos de casas comerciales.

Solución: a) 2,9 A, 144,3 A; b) 11,55 kA; c) 3,6 kA; d) 1,11 V

© Ediciones Paraninfo

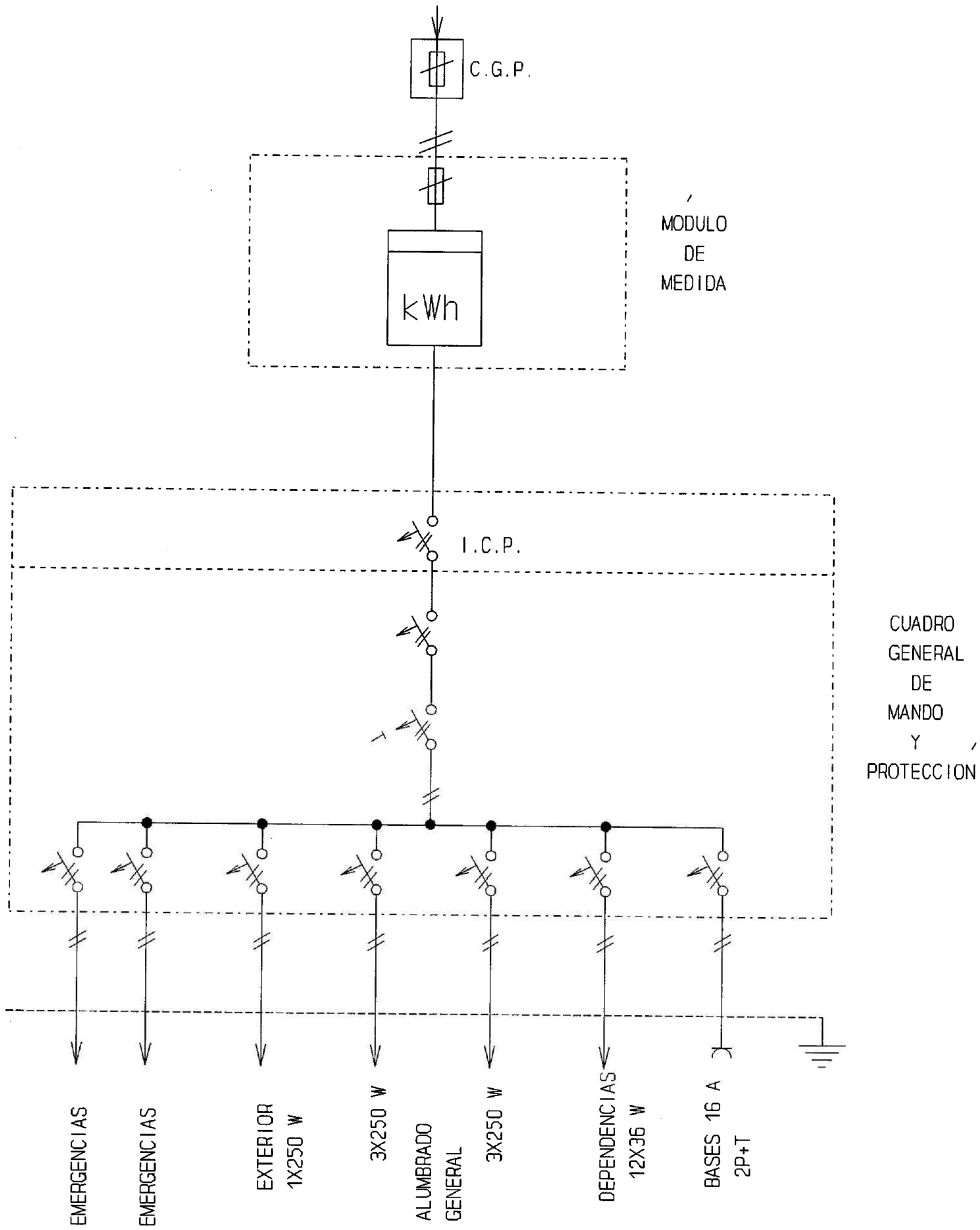


Fig. 8.16

© Ediciones Paraninfo

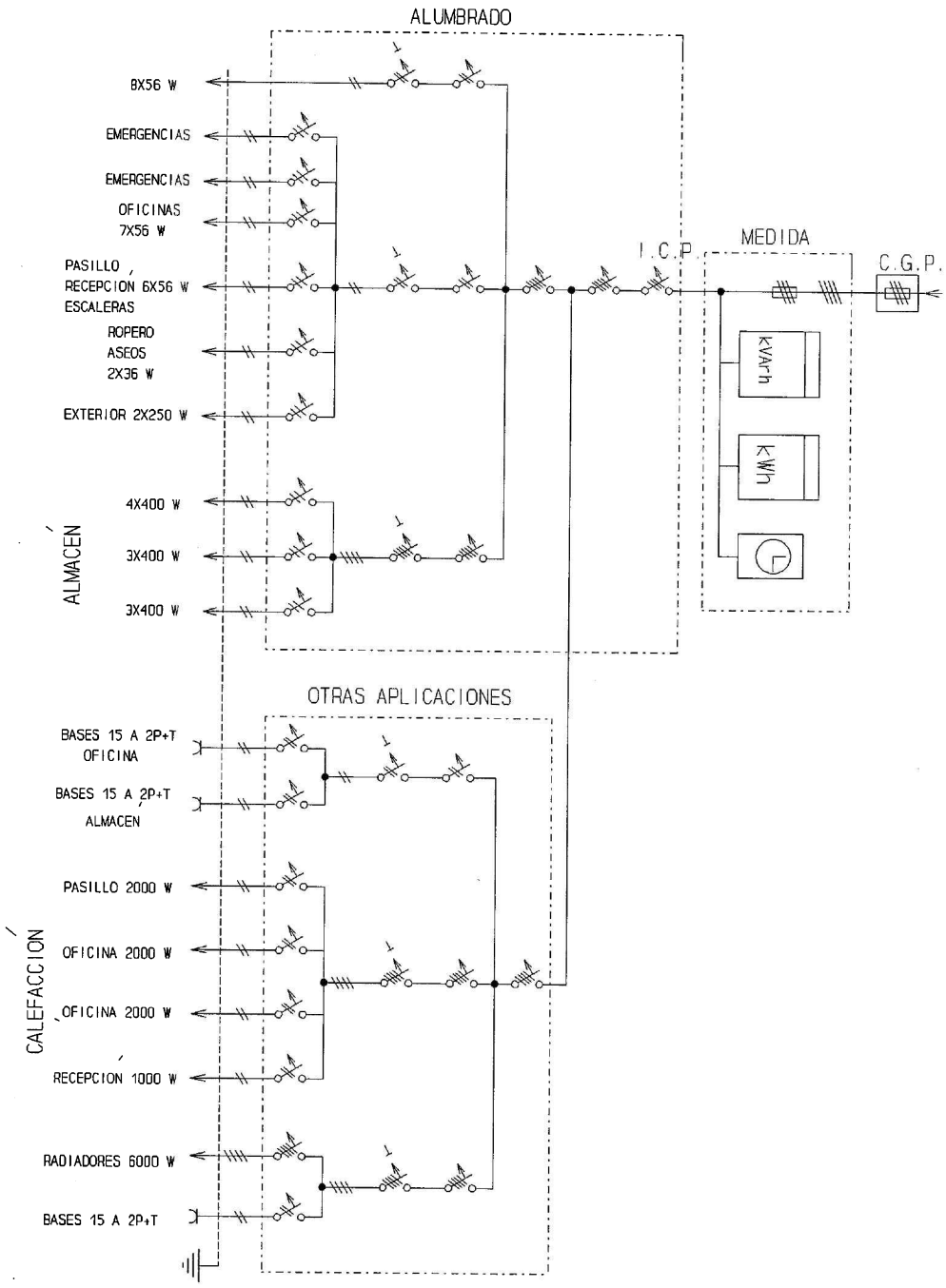


Fig. 8.17

© Ediciones Paraninfo

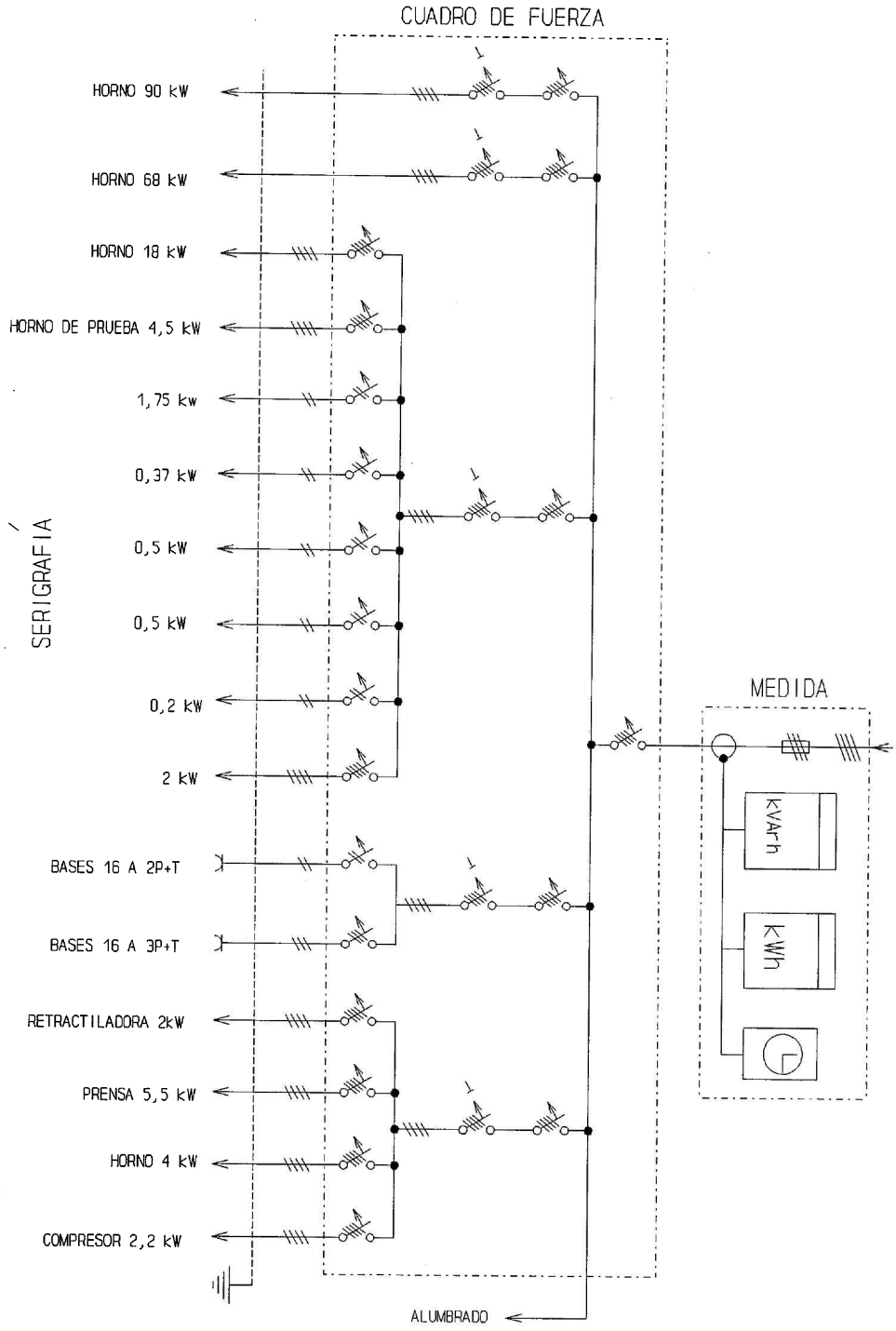


Fig. 8.18

© Ediciones Paraninfo

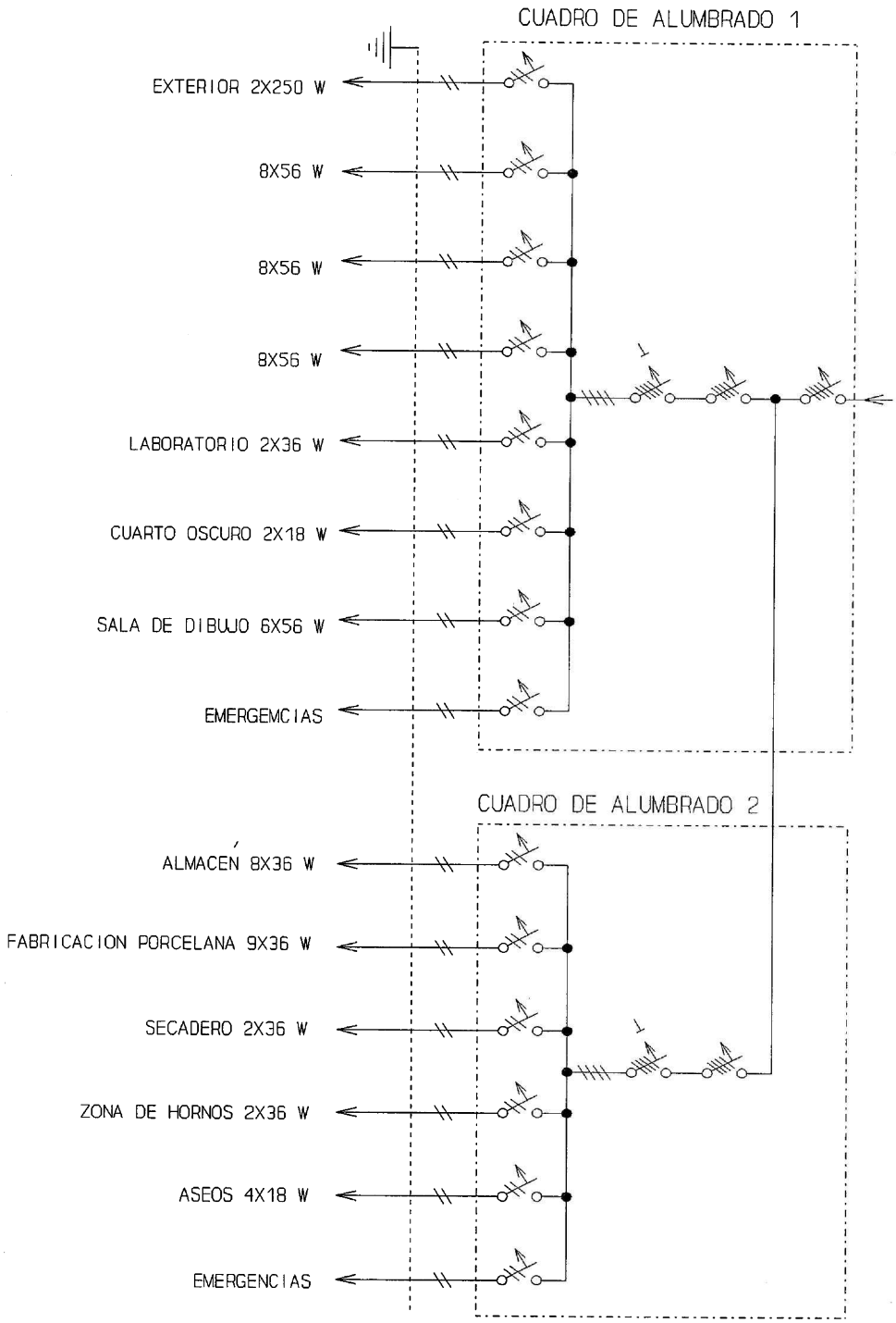


Fig. 8.19

© Ediciones Paraninfo

8.20. INSTALACIONES ELÉCTRICAS DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS

Según la instrucción ITC-BT-29 se consideran locales con riesgo de incendio o explosión aquellos en los que se fabriquen, procesen, manipulen, traten, utilicen o almacenen sustancias susceptibles de inflamarse o de hacer explosión, siendo sostenida la reacción por el aporte de oxígeno procedente del aire ambiente en que se encuentren.

Los equipos a emplear y los sistemas de protección a utilizar deberán cumplir la directiva europea que se recoge en el Real Decreto 400/1996. El material que se puede utilizar en ambiente explosivo se denomina material *Ex* o *EEx*.

■ **Modos de protección**

Conjunto de medidas específicas aplicadas a un equipo eléctrico para impedir la inflamación de una atmósfera explosiva que lo circunde. Los modos de protección recogidas en el REBT son:

- Inmersión en aceite "o": Equipo eléctrico sumergido en un líquido de protección.
- Envolvente antideflagrante "d": Equipo eléctrico que puede inflamar una atmósfera explosiva situado dentro de una envolvente que impide la transmisión de la explosión a la atmósfera circundante.
- Seguridad intrínseca "i": Equipo eléctrico en el que cualquier chispa o efecto térmico producido no sea capaz de producir la inflamación de la atmósfera explosiva.

■ **Categoría de aparatos**

- Categoría 1: Muy alto nivel de protección.
- Categoría 2: alto nivel de protección.
- categoría 3: Nivel de protección normal.

■ **Clasificación del emplazamiento**

De acuerdo con las sustancias presentes en el local se clasifican los emplazamientos según la instrucción ITC-BT-29 en dos clases:

- Clase I. Que tiene presencia de gases, vapores, nieblas o líquidos inflamables. Estos emplazamientos se dividen en tres zonas:
  Zona 0: Con presencia siempre de atmósfera explosiva.
  Zona 1: Con presencia de atmósfera explosiva de forma ocasional.
  Zona 2: Con no presencia de atmósfera explosiva en condiciones normales.

Pertenecen a esta clase (ITC-BT-29) locales como garajes (para más de 5 vehículos), talleres de reparación de vehículos e instalaciones donde se produzcan, manipulen, almacenen o consuman gases inflamables, locales donde se transvasen líquidos volátiles, cabinas de pintura, etc.

- Clase II. Que tiene presencia de polvo inflamable.
  Dentro de estos emplazamientos se distinguen tres zonas:
  Zona 20: Con presencia permanente de atmósfera explosiva.
  Zona 21: Con presencia ocasional de atmósfera explosiva.
  Zona 22: Con no presencia de atmósfera explosiva en condiciones normales.

© Ediciones Paraninfo

Pertenecen a esta clase (ITC-BT-29) locales como zonas de trabajo, manipulación y almacenamiento de cereales, zonas de trabajo y manipulación de industrias químicas en las que se produce polvo, zonas de tratamiento de textiles, carpinterías, talleres de confección, etc.

- **Elección del material a utilizar en locales con riesgo de incendio o explosión**

- Elección de equipos eléctricos. Deberán disponer de la marca CE, en las condiciones de Real Decreto 400/1996.

Para la selección del equipo se siguen las siguientes fases:

1) Caracterizar la sustancia o sustancias implicadas en el proceso.
2) Clasificar el emplazamiento en el que se va a instalar el equipo.
3) Seleccionar los equipos eléctricos según su categoría.
4) Instalar el equipo de acuerdo con las instrucciones del fabricante.

En los emplazamientos de clase I se admiten los siguientes equipos:

Equipos de categoría 1: Zonas 0, 1 y 2.
Equipos de categoría 2: Zonas 1 y 2.
Equipos de categoría 3: Zona 2

En los emplazamientos de clase II se admiten los siguientes equipos:

Equipos de categoría 1: Zonas 20, 21 y 22.
Equipos de categoría 2: Zonas 21 y 22.
Equipos de categoría 3: Zona 22

- Elección del cableado.

1) Cables: Para una distancia igual o superior a 5 m deben estar protegidos contra sobrecargas y cortocircuitos. La intensidad admisible en los conductores deberá disminuirse un 15% respecto su valor en una instalación normal. El cableado para seguridad intrínseca cumplirá la norma UNE-EN 60079-14 y UNE-EN 50039, siendo para otros cables la tensión de aislamiento 450/750 V. En instalaciones fijas los cables aislados con mezclas termoplásticas o termoestables pueden ir bajo tubo metálico, rígido o flexible. en caso de no ir bajo tubo deben llevar una protección mecánica, como aislamiento mineral y cubierta metálica, o cable armado con alambre de acero galvanizado y cubierta no metálica.

En instalaciones móviles, los cables serán flexible, de longitud máxima 30 m y sección mínima 1,5 mm^2.

2) Los tubos cumplirán la norma UNE-EN 20086. Si son necesarios flexibles serán también metálicos, corrugados, resistentes a la oxidación y de características semejantes a los rígidos. Los tubos metálicos se conectan a la red de tierra. La distancia de dos puestas a tierra en tubos flexibles no excederá de 10 m.

En caso de protección antideflagrante el tubo será de acero, sin soldadura, con galvanizado interior y exterior.

8.21. INSTALACIONES TEMPORALES Y DE OBRAS

En las instalaciones temporales los elementos de protección y maniobra de la instalación se colocan en armarios o cuadros, que pueden ser desplazados y volver a utilizarse en otra obra. La instalación debe cumplir la instrucción ITC-BT-33

© Ediciones Paraninfo

- Armario de acometida y módulo de medida. Alimentado a través de una acometida provisional, contiene la protección general y los equipos de medida.
- Cuadro general de distribución. Alimentado desde el cuadro de medida, contiene un interruptor magnetotérmico de corte omnipolar y un diferencial por cada línea de salida que va a una toma de corriente. Desde este cuadro se alimentan directamente los receptores semifijos (hormigonera, grúa, etc), el alumbrado fijo, los cuadros de alimentación portátil y la salida a 24 V para máquinas portátiles que efectúen el trabajo en zonas mojadas o encima de estructuras conductoras.
- Cuadro auxiliar de maquinaria portátil. Alimentado desde el cuadro general tiene un interruptor magnetotérmico de protección general y corte omnipolar y un interruptor diferencial, de donde parten las salidas a tomas de corriente.

Las tomas de corriente protegidas por interruptores diferenciales de sensibilidad máxima 30 mA y con toma de tierra. La alimentación de todos los aparatos permitirá el corte omnipolar en carga. Todos los elementos de la instalación que estén a la intemperie tendrán grado de protección mínimo IP45. Los cables para acometidas e instalaciones exteriores serán de tensión mínima 450/750 V, con cubierta de policloropreno o similar y aptos para servicios móviles. En instalaciones interiores serán como mínimo de 300/500 V y aptos para servicios móviles. Es muy usado para alimentación de maquinaria el cable flexible DN 0,6/1 kV; resistente al agua.

Como instalaciones de seguridad se utilizan, además del alumbrado de seguridad, otros circuitos, cuya continuidad de servicio es esencial, que alimentan a ventiladores o elevadores para personas. Estos circuitos alimentados mediante un sistema automático de corte breve por grupos electrógenos o baterías de acumuladores, tendrán protección contra contactos indirectos sin que se produzca un corte de la alimentación.

8.22. INSTALACIÓN DE PARARRAYOS

■ Pararrayos

Es el dispositivo destinado a proteger los edificios de las descargas atmosféricas. Debe cumplir la norma UNE 21185. Está constituido por:

- *Cabeza de captación.* Barra metálica con tratamiento anticorrosivo, terminada en punta o puntas (fig. 8.20). En su base se suelda el cable conductor que comunica con tierra. Cuando por encima del pararrayos pasa una nube cargada positivamente, se desplazan electrones hacia la punta y cuando la tensión entre esta y la nube es lo suficientemente grande se origina el rayo.

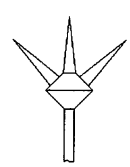


Fig. 8.20

- *Mástil.* La cabeza de captación va roscada al mástil, que es un tubo de acero galvanizado sujeto al edificio a través de elementos metálicos de fijación.
- *Cable conductor.* Es de cobre y la sección recomendada por la Norma Tecnológica de la Edificación (NTE IPP) es de 50 mm^2. El cable va sujeto a la cubierta y paredes del edificio mediante grapas colocadas a distancia menor o igual a un metro. En la parte inferior el cable va protegido por un tubo de acero galvanizado de unos 2 m de altura sobre el suelo. Las uniones del conductor se suelen hacer con soldadura aluminotérmica.

© Ediciones Paraninfo

- *Toma de tierra.* El cable conductor termina en la toma de tierra, que generalmente se realiza con picas de cobre o acero cobreado, de forma que la resistencia de la toma de tierra no sobrepase los 15 Ω (según la Norma Tecnológica de la Edificación NTE IEP).

■ **Volumen de protección del pararrayos**

El volumen o espacio de protección del pararrayos se admite que consiste en un cono de eje vertical, cuyo vértice es la punta y cuya base es un círculo de radio comprendido entre 1 y 2 veces la altura total del pararrayos (fig. 8.21).

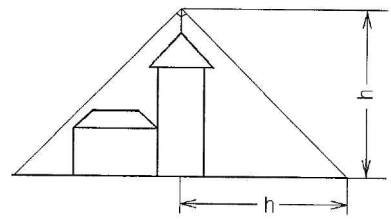


Fig. 8.21

Se utilizan actualmente pararrayos piezoeléctricos. La cabeza de captación, por medio de un dispositivo piezoeléctrico refuerza el campo eléctrico de la punta y entonces la altura del cono de protección se multiplica de 3 a 5 veces por la altura geométrica de la cabeza de captación.

Para la protección de edificios con superficie en planta grande respecto a la altura se pueden instalar varios pararrayos unidos entre sí y con cables conductores independientes, logrando así mediante una superposición de volúmenes la protección de todo el edificio

Según la Norma Tecnológica de la Edificación (NTE IPP) será necesario la instalación de pararrayos en edificios cuya altura sobrepase los 43 m y en edificios en los que se manipulen sustancias tóxicas, radiactivas, explosivas o fácilmente inflamables. También se instala en edificios cuyo índice de riesgo sobrepase el valor de 27 unidades (el índice de riesgo es función de la zona geográfica, de la estructura del edificio y de las condiciones topográficas del terreno). El Código Técnico de la Edificación (CTE) indica las características de la instalación de protección frente al rayo y el tipo de instalación a elegir.

8.23. PUESTA A TIERRA EN EDIFICIOS

La instalación de puesta a tierra de los edificios consta de los siguientes elementos (fig. 8.22):

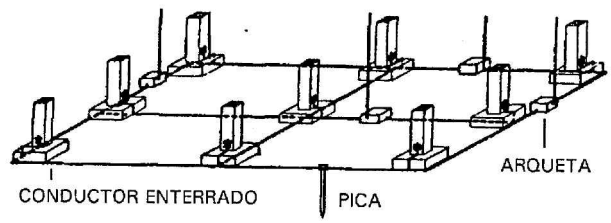


Fig. 8.22

- Un electrodo en anillo de conducción enterrada, que siguiendo el perímetro del edificio conectará todas las puestas a tierra del mismo. Situado en zanja a una profundidad mínima de 80 cm.
- Un conjunto de picas de puesta a tierra, según el terreno y la longitud de la conducción enterrada. Separadas una distancia mínima de 4 m.
- Puntos de puesta a tierra, situados en arquetas, para conexión de las líneas principales de tierra.
- Pletina de puesta a tierra, para conexión de los elementos que se ponen a tierra.

© Ediciones Paraninfo

Se deben conectar a tierra (según Norma Tecnológica de la Edificación NTE-IEP) las instalaciones siguientes:

- Las instalaciones de pararrayos.
- Las instalaciones de antenas colectivas de TV y FM.
- Las tomas de corriente y masas metálicas de aseos y baños.
- Las instalaciones de fontanería, gas, calefacción, depósitos, caldera, guías de aparatos elevadores y, en general, todo elemento metálico importante.
- Las estructuras metálicas y armaduras de muros y soportes de hormigón.

8.24. CONDUCTORES DE PUESTA A TIERRA

Las partes de una puesta a tierra se estudian en el apartado 5.16. Los conductores que enlazan con la toma de tierra son:

1) *Conductores de protección.* La sección mínima de los conductores de protección está fijada en función de la sección de los conductores de fase (ITC-BT-19)

Tabla 8.10. Relación entre la sección de los conductores de protección y los de fase

Secciones de los conductores de fase o polares de la instalación (mm^2)	Secciones mínimas de conductores de protección (mm^2)
$s \leq 16$	s (*)
$16 < s \leq 35$	16
$s > 35$	s/2
(*) Con un mínimo de: - 2,5 mm^2 si los conductores de protección no forman parte de la canalización de alimentación y tienen una protección mecánica. - 4 mm^2 si los conductores de protección no forman parte de la canalización y no tienen una protección mecánica.	
Los valores de la tabla se refieren a conductores de protección del mismo material que los de fase.	

2) *Conductor de equipotencialidad.* La sección del conductor de equipotencialidad principal no será inferior a la mitad del mayor conductor de protección con un mínimo de 2,5 mm^2 si es de cobre. Para equipotencialidad secundaria, sección mínima igual a la mitad del conductor de protección unido a la misma masa.
3) *Conductor de tierra.* Según la instrucción ITC-BT-18, la sección mínima de cobre, no protegido contra la corrosión es de 25 mm^2. Sobre este conductor se instalará un dispositivo desmontable para medir la resistencia de toma de tierra.

Los conductores de puesta a tierra forman una línea eléctricamente continua, sin otros elementos en serie ni seccionamientos.

8.25. NÚMERO DE PICAS NECESARIAS PARA LA INSTALACIÓN DE PUESTA A TIERRA EN UN EDIFICIO

El número de picas necesarias en la instalación de puesta a tierra de un edificio, se calcula según la longitud L (m) en planta del anillo de la conducción enterrada, la naturaleza del terreno y la existencia de instalación de pararrayos y de instalaciones comunes de telecomunicación. El valor máximo de resistencia de la toma de tierra en un edificio será de 10 Ω, según el Reglamento de Instalaciones Comunes de Telecomunicación (ICT), Ap. 7.1 Tierra local.

© Ediciones Paraninfo

El valor aproximado de la resistencia de puesta a tierra del edificio se calcula según la resistividad del terreno, la longitud de la conducción enterrada y el número de picas conectadas al anillo y separadas unas dos veces su longitud. Se utilizan las fórmulas para estimar la resistencia de tierra en función de la resistividad del terreno y las características de los electrodos según la instrucción ITC-BT-18 (parágrafo 5.18 del libro).

- *Valor de la resistencia del conductor enterrado horizontalmente.* Según la resistividad del terreno ρ_t (Ωm), la longitud L_c (m) del conductor enterrado, la resistencia R_c (Ω) es:

$$R_c = \frac{2\rho_t}{L_c}$$

- *Valor de la resistencia de la pica clavada verticalmente.* La resistencia R_p, siendo L_p (m) la longitud de la pica enterrada es:

$$R_p = \frac{\rho_t}{L_p}$$

- *Valor de la resistencia del total de las picas.* La resistencia R_{Tp}, siendo n el número de picas, consideradas en paralelo es:

$$R_{Tp} = \frac{R_p}{n}$$

- *Valor total de la resistencia de toma de tierra.* La resistencia R_T, se calcula aproximadamente considerando en paralelo las picas con el conductor enterrado:

$$R_T = \frac{R_c \cdot R_{Tp}}{R_c + R_{Tp}}$$

La instalación de la toma de tierra, debe medirse después de realizada para comprobar la verdadera resistencia conseguida.

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

8.25-1 Calcular el valor aproximado de la resistencia de la toma de tierra de un edificio con una longitud de conductor enterrado en anillo, de 150 m, resistividad del terreno calizo 700 Ωm y 10 picas de longitud 2 m conectadas al conductor en anillo.

La resistencia de contacto con tierra del conductor en anillo:

$$R_c = \frac{2\rho_t}{L_c} = \frac{2 \cdot 700}{150} = 9{,}33\ \Omega$$

La resistencia de contacto con tierra de cada pica: $R_p = \frac{\rho_t}{L_p} = \frac{700}{2} = 350\ \Omega$

La resistencia total de las picas: $R_{Tp} = \frac{R_p}{n} = \frac{350}{10} = 35\ \Omega$

La resistencia total de la toma de tierra: $R_T = \frac{R_c \cdot R_{Tp}}{R_c + R_{Tp}} = \frac{9{,}33 \cdot 35}{9{,}33 + 35} = 7{,}37\ \Omega$

8.25-2 Para la puesta a tierra de la estructura de un edificio, que va provisto de pararrayos, situado sobre terreno de arena arcillosa, de resistividad 400 Ωm se dispone

© Ediciones Paraninfo

de un cable de tierra de cobre desnudo de sección 35 mm^2, formando anillo con longitud en planta de 64 m, enterrado en zanja a una profundidad de 80 cm, soldado a las armaduras, a la estructura metálica y entre sí por soldadura aluminotérmica. Calcular el número de picas necesarias, de longitud 4 m, para una resistencia de tierra de 8 Ω.

La resistencia de tierra del conductor en anillo: $R_c = \frac{2\rho_t}{L_c} = \frac{2 \cdot 400}{64} = 12{,}5\ \Omega$

La resistencia de las picas: $\frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_c} + \frac{1}{R_{Tp}}$; $R_{Tp} = \frac{1}{\frac{1}{R_T} - \frac{1}{R_c}} = \frac{1}{\frac{1}{8} - \frac{1}{12{,}5}} = 22{,}22\ \Omega$

El número de picas: $n = \frac{R_p}{R_{Tp}} = \frac{\frac{400}{4}}{22{,}22} = 4{,}5$

Son necesarias 5 picas

8.25-3 Calcular la mínima longitud que debe tener el cable de tierra de un edificio construido en un terreno arcilloso de resistividad 400 Ωm, para obtener una resitencia de toma de tierra de 8 Ω en los siguientes casos:

a) Sin utilizar picas.
b) Utilizando una pica de longitud 2 m.
c) Utilizando 4 picas de longitud 2 m.

Solución: a) 100 m; b) 96 m; c) 84 m.

8.26. NÚMERO DE PICAS NECESARIAS PARA LA INSTALACIÓN DE PUESTA A TIERRA PROVISIONAL

El número de picas necesarias en la instalación de puesta a tierra provisional, en función de la naturaleza del terreno se calcula según la tabla de la Norma Tecnológica de la Edificación NTE IEP.

Tabla 8.11

Tipo de terreno.	Orgánicos, arcillas y margas.	Arenas arcillosas y graveras, rocas sedimentarias y metamórficas.	Calizas agrietadas y rocas eruptivas.	Grava y arena silícea
N° de picas.	2	3	6	12

8.27. PROCESO A SEGUIR EN LA INSTALACIÓN DE ELECTRODOS

■ Conductores enterrados horizontalmente

- Realizar la excavación de la zanja con una profundidad mínima de 80 cm (según la Norma Tecnológica de la Edificación).
- Colocar el conductor en la zanja y recubrirlo de tierra o directamente de hormigón.
- Construir las arquetas de conexión y realizar la conexión de los conductores y las líneas de enlace con tierra.

La arqueta de conexión, enterrada a una profundidad entre 50 y 80 cm, está constituida (según la Norma Tecnológica de la Edificación NTE IEP) por paredes de ladrillo enfoscado, solera y losa de hormigón, con dimensiones interiores en planta de 36x50 cm y altura 25 cm. El punto de puesta a tierra es una barra de cobre recubierta de cadmio.

© Ediciones Paraninfo

■ **Pica clavada verticalmente**

- Realizar un hoyo con una profundidad de unos 80 cm para la arqueta de conexión o pozo de inspección.
- Preparar la pica, colocando la punta de penetración y la cabeza protectora o sufridera.
- Clavar el primer tramo de la pica. Un operario mantiene la pica vertical mientras otro golpea con una maza la cabeza protectora.
- Para clavar otro tramo de la pica se quita la sufridera y se atornilla el segundo tramo, colocando otra vez la cabeza protectora y repitiendo el proceso (a partir de la segunda pica se suele utilizar maquinaria para el clavado).

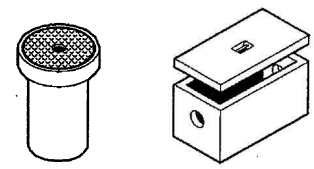


Fig. 8.23 Arquetas de registro prefabricadas. (Cortesía KLK).

- Medir la resistencia de tierra cada vez que se introduce un nuevo tramo de la pica.
- Soldar el collar de conexión.
- Realizar el pozo de inspección o arqueta, que pueden ser de materiales prefabricados (fig. 8.23).
- Conectar el conductor de tierra con la pica.

■ **Placa enterrada verticalmente**

- Realizar un hoyo de tal manera que se entierre la placa verticalmente, quedando su parte superior como mínimo a 50 cm de profundidad.
- Colocar la placa enterrada, rellenando el hoyo con tierra arcillosa y regar el terreno.
- Construir el pozo de inspección, colocando un tubo de gres o fibrocemento para pasar por su interior el cable de unión de la placa a la línea de enlace con tierra.
- Conectar la placa a la línea de enlace con tierra.

8.28. CONTROL DE LA REALIZACIÓN DE LA INSTALACIÓN DE PUESTA A TIERRA

Según la Norma Tecnológica de la Edificación NTE IEP, las normas de control de la ejecución de la instalación son:

a) *Conducción enterrada*:
- Inspección de la conexión con las estructuras metálicas y con las armaduras de muros y soportes de hormigón, que deben estar todos conectados.
- Inspección de la profundidad del cable conductor, que debe ser ajustada a lo especificado con una variación máxima de -10 cm.

b) *Arqueta de conexión*:
- Control de las dimensiones de una cada cinco arquetas, que deben tener variaciones inferiores a -2 cm.

c) *Pica de puesta a tierra*:
- Control de la separación entre picas, controlando una de cada 10. La distancia entre picas debe ser mayor de 4 m.

Se comprueba por el Director de Obra o Instalador Autorizado (ITC-BT-18).

© Ediciones Paraninfo

8.29. PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO DE LA INSTALACIÓN DE PUESTA A TIERRA

Según la Norma Tecnológica de la Edificación NTE IEP, las pruebas de servicio de la puesta a tierra son:

a) *Puesta a tierra en edificios*:

- Medida de la resistencia de puesta a tierra efectuada en cada arqueta de conexión en los puntos de puesta a tierra; que deberá ser como máximo 15Ω, cuando el edificio tiene instalación de pararrayos, y de 10Ω según el Reglamento de Instalaciónes Comunes de Telecomunicación (ICT).

b) *Puesta a tierra en obra*:

- Medida de resistencia de puesta a tierra para el conjunto de la instalación, que no debe ser mayor de 80Ω.

8.30. MANTENIMIENTO DE LAS PUESTAS A TIERRA

Según la Norma Tecnológica de la Edificación NTE IEP, las normas de mantenimiento son:

a) *Puesta a tierra permanente*:

- Comprobación anual, con terreno seco, en la arqueta de conexión a tierra de la continuidad eléctrica en los puntos de puesta a tierra. Si el edificio tiene instalación de pararrayos la comprobación se realizará después de cada descarga eléctrica. Debe ser comprobada anualmente, cuando el terreno esté más seco. En terreno desfavorable para la conservación de electrodos, estos se descubrirán y examinarán al menos una vez cada 5 años (ITC-BT-18)

b) *Puesta a tierra provisional en obra*:

- Inspección visual del estado de la instalación, cada tres días.

8.31. PUESTA EN SERVICIO E INSPECCIÓN DE LAS INSTALACIONES ELÉCTRICAS DE B.T.

■ **Verificación de las instalaciones**

- Verificación antes de la puesta en servicio de la instalación (ITC-BT-05). La ejecuta la empresa que realiza la instalación, según norma UNE-EN 20460, mediante examen visual y ensayos.

  Examen visual de la instalación, sin tensión:

  - Verificación del material eléctrico:

  Conforme con las prescripciones de seguridad.
  Elegido e instalado correctamente.
  No presenta daño visible que pueda afectar a la seguridad.

  - Verificación de las condiciones de la instalación:

  Existencia de medidas de protección contra choques eléctricos.
  Existencia de barreras cortafuegos y protecciones contra efectos térmicos.
  Utilización correcta de cables según la intensidad admisible y caída de tensión.
  Existencia, calibrado y correcta instalación de los dispositivos de protección, seccionamiento mando y señalización.
  Identificación de conductores, circuitos, fusibles, interruptores, bornes, etc. y correcta ejecución de las conexiones.

© Ediciones Paraninfo

Accesibilidad para comodidad de funcionamiento y mantenimiento, con disponibilidad de esquemas, advertencias e informaciones.

Ensayos:

Continuidad de los conductores de protección y de las uniones equipotenciales.

Resistencia de aislamiento de la instalación.

Protección por separación de circuitos en muy bajas tensiones (MBTS y MBTP).

Corte automático de la alimentación.

Ensayos de funcionamiento.

Verificación de caída de tensión.

■ **Inspección de las instalaciones**

La inspección de las instalaciones de especial relevancia la realiza un Organismo de Control (ITC-BT-05). Las inspecciones puede ser:

1) Iniciales, antes de su puesta en servicio y tramitación: Instalaciones industriales con proyecto y potencia superior a 100 kW; locales de pública concurrencia, locales con riesgo de incendio y explosión clase I, excepto garajes de menos de 25 plazas; locales mojados con potencia instalada superior a 25 kW; piscinas con potencia instalada superior a 10 kW; quirófanos y salas de intervención; alumbrado exterior con potencia instalada superior a 5 kW.

2) Periódicas. Cada 5 años todas las instalaciones con inspección inicial y cada 10 años las instalaciones comunes de edificios de viviendas de potencia total instalada superior a 100 kW.

En la inspección se analizan los defectos que presente la instalación, según los criterios de la instrucción ITC-BT-05:

- Defecto muy grave: que presenta un peligro inmediato para la seguridad de las personas o de las cosas.
- Defecto grave: que no supone un peligro inmediato para las personas o las cosas, pero si puede serlo al originarse un fallo en la instalación.
- Defecto leve: que no supone peligro para las personas o las cosas, no perturba el funcionamiento de la instalación y la desviación observada no tiene valor significativo para su uso o funcionamiento.

Como resultado de la inspección se emite un Certificado en el que la instalación será calificada:

- Favorable. Cuando no tiene ningún defecto muy grave o grave.
- Condicionada. Cuando la instalación tiene algún defecto grave o defecto leve procedente de otra inspección anterior que no se haya corregido. La instalación nueva no puede conectarse mientras no se corrija el defecto y en las instalaciones en funcionamiento se fija un plazo máximo de 6 meses para su corrección.
- Negativa. Cuando la instalación tiene algún defecto muy grave. La instalación nueva no puede entrar en servicio y a la instalación en funcionamiento se les emitirá Certificado negativo que se remite al Órgano Competente de la Comunidad Autónoma.

© Ediciones Paraninfo

PROBLEMAS DE RECAPITULACIÓN

P.8-1 Un edificio de 6 plantas, dos viviendas por planta de 96 m^2 cada una, tiene un motor de ascensor de 7,5 CV, 400/230 V, 11,3/19,6 A, 50 Hz, cos φ =0,83. Para alumbrado de locales comunes se considera una potencia de 3 kW. En el bajo tiene un local comercial de 80 m^2 y un garaje con una potencia a instalar de 4 kW. Calcular:

a) Previsión de cargas del edificio.
b) Línea general de alimentación trifásica con neutro para contadores concentrados; formada por conductores de cobre, unipolares, aislados con XLPE (RZ1 0,6/1 kV), en instalación bajo tubo. Longitud 20 m. Factor de potencia 0,9.
c) Derivación individual monofásica al garaje, considerando una caída de tensión del 1%. Longitud 30 m.
d) Derivación individual monofásica a un vivienda. Longitud 15 m.

Los conductores de las derivaciones individuales serán de cobre, unipolares, aislados con poliolefina termoplástica para 750 V, en canalización empotrada en obra bajo tubo.

La tensión de servicio es trifásica con neutro, 400/230 V, 50 Hz y las caídas de tensión serán las máximas permitidas por el REBT

Solución: a) 80 372 W; b) 50 mm^2; c) 10 mm^2; d) 6 mm^2.

P.8-2 Un local comercial, situado en la planta baja de un edificio, tiene los siguientes receptores:

Alumbrado:
Seis pantallas de 2 tubos fluorescentes de 58 W, 230 V.
Veinte lámparas fluorescentes de 36 W, 230 V.
Fuerza:
Un motor de 2 CV, 400/230 V, 3,6/6,3 A, 50 Hz, cosφ=0,81.
Un motor de 3 CV,400/220 V, 5/8,7 A, 50 Hz, cosφ=0,82.
La tensión de servicio es trifásica con neutro, 400/230 V, 50 Hz.
Calcular:

a) Previsión de cargas del local.
b) Sección mínima de la derivación individual desde el cuadro de contadores al cuadro general del local, trifásica con neutro. Longitud 10 m. Los conductores son de cobre, unipolares, aislados con poliolefina termoplástica, tipo H07Z1, en instalación empotrada en obra bajo tubo y la caída de tensión considerada en la derivación es el 1%.

Solución: a) 8 119,8 W; b) 6 mm^2.

P.8-3 En un taller se instalan los siguientes receptores:

Fuerza:
Un motor de 7,5 CV, 400/230 V, 12/20,7 A, 50 Hz, cosφ=0,83
Dos motores de 3 CV, 400/230 V, 5/8,7 A, 50 Hz, cosφ=0,82.
Tres líneas de tomas de corriente de 16 A, trifásicas con neutro y conductor de protección, considerando una potencia de 1 kW en cada línea.
Alumbrado:
Ocho luminarias con una lámpara de vapor de mercurio de 125 W, 230 V, cada una.
Seis tubos fluorescentes 58 W, 230 V.

© Ediciones Paraninfo

La tensión de servicio es trifásica con neutro, 400/230 V, 50 Hz.

La línea de alimentación estará formada por conductores de cobre, unipolares, aislados con XLPE (RZ1 0,6/1 KV), en canalización empotrada en obra bajo tubo.

Las derivaciones estarán formadas por conductores de cobre, unipolares, aislados con PVC para 750 V, en canalización bajo tubo en montaje superficial.

Calcular:

a) La previsión de carga del taller.
b) Sección de la línea de alimentación, trifásica con neutro, de la caja general de protección al cuadro general. Longitud 30 m. Caída de tensión considerada 0,5%.
c) Sección de la derivación al cuadro de control de motores, trifásica con neutro. Longitud 30 m. Caída de tensión considerada 1%.
d) Sección mínima de la derivación trifásica al cuadro de control del alumbrado general, con lámparas de vapor de mercurio. Longitud 25 m. Caída de tensión considerada 1%.

Solución: a) 19 733 W; b) 16 mm^2; c) 6 mm^2; d) 1,5 mm^2.

P.8-4 Para la alimentación de una nave industrial se proyecta un centro de transformación intemperie y la línea de enlace aérea a 20 kV para conexión con la red de media tensión. La instalación del centro de transformación se realiza sobre apoyo HV-1000-R11, con cadenas de amarre y conductor LA 30.

Sobre el poste se sitúan: las autoválvulas 24 kV/10 kA con desconexión a tierra; transformador de 50 kVA, 20/0,4 kV, $u_{cc}=4\%$, en baño de aceite; conductores de conexión del transformador al cuadro de B.T., tipo RV 0,6/1 kV $3\times95+1\times50$, de cobre; cuadro de B.T. con interruptor tetrapolar de 160 A; línea de puesta a tierra de las masas y autoválvulas, con conductor de cobre sin aislamiento de sección 50 mm^2, y línea de puesta a tierra del neutro, con conductor RV 0,6/1 kV, de sección 50 mm^2 de cobre.

Calcular:

a) Intensidades nominales en primario y secundario del transformador.
b) Intensidad de cortocircuito máxima en la línea de M.T. si la potencia de cortocircuito en el punto de entronque es de 350 MVA.
c) Intensidad de cortocircuito en el secundario del transformador considerando la red de alimentación de potencia infinita.
d) Caída de tensión en la línea de entronque con la línea de M.T. para la intensidad nominal, con factor de potencia 0,8. Longitud de la línea 400 m, resistencia del conductor 1,0749 Ω/km, y separación entre los conductores 1,6-1,6-3,2 m, lo que origina una reactancia de 0,4178 Ω/km.
e) Presupuesto de los materiales de la instalación utilizando catálogos de casas comerciales.

Solución: a) 1,44 A, 72,2 A; b) 10,1 kA; c) 1,8 kA; d) 1,11 V

P.8-5 Para la puesta a tierra de la estructura de un edificio, que va provisto de pararrayos, situado sobre terreno de arena arcillosa de resistividad 500 Ωm, se dispone de un cable de tierra de cobre desnudo de sección 35 mm^2, formando anillo con longitud en planta de 45m, enterrado en zanja a una profundidad de 80 cm, soldado a las armaduras, a la estructura metálica y entre sí por soldadura aluminotérmica. Calcular el número de picas, de longitud 2 m, necesarias para obtener una resistencia de tierra de 10 Ω.

Solución: 14.

© Ediciones Paraninfo

9

ILUMINACIÓN

9.1. LUZ

La luz es la energía radiante, en forma de ondas electromagnéticas que estimula el sentido de la vista.

La velocidad de desplazamiento de la luz c es constante en cada medio (300 000 km/s en el vacío) y como todo movimiento ondulatorio se caracteriza por una longitud de onda λ (distancia entre dos ondas consecutivas) y por la frecuencia de vibración f

$$c = \lambda \cdot f$$

La longitud de onda de las radiaciones electromagnéticas visibles para el ojo humano, que se suele medir en nanometros (nm) ($1\,nm = 10^{-9}$ m), comprende los colores del espectro de radiación visible (fig. 9.1), desde los 380 nm (violeta) a los 760 nm (rojo), siendo la mayor sensibilidad para el amarillo verdoso a 555 nm. Las ondas más largas que el rojo se llaman infrarrojas y las ondas más cortas que el violeta se llaman ultravioletas.

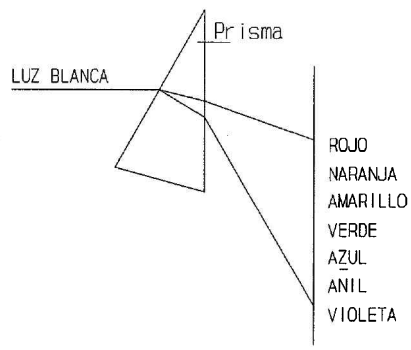


Fig. 9.1

La luz se propaga en línea recta.

El ojo actúa como una cámara fotográfica (fig. 9.2), formando en la retina una imagen invertida. El nervio óptico conduce las impresiones luminosas al cerebro, donde se percibe la imagen derecha.

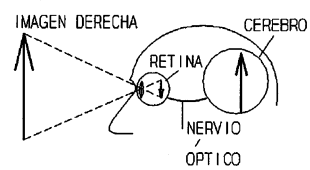


Fig. 9.2

9.2. FUENTES DE LUZ ELÉCTRICA

Son, principalmente, las lámparas de incandescencia y las lámparas o tubos de descarga.

- *Lámparas de incandescencia.* Emitan luz por termorradiación como consecuencia del paso de la corriente eléctrica por un filamento conductor. Son de dos tipos: lámparas incandescentes convencionales e incandescentes halógenas.
- *Lámparas de descarga.* La emisión de luz es el resultado de la descarga eléctrica a través de gases o vapores metálicos. Son de varios tipos: lámparas fluorescentes, de vapor de mercurio a alta presión, de luz mezcla, de halogenuros metálicos, y de vapor de sodio a baja presión o a alta presión.

© Ediciones Paraninfo

- *Lámparas de inducción.* La emisión de luz es el resultado de la excitación de átomos de vapores metálicos por inducción electromagnética de alta frecuencia.

9.3. MAGNITUDES LUMINOSAS Y UNIDADES

Flujo luminoso Φ: Energía luminosa emitida por unidad de tiempo. Su unidad es el **lumen** (lm).

El valor del flujo luminoso de una lámpara viene dado por el fabricante. Su rendimiento luminoso o eficacia es la relación entre el flujo que emite y la potencia que consume.

Intensidad luminosa I: Es el flujo luminoso emitido en una dirección dada por unidad de ángulo sólido (estereorradián). Su unidad es la **candela** (cd); unidad patrón del sistema internacional de unidades. Se define como la intensidad luminosa, en una dirección dada, de una fuente de luz que emite una radiación monocromática de frecuencia $540 \cdot 10^{12}$ Hz, y cuya intensidad energética en dicha dirección es 1/683 vatios por estereorradián.

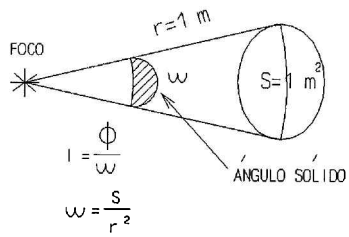


Fig. 9.3

El lumen es el flujo luminoso emitido por un foco puntual de una candela de intensidad sobre una porción de superficie esférica de 1 m^2 a la distancia de 1 m (fig. 9.3), que corresponde a un ángulo sólido de un estereorradián.

Iluminación o *iluminancia E*: Es el flujo luminoso recibido por unidad de superficie.

$$E = \frac{\Phi}{S}$$

Se mide en **lux** (lx) con un aparato llamado luxómetro, que consiste en una célula fotoeléctrica que al ser iluminada genera una corriente eléctrica, medida por un miliamperímetro graduado en lux. El lux es la iluminación de una superficie de 1 m^2 que recibe el flujo luminoso de un lumen.

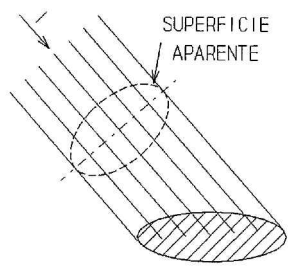


Fig. 9.4

$$1\,\text{lux} = \frac{1\,\text{lm}}{1\,\text{m}^2}$$

Luminancia o *brillo L*: Es la intensidad luminosa en una dirección dada por unidad de superficie aparente luminosa o iluminada (fig. 9.4). Se mide en **nit** (nt), aunque se utiliza también la cd/cm^2. El nit es la luminancia de una superficie aparente de 1 m^2 en una dirección en que la intensidad luminosa es una candela.

$$1\,\text{nt} = \frac{1\,\text{cd}}{1\,\text{m}^2}$$

© Ediciones Paraninfo

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

9.3-1 Una local de dimensiones 4×6 m recibe un flujo luminoso de 7 200 lm. Calcular la iluminación media sobre esa superficie.

La superficie $S = 6 \cdot 4 = 24\ m^2$

La iluminación $E = \dfrac{\Phi}{S} = \dfrac{7\,200}{24} = 300$ lx

9.3-2 Calcular el flujo luminoso que recibe una superficie de $40\ m^2$ si la iluminación sobre ella es en cualquier punto de la misma 200 lx.

Solución: 8 000 lm

9.3-3 Calcular el flujo luminoso total en un local de oficinas de 8 m de largo por 5 m de ancho para que la iluminación media sobre las mesas de trabajo sea de 450 lx.

Solución: 18 000 lm.

9.3-4 Una lámpara de eficacia 40 lm/W está suspendida sobre el centro de una superficie cuadrada de 4×4 m. Calcular:

a) Flujo necesario para obtener sobre la superficie una iluminación media de 500 lux.

b) Potencia aproximada de la lámpara.

Solución: a) 8 000 lm; b) 200 W.

9.4. CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES DE LAS LÁMPARAS

■ Vida o duración de la lámpara

- Vida media. Se mide la vida media de una lámpara mediante ensayos de duración de conjuntos de lámparas. Es el tiempo en horas de funcionamiento hasta que se ha producido el 50% de fallos en el conjunto.
- Vida útil. Es el número de horas de funcionamiento hasta que el flujo emitido por la lámpara se ha reducido al 80% de su valor inicial.

■ Propiedades de color

- *Temperatura de color*. La apariencia de color de la fuente de luz está relacionada con la temperatura. Los cuerpos calentados a temperatura suficiente emiten luz rojiza, y aumentando su temperatura emiten luz que se va haciendo más blanca.

  La relación entre apariencia de color y temperatura de la fuente de luz se indica en la siguiente tabla:

Tabla 9.1

APARIENCIA DE COLOR	TEMPERATURA K (grados Kelvin)
Cálida	< 3 300
Intermedia	3 300 - 5 000
Fría	> 5 000

© Ediciones Paraninfo

No es conveniente la utilización simultánea de fuentes de luz con temperatura de color diferentes, por la adaptación del ojo a los colores.
El aumento del nivel de iluminación debe implicar también el aumento de la temperatura del color.

- *Reproducción cromática.* La reproducción de los colores de los objetos iluminados por una fuente de luz viene indicada por el rendimiento de color o índice de reproducción cromática (IRC). Por convenio el IRC varía entre 0 y 100 y es una indicación de la reproducción global de los colores de una muestra.
  Los índices de reproducción cromática mínimos de las fuentes de luz según C.I.E. (Comisión Internacional de Alumbrado), expresados en grupos, se indican en la siguiente tabla:

Tabla 9.2

GRUPO DE REPRODUCCIÓN CROMÁTICA	VALORES EXTREMOS DEL IRC
1	≥85
2	70 - 85
3	≤70

9.5. LÁMPARAS DE INCANDESCENCIA CONVENCIONALES

■ Producción de luz

La emisión de luz es el resultado de la alta temperatura adquirida por un filamento de volframio arrollado en hélice, en una atmósfera de gas inerte o de vacío (fig. 9.5), al pasar por dicho filamento corriente eléctrica. La eficacia de esta lámpara es pequeña (10-20 lm/W) porque gran parte de la energía que absorbe se transforma en calor. Se emplea para iluminación de interiores en locales de techos bajos (menos de 4 m).

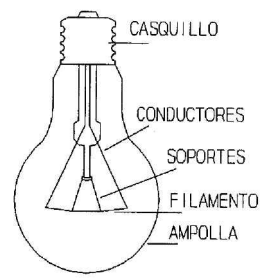


Fig. 9.5

Las ampollas y los filamentos se fabrican de formas diversas.

Los casquillos metálicos, que sujetan la lámpara al portalámparas, son de varios tipos: rosca Edison (E), bayoneta (B) y de espigas o clavijas (G).

■ Encendido

No necesitan aparato de encendido. Funcionan a cualquier tensión, dando el flujo luminoso nominal a la tensión nominal.

■ Duración

La vida media por rotura de filamento es de 1 000 horas.

■ Propiedades del color

- Temperatura del color de unos 2 700 K.
- Índice de reproducción cromática (IRC): 100.

© Ediciones Paraninfo

9.6. LÁMPARAS DE INCANDESCENCIA HALÓGENAS

■ **Producción de luz**

La emisión de luz es igual que en las incandescentes, pero llevan añadido en el interior de la ampolla un elemento halógeno, que suele ser yodo. Este halógeno se combina con el volframio vaporizado del filamento, conseguiéndose una mayor limpieza dentro de la ampolla y una mayor duración de la lámpara.

■ **Encendido**

Igual que las incandescentes convencionales no necesita aparato de encendido. Las lámparas halógenas de poca potencia, utilizadas en alumbrado de interiores, necesitan un reductor de tensión porque suelen trabajar a tensiones más bajas que la de la red.

■ **Duración**

Vida media de 2 000 a 3 000 horas con tensiones bajas.

■ **Propiedades del color**

- Temperatura de color de 3 000 a 3 200 K.
- Índice de reproducción cromática: 100.

9.7. LÁMPARAS O TUBOS FLUORESCENTES

■ **Producción de luz**

La emisión de luz es la consecuencia de la descarga eléctrica a través de vapor de mercurio a baja presión (de 1 a 5 N/m^2), que da origen a rayos ultravioleta (longitud de onda 253 nm) transformados en luz visible por medio de polvos fluorescentes situados en la pared interior del tubo. La eficacia es del orden de 100 lm/W.

■ **Encendido**

El encendido es distinto según el tipo de lámparas fluorescentes.

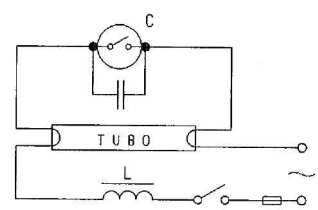


Fig. 9.6

En las *lámparas de baja tensión con encendido diferido* (fig. 9.6), el encendido se produce por una sobretensión instantánea al efectuar el cebador C (lámina bimetálica en atmósfera de neón) el corte del circuito en el que hay la reactancia o balasto L, que sirve también para estabilizar la corriente.

El encendido de la lámpara se produce de la forma siguiente:

a) Al cerrar el interruptor se produce una descarga en el cebador, que tiene los contactos abiertos. Esta descarga calienta la lámina bimetálica, que se deforma cerrando el circuito.

b) Por el circuito cerrado circula una intensidad que calienta los filamentos del tubo, hasta que enfría la lámina del cebador, que recupera su forma inicial, abriendo el circuito. Esta apertura brusca del circuito provoca una sobretensión, debida a la reactancia, que hace encender el tubo.

© Ediciones Paraninfo

c) Después del encendido, la tensión entre los filamentos del tubo disminuye, debido a la caída de tensión en la reactancia.

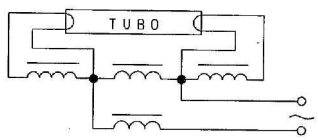


Fig. 9.7

En las *lámparas de encendido instantáneo*, el encendido se produce en el momento de la conexión debido a reactancias especiales (fig. 9.7), que originan la sobretensión y la estabilización de la corriente una vez iniciada la descarga.

Se fabrican *lámparas de encendido electrónico*, con regulación electrónica de la tensión e intensidad en el arranque, conseguiéndose así una menor intensidad de encendido.

Se emplean lámparas en conexión "dúo" (fig. 9.8), para evitar el efecto estroboscópico (oscilación de la emisión luminosa debida a la corriente alterna). Se utiliza en corriente alterna monofásica el montaje en paralelo de dos tubos, conectando uno de ellos por medio de un condensador. En corriente alterna trifásica se corrige este efecto conectando los tubos a distintas fases.

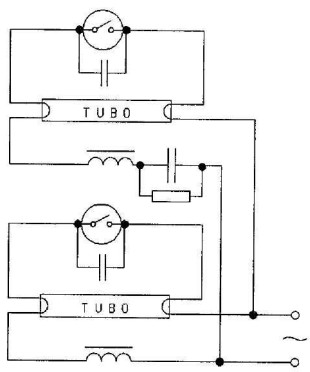


Fig. 9.8

En los tubos fluorescentes se corrige el factor de potencia, igual que en las lámparas de descarga luminosa, conectando un condensador en paralelo.

■ **Duración**

Vida útil de unas 7 500 horas, con un flujo del 80% del inicial después de ese tiempo.

■ **Propiedades del color**

Se fabrican tubos fluorescentes según apariencias de color. Los más usuales se designan según la siguiente tabla:

Tabla 9.3

DESIGNACIÓN	TEMPERATURA DE COLOR K
BLANCO CÁLIDO	2 700 - 3 000
BLANCO	4 000 - 5 000
LUZ DÍA	5 300 - 6 500

El índice de reproducción cromática, se expresa con tres valores dentro de cada apariencia de color, que se designan según la siguiente tabla:

Tabla 9.4

DESIGNACIÓN IRC	IRC
NORMAL	50 - 60
DE LUJO	87 - 92
ESPECIAL DE LUJO	93 - 95

© Ediciones Paraninfo

Estas clasificaciones dan lugar a nueve posibles tipos de tubos fluorescentes.

Se fabrican también *lámparas fluorescentes compactas*, con tubo curvado en forma de U, que son básicamente de dos tipos:

- Lámparas compactas, con balasto y cebador incorporados, y casquillo de rosca tipo Edison (E) para poder sustituir a las lámparas de incandescencia.
- Lámparas compactas, sin reactancia incorporada, tamaño miniaturizado y casquillo en forma de espigas (G).

9.8. LÁMPARAS DE VAPOR DE MERCURIO ALTA PRESIÓN

■ Producción de luz

Emiten luz por luminiscencia al producirse la descarga eléctrica en un tubo de cuarzo con vapor de mercurio a alta presión (2-4 bar; 1 bar $=10^5$ Pa). La luz producida tiene un color azul verdoso, por lo que se corrige el color por medio de polvos fluorescentes colocados en la pared interior de la ampolla exterior de la lámpara, así se aprovecha la radiación ultravioleta. Esta lámpara es de color corregido y la luz es de color blanco azulado.

El espacio entre el tubo de descarga y la ampolla exterior, de vidrio y forma elipsoidal, está relleno de gas neutro (nitrógeno) a presión algo menor que la atmosférica, que evita la formación de arco entre las partes metálicas que conectan el tubo de descarga.

La eficacia de estas lámparas depende de su potencia, siendo su valor hasta 60 lm/W.

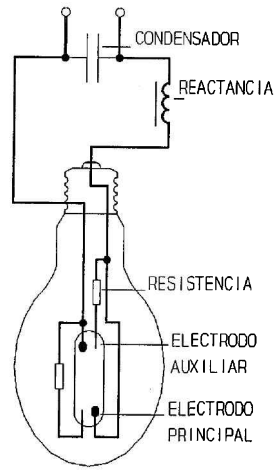


Fig. 9.9

■ Encendido

Estas lámparas no necesitan dispositivo de encendido. El tubo de cuarzo donde se produce la descarga contiene una pequeña cantidad de argón y mercurio. La tensión de la red, aplicada entre los electrodos principales y entre cada electrodo principal y auxiliar próximo (fig. 9.9), hace que se produzca una pequeña descarga entre éstos, ionizando el argón y elevando la temperatura del mercurio, que se vaporiza iniciándose la descarga entre los electrodos principales. El tiempo de encendido es de unos 5 minutos y, puesto que la resistencia de la lámpara disminuye al efectuarse la descarga, para limitar la intensidad es necesario el empleo de una bobina (reactancia o balasto) conectada en serie.

■ Duración

La vida útil de la lámpara, hasta un mantenimiento de flujo del 80% del inicial y períodos de encendido de 3 horas, es de unas 8 000 horas.

■ Propiedades del color

- Temperatura del color de 3 000 a 4 500 K.
- Índice de reproducción cromática (IRC) de 40 a 50.

© Ediciones Paraninfo

9.9. LÁMPARAS DE LUZ MEZCLA

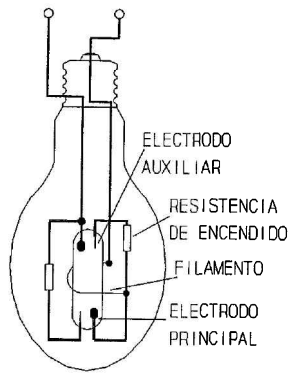


Fig. 9.10

■ Producción de luz

Igual que en las lámparas de vapor de mercurio, emiten luz por luminiscencia en tubo de descarga con vapor de mercurio a alta presión. Para corregir el color lleva alrededor del tubo de cuarzo un filamento conectado en serie (fig. 9.10), que emite luz, estabiliza la descarga y mejora el factor de potencia de la lámpara.

La eficacia de estas lámparas es del unos 30 lm/W.

■ Encendido

Se realiza igual que en la lámpara de vapor de mercurio. Una vez establecida la descarga, la resistencia del filamento limita la intensidad y no es necesaria reactancia. El tiempo de encendido es de unos 2 minutos.

■ Duración

La vida útil de la lámpara con períodos de encendidos de 3 horas es de unas 5 000 horas. Su duración está limitada por la fusión del filamento.

■ Propiedades del color

- Temperatura de color: 3 600 K.
- Índice de reproducción cromática: 60.

9.10. LÁMPARAS DE HALOGENUROS METÁLICOS

■ Producción de luz

La luz se produce en un tubo de cuarzo igual que en las lámparas de vapor de mercurio sin electrodo auxiliar de arranque. El recipiente contiene en su interior mercurio además de yoduros de sodio, talio, indio y otros elementos. Se consigue así que la emisión luminiscente tenga una buena reproducción cromática, sin usar polvos fluorescentes.

■ Encendido

El encendido, debido a los halogenuros metálicos, necesita tensiones de 1,5 a 5 kV, suministradas por un arrancador electrónico. El tiempo de arranque medio es de unos 5 minutos. La estabilización de la descarga se consigue, igual que en las lámparas de vapor de mercurio, con una reactancia conectada en serie.

■ Duración

Según el tipo de lámpara y la forma de aplicación, la vida útil puede ser de 2 000 a 6 000 horas.

■ Propiedades del color

La temperatura de color y el índice de reproducción cromática IRC depende mucho de los elementos metálicos que se utilicen en el tubo de descarga.

© Ediciones Paraninfo

Tabla 9.5

TEMPERATURA DE COLOR	IRC	EFICACIA
4 400 K	65	90 lm/W
3 000-4 800 K	80-85	80 lm/W
5 800-6 000 K	85	75 lm/W

9.11. LÁMPARAS DE VAPOR DE SODIO BAJA PRESIÓN

■ **Producción de luz**

La descarga luminiscente se produce en un tubo de vidrio especial en forma de U, que contiene gas neón y sodio (fig. 9.11). El tubo tiene pequeñas cavidades en las cuales se condensa el sodio; está rodeado por una ampolla exterior, de forma tubular, en el interior de la cual se ha hecho el vacío. La emisión de luz es en su mayoría con longitud de onda de 589 nm, que corresponde al color amarillo y muy próxima al máximo de sensibilidad del ojo humano. Su eficacia luminosa es del orden de 180 lm/W

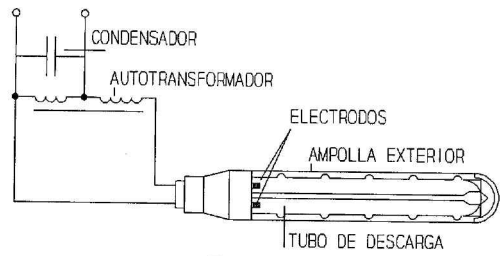


Fig. 9.11

■ **Encendido**

La lámpara necesita tensiones de encendido del orden de 400 a 600 V, que se consiguen con un autotransformador o un arrancador electrónico.

La descarga se inicia con el gas neón y con el calor generado se vaporiza el sodio, estableciéndose la descarga en éste. El tiempo medio de encendido es de unos 7 minutos.

La estabilización de la descarga se produce por la reactancia del autotransformador de gran de flujo de dispersión, o también por reactancia y arrancador electrónico.

■ **Duración**

La vida útil de la lámpara es del orden de 8 000 a 12 000 horas

■ **Propiedades del color**

La luz es prácticamente monocromática, por lo que no se tiene en cuenta la temperatura de color ni el índice de reproducción cromática, que se considera cero.

9.12. LÁMPARAS DE VAPOR DE SODIO ALTA PRESIÓN

■ **Producción de luz**

La descarga luminiscente se produce en un tubo de cerámica de aluminio transparente, muy resistente al calor (alcanza los 1 000 °C). En su interior contiene sodio, mercurio y un gas inerte (xenón). La ampolla exterior de vidrio puede ser de forma tubular (fig. 9.12) o elipsoidal. La luz producida es de un color blanco dorado y su eficacia luminosa es del orden de 120 lm/W.

© Ediciones Paraninfo

■ **Encendido**

La lámpara necesita una tensión de encendido de 2 a 5 kV (según la potencia de la lámpara), que se consigue con un arrancador electrónico. La descarga empieza con el xenón y el calor resultante vaporiza el sodio y se inicia paulatinamente la descarga principal. El tiempo medio de encendido es de 7 minutos.

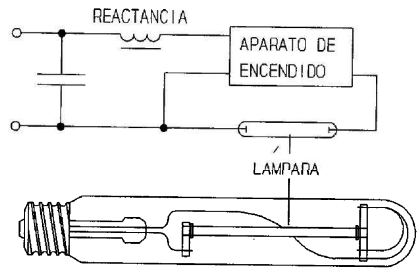


Fig. 9.12

La estabilización de la descarga se consigue con reactancia (balasto inductivo).

■ **Duración**

El valor de vida útil es del orden de 12 000 horas, pudiendo llegar a 20 000 horas según el modelo y la forma de utilización.

■ **Propiedades del color**

- Temperatura de color, de 2 000 a 2 200 K.
- Índice de reproducción cromática: 25.

9.13. LÁMPARAS DE INDUCCIÓN

• **Producción de luz**

La luz se produce en una ampolla de vidrio con vapor de mercurio a baja presión. Una bobina situada dentro de la ampolla y alimentada en alta frecuencia (2,65 MHz), provoca la excitación de los átomos de mercurio que emiten radiación ultravioleta, transformada en luz visible por medio de polvos fluorescentes que recubren la parte interna de la ampolla. La eficacia de esta lámpara es del orden de 70 lm/W.

■ **Encendido**

Necesita para encendido y funcionamiento un circuito electrónico de alta frecuencia.

■ **Duración**

Larga duración, con vida útil de unas 60 000 horas.

■ **Propiedades del color**

- Temperatura de color: 2 700-4 000 K.
- Índice de reproducción cromática: 80.

9.14. LUMINARIAS

Para modificar la distribución de luz de la lámpara se emplean luminarias o aparatos de alumbrado que concentran la luz (reflectores), la reparten (refractores) o atenúan el brillo de la lámpara (difusores). La luminaria contiene la lámpara o lámparas con su equipo auxiliar y los accesorios necesarios para su fijación y conexión.

© Ediciones Paraninfo

Los reflectores tienen una superficie brillante (habitualmente de aluminio anodizado) que reflejan la luz de la lámpara según la forma de la superficie reflectante.

Los refractores son globos o pantallas (habitualmente de vidrio) que dirigen la luz de la lámpara en las direcciones determinadas.

Los difusores son envolventes (de vidrio o plástico), láminas, rejillas, etc. Evitan el deslumbramiento y originan también una pérdida del flujo luminoso útil.

9.15. CLASES DE PROTECCIÓN ELÉCTRICA

Para protección de las personas contra contactos eléctricos, las luminarias se clasifican, de acuerdo con el grado de aislamiento, según la tabla siguiente:

Tabla 9.6

Protección	Definición	Símbolo
0	La protección contra los contactos eléctricos recae exclusivamente sobre el aislamiento principal; descansando la protección, en caso de fallos del aislamiento principal, sobre el medio circundante.	
I	La protección contra los contactos eléctricos recae exclusivamente sobre el aislamiento principal y un conductor de protección conectado a tierra (toma de tierra)	
II	La protección contra los contactos eléctricos no recae exclusivamente sobre el aislamiento principal, sino que comprende medidas suplementarias, tales como el doble aislamiento o el aislamiento reforzado. No llevan toma de tierra.	
III	La protección contra los contactos eléctricos, se realiza alimentando las luminarias a una muy baja tensión de seguridad (no superior a 50 V).	

Se utilizan también otros símbolos en las luminarias, como se indica en la tabla siguiente:

Tabla 9.7

Definición	Símbolo
Distancia mínima de seguridad, entre el proyector y la superficie a iluminar, expresada en m.	
Luminaria con equipo incorporado, para montaje directo en superficies normalmente inflamables.	
Lámparas con arrancador incorporado.	

9.16. ÍNDICES DE PROTECCIÓN DE LAS LUMINARIAS

Los grados de protección de las luminarias se refieren a sus cualidades mecánicas y se indican mediante las letras IP seguidas de dos cifras características, según la tabla 5.8, protección contra la penetración de cuerpos sólidos y protección contra la penetración de líquidos. La protección mecánica al choque se señala con las letras IK y un número, expresando la energía al choque que resiste, en Julios.

© Ediciones Paraninfo

9.17. LEYES FUNDAMENTALES DE LA LUMINOTECNIA

■ Ley de la inversa de los cuadrados

La iluminación E (lux) en un punto P que dista d (m) del foco, es directamente proporcional a la intensidad de iluminación I (cd) en la dirección del punto e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia:

Esto presupone:

- Que el foco de luz está lo suficientemente alejado para poder ser considerado como puntiforme (luz procedente de un punto)
- Que la superficie es perpendicular a la dirección del rayo luminoso.

En estas condiciones, el flujo luminoso contenido en un ángulo sólido se distribuye sobre una superficie que se hace mayor a medida que aumenta la distancia del foco (fig. 9.13).

$$E=\frac{I}{d^2}$$

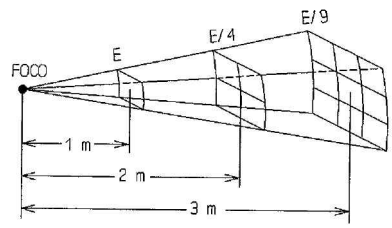


Fig. 9.13

■ Ley del coseno

Cuando la superficie no es perpendicular a la dirección de la intensidad de iluminación, formando el rayo incidente un ángulo α con la normal a dicha superficie (fig. 9.14), la iluminación en un punto:

$$E=\frac{I}{d^2}\cos\alpha$$

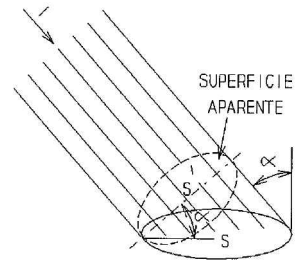


Fig. 9.14

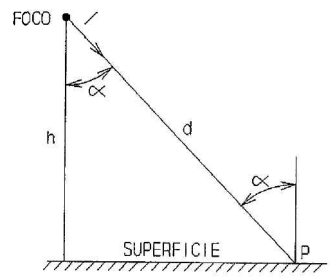


Fig. 9.15

En este caso la superficie interceptada por el haz de rayos luminosos es mayor que cuando la superficie es perpendicular al rayo, siendo menor la iluminación o densidad de flujo. La superficie interceptada es proporcional al coseno de α.

Cuando el foco está situado a una altura h sobre la superficie a iluminar (fig. 9.15), la iluminación E en un punto P situado sobre esa superficie, formando el rayo incidente un ángulo α con la normal, siendo I la intensidad de iluminación en esa dirección:

$$E=\frac{I}{h^2}\cos^3\alpha$$

© Ediciones Paraninfo

DEMOSTRACIÓN

Según la figura 9.15, la distancia del foco al punto P:

$$d = \frac{h}{\cos \alpha}$$

La iluminación:

$$E = \frac{I}{d^2}\cos\alpha = \frac{I}{\frac{h^2}{\cos^2\alpha}}\cos\alpha = \frac{I}{h^2}\cos^3\alpha$$

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

9.17-1 Calcular, para obtener la iluminación de 5 lux en un punto, qué intensidad luminosa debe tener un foco en la dirección de ese punto, situado a una distancia horizontal de 8 m de la vertical de la luminaria, que está a una altura de 7 m.

La intensidad de iluminación:

$$E = \frac{I}{h^2}\cos^3\alpha; \quad I = \frac{Eh^2}{\cos^3\alpha}$$

$$\cos\alpha = \frac{h}{d} = \frac{7}{\sqrt{7^2+8^2}} = 0{,}6585$$

$$I = \frac{5 \cdot 7^2}{0{,}6585^3} = 858 \text{ cd}$$

9.17-2 Calcular la iluminación en un punto situado a 8 m de un foco de intensidad de iluminación en esa dirección de 1 000 cd, si el ángulo que forma la normal a la superficie con el rayo incidente es de 30°.

Solución: 13,5 lx.

9.17-3 Un foco tiene por cada 1 000 lm de flujo una intensidad luminosa de 100 cd en cualquier dirección. Calcular:

a) Intensidad de iluminación, si el flujo total es de 23 000 lm.

b) La iluminación en un punto situado en un plano a 6 m debajo de la lámpara y a 10 m de la vertical del foco.

Solución: a) 2 300 cd; b) 8,7 lx.

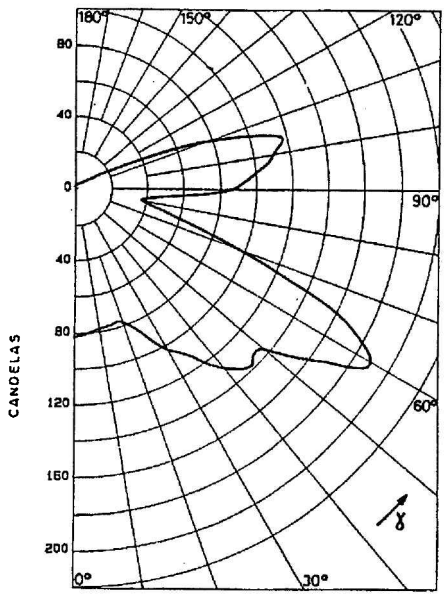


Fig. 9.16. Diagrama polar de luminaria. (Cortesía Hadasa).

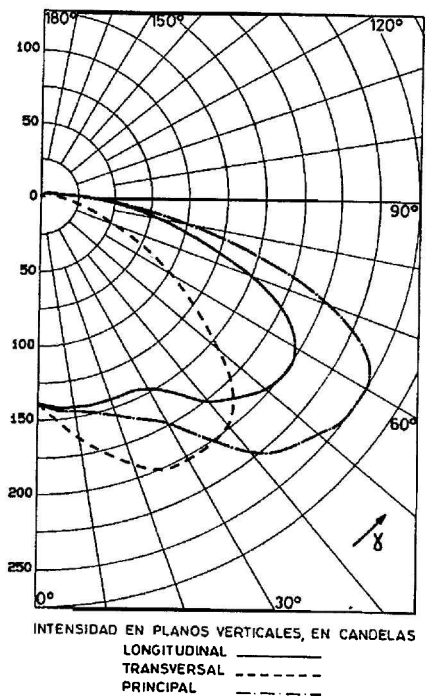


Fig. 9.17. Diagrama polar de luminaria asimétrica. (Cortesía Hadasa)

© Ediciones Paraninfo

9.17-4 Calcular la iluminación en un punto iluminado por un foco con una intensidad luminosa de 2 000 cd en la dirección del punto, situado en un plano horizontal a 8 m por debajo del foco, si el ángulo que forma la normal a la superficie con el rayo incidente es de 25°

Solución: 23,26 lx.

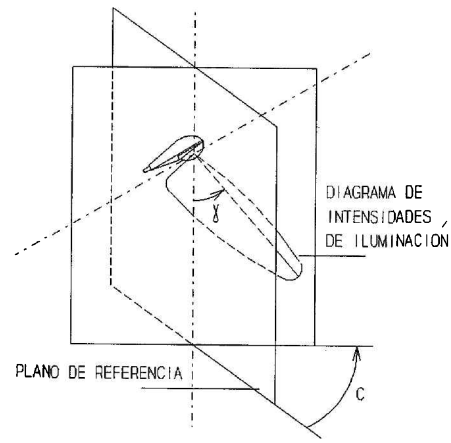


Fig. 9.18

9.18. DIAGRAMAS DE ILUMINACIÓN

■ Diagrama polar

Es la representación de la intensidad de iluminación de una fuente luminosa, trazando rayos vectores que partiendo de la fuente tienen una longitud proporcional a la intensidad de iluminación. Uniendo los extremos de esos radios vectores se tiene una representación llamada sólido fotométrico.

Estos gráficos de intensidad de iluminación se simplifican porque las fuentes de alumbrado tienen elementos de simetría.

Cuando la fuente luminosa admite un eje de revolución; cortando el sólido fotométrico por un plano que pase por el eje se obtiene del diagrama polar o curva de intensidad de iluminación. Como el plano es simétrico respecto al eje (fig. 9.16), se suele dar por el fabricante de la luminaria la mitad del plano y para una lámpara de 1 000 lm de flujo.

Cuando la fuente luminosa no admite eje de rotación, se representa el diagrama de los planos de simetría de la luminaria y sus transversales.

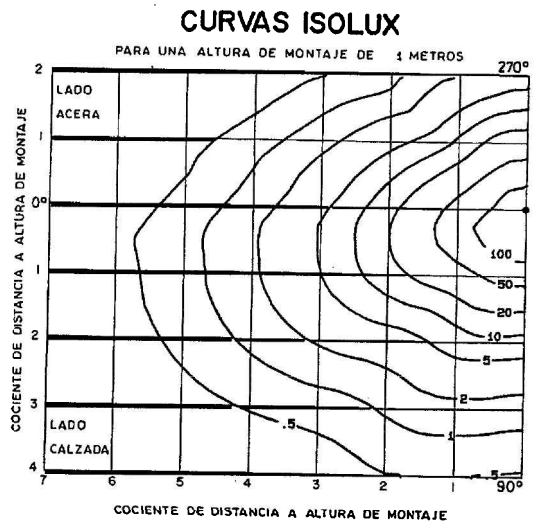


Fig. 9.19. Curvas isolux. (Cortesía Hadasa)

En la figura 9.17 se representa el diagrama polar de una luminaria utilizada para alumbrado público referida a lámpara de 1 000 lm. Se representa la intensidad de iluminación en el plano longitudinal o de referencia (según el eje de la vía a iluminar), en el plano transversal (perpendicular al eje de la vía) y en el plano vertical principal, donde se localiza la mayor intensidad de iluminación, que forma un ángulo C = 15° con el plano de referencia de la luminaria (fig. 9.18).

© Ediciones Paraninfo

■ Curvas isolux

Son curvas que unen puntos de igual iluminación sobre una superficie horizontal. Suelen trazarse para valores enteros de iluminación. En la figura 9.19 se observan las curvas isolux correspondientes a una luminaria de alumbrado de exteriores, para 1 000 lm y 1 m de altura de montaje.

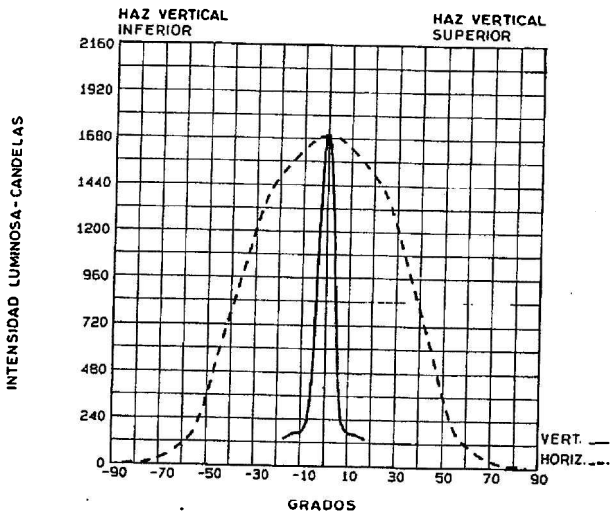


Fig. 9.20. Diagrama cartesiano. (Cortesía Hadasa).

Se debe tener en cuenta que las curvas isolux para una lámpara determinada y para una altura de montaje deben de multiplicarse por los miles de lúmenes de la lámpara y dividir por el cuadrado de la altura en metros.

Si varios focos iluminan un plano, se trazan sobre el plano las curvas isolux de cada uno de los focos, sumándose los valores en los puntos donde se cortan las curvas; a continuación se trazan las curvas isolux totales uniendo los puntos de igual iluminación.

Se determina la iluminación media a partir de las curvas isolux dividiendo el plano en cuadrados y tomando como iluminación de cada cuadrado el valor de la curva que lo cruce. A partir de estos valores se halla la media aritmética.

Se llama factor de uniformidad media a la relación:

$$f_{med} = \frac{\text{Iluminación mínima}}{\text{Iluminación media}}$$

■ Diagrama cartesiano

El diagrama de la intensidad luminosa de los proyectores (luminarias que concentran la luz para conseguir una intensidad luminosa elevada en el centro del ángulo de emisión) se suele realizar en forma cartesiana, considerando los planos de simetría vertical y horizontal y representando los ángulos en abscisas y las intensidades de iluminación en ordenadas (fig. 9.20).

■ Diagrama isocandela

Para los proyectores también se dan gráficos isocandela con coordenadas cartesianas angulares. Considerando como origen el centro del proyector, cualquier punto situado delante del proyector queda definido por un ángulo vertical y otro horizontal, de forma similar a un punto de la superficie terrestre localizado en un plano por paralelos y meridianos (fig. 9.21).

© Ediciones Paraninfo

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

9.18-1 Una luminaria con el diagrama polar de la figura 9.17 se utiliza para el alumbrado público de una carretera; tiene una lámpara de vapor de sodio 20 000 lm, y está situada a 12 m sobre la calzada. Calcular la iluminación en un punto del suelo a 17 m de la vertical de la luminaria en el sentido longitudinal de la vía de circulación (fig. 9.22).

$$\alpha = \text{áng tg}\,\frac{17}{12} = 54{,}8°$$

La intensidad de iluminación según el diagrama polar de la luminaria, para ese ángulo y para 1 000 lm es 200 cd. Para 20 000 lm la intensidad $I = 200 \cdot 20 = 4\,000$ lm.

La iluminación en el punto P:

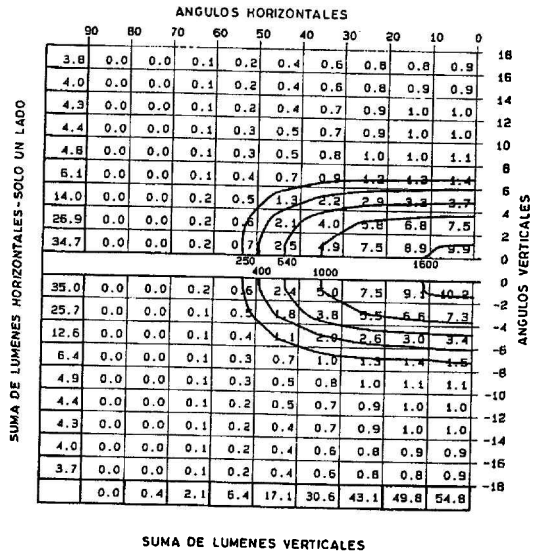


Figura 9.21. Diagrama isocandela de un proyector. (Cortesía Hadasa).

$$E = \frac{I}{h^2}\cos^3\alpha = \frac{4\,000}{12^2}\cos^3 54{,}8° = 5{,}33\ \text{lx}$$

9.18-2 Calcular la iluminación que produce la luminaria del problema anterior sobre la calzada, en un punto situado a 7 m de la vertical de la lámpara en sentido transversal a la vía de circulación.

Solución: 18 lx.

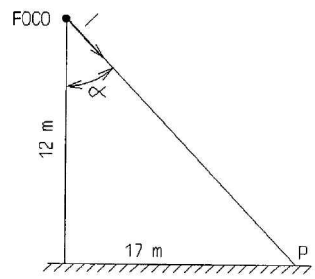


Fig. 9.22

9.18-3 Calcular a que altura sobre el suelo se debe colocar una luminaria, para obtener debajo de ella una iluminación de 300 lx, si la intensidad de iluminación vertical es de 7 500 cd.

Solución: 5 m.

9.18-4 Las curvas isolux de una luminaria indican que para un metro de altura y 1 000 lm, la iluminación en un punto situado frente a la luminaria (C=90°) y a dos veces la altura es de 20 lx. Si la luminaria, con lámpara de 23 000 lm se sitúa a 9 m de altura, calcular la iluminación en un punto situado a 18 m frente a la luminaria.

Se multiplica la iluminación por los miles de lúmenes de la lámpara y dividir por el cuadrado de la altura en metros.

$$E = \frac{20}{9^2} \cdot \frac{23\,000}{1\,000} = 5{,}68\ \text{lx}$$

© Ediciones Paraninfo

9.18-5 Una curva isolux, para luminaria de 1 000 lm y altura 1 m, tiene un valor de 50 lx. Calcular el valor de esa curva, si la luminaria se coloca a una altura de 10 m y con lámpara de 48 000 lm.

Solución: 24 lx.

9.19. ALUMBRADO DE INTERIORES

El alumbrado debe producir una buena visibilidad de los objetos y crear un ambiente visual satisfactorio.

Según la forma que las luminarias, suspendidas sobre el plano de trabajo (fig. 9.23), repartan la luz, el alumbrado se clasifica en:

1) *Alumbrado directo*: Todo el flujo luminoso producido se dirige al plano de utilización (hacia abajo).
   Las luminarias de alumbrado directo con eje de simetría, en función del ángulo bajo el cual se irradia el 50% de su flujo luminoso, *ángulo de apertura del haz* (fig. 9.24), se clasifican en: intensivas (semiángulo α entre 0° y 30°), semi-intensivas (α entre 30° y 40°), dispersoras (α entre 40° y 50°), semi-extensivas (α entre 50° y 60°), extensivas (α entre 60° y 70°) e hiper-extensivas (α entre 70° y 90°).
2) *Alumbrado indirecto*: Todo el flujo luminoso se dirige al techo del local (hacia arriba).
3) *Alumbrado mixto*: El flujo luminoso se dirige al techo y al plano de utilización. Es semi-directo cuando la mayor parte del flujo luminoso se dirige al plano de trabajo, y es semi-indirecto cuando la mayor parte del flujo luminoso se dirige hacia al techo.

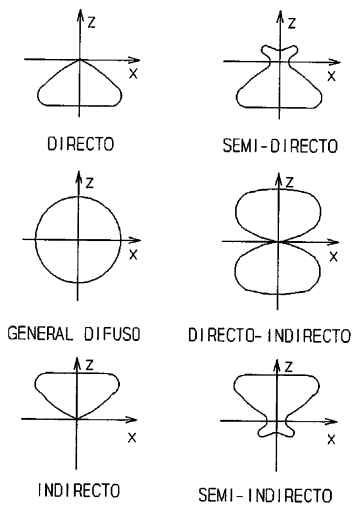


Fig. 9.23

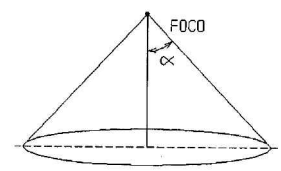


Fig. 9.24

La iluminación también puede ser: general (iluminación uniforme); localizada (iluminación sobre puntos determinados) y suplementaria (iluminación localizada dentro de la general).

9.20. CÁLCULO DE UN ALUMBRADO DE INTERIOR

Se utiliza el método del rendimiento de la iluminación y se procede de la forma siguiente:

1) Conociendo la superficie del local (S) y la iluminación necesaria (E), se calcula el flujo útil Φ_u

$$\Phi_u = E \cdot S$$

© Ediciones Paraninfo

2) El flujo total necesario Φ_t es el cociente entre el flujo útil y el rendimiento de la iluminación o factor de utilización η

$$\Phi_t = \frac{\Phi_u}{\eta}$$

El rendimiento de la iluminación se halla en tablas en función del tipo de alumbrado, de la luminaria y de su conservación, de las dimensiones del local, del color del techo, paredes y suelo, y de la altura a la que se hallan suspendidas las lámparas sobre el plano de trabajo o utilización (de 0,85 m a 1 m del suelo en iluminación directa o semi-directa).

Como valores orientativos del rendimiento de iluminación en un local con techo y paredes claros pueden utilizarse los siguientes:

- Alumbrado directo: $\eta = 0{,}5$.
- Alumbrado semi-directo: $\eta = 0{,}4$.
- Alumbrado indirecto: $\eta = 0{,}3$.

Con las paredes y techo de colores muy oscuros (verde oscuro, azul oscuro, etc.) el rendimiento de la iluminación se reduce a la mitad.

3) El número de lámparas n_L necesarias, siendo el flujo por lámpara Φ_L se calcula de la forma siguiente:

$$n_L = \frac{\Phi_t}{\Phi_L}$$

Las lámparas se distribuyen uniformemente sobre la superficie del local (fig. 9.25), siendo la distancia entre ellas (d) de una a dos veces la altura de suspensión sobre el plano de trabajo (h). $d = 1 \ldots 2 \cdot h$

El *factor de uniformidad* sobre el área de trabajo no debe ser menor de 0,8 para alumbrado general, y de 0,5 cuando existe alumbrado localizado sobre cada puesto de trabajo.

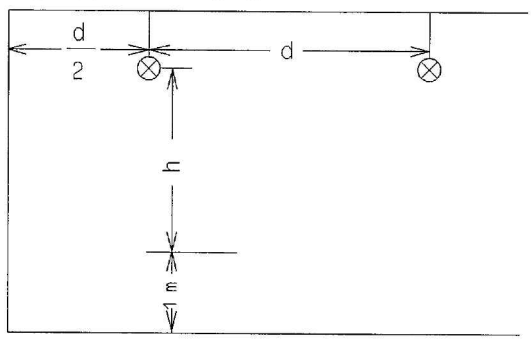


Fig. 9.25

El *deslumbramiento* (excesivo contraste de luminancias en el campo visual) se corrige:

- Utilizando en el plano de trabajo superficies de acabados mates y colores apropiados.
- Utilizando luminarias de baja luminancia.
- Evitando la colocación de lámparas sin difusores en un cono de visión de 30° de semiángulo sobre un eje horizontal de cualquier observador dentro del local.

© Ediciones Paraninfo

La iluminación necesaria para distintos locales es función de la actividad a realizar en los mismos. En la tabla 9.8 se indican los valores de iluminación recomendados según la Norma Técnica de Edificación (NTE IEI).

Tabla 9.8

E (lux)	CRITERIO DE USO	LOCAL
50-75-100	Solamente orientación para visitas breves y esporádicas.	Almacenes, estacionamiento de coches, cuartos de máquinas, basuras o contadores.
100-150 200	Locales no utilizados continuamente para trabajar.	Vestíbulos, escaleras, ascensores, pasillos, salas de espera,vestuarios, aseos y cuartos de baño, cocinas en vivienda, cuartos de estar, comedores, dormitorios,archivos, salas de actos, cine, teatros o salas de conciertos.
200-300 500	Trabajos con requerimientos visuales limitados.	Oficinas generales, aulas, grandes cocinas, estaciones de servicio, gimnasios, salas de lectura, reuniones o exposiciones, locales industriales con requerimientos visuales limitados.
500-750 1000	Trabajos con requerimientos visuales normales.	Laboratorios, salas de contabilidad, mecanografía o cálculo, aulas para trabajos manuales, costura o dibujo, locales industriales con requerimientos visuales normales.
1000-1500 2000	Trabajos con requerimientos visuales especiales	Salas de delineación, locales industriales para trabajos de precisión.

El Código Técnico de Edificación (CTE) establece el valor de la eficiencia energética VEEI (W/m^2) por cada 100 lux, según los locales del edificio, y niveles mínimos de iluminación en zonas de circulación para personas y vehículos.

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

9.20-1 Para iluminar un local de 8 m de largo por 5 m de ancho y 3 m de altura se utilizan tubos fluorescentes de 36 W, 2 600 lm, de manera que el alumbrado sea semidirecto. Sabiendo que la iluminación necesaria es 400 lx con techo y colores claros. Calcular:

a) Flujo luminoso útil que se necesita.
b) Flujo luminoso total aproximado.
c) Número de tubos fluorescentes necesarios.

a) La superficie del local $S = 8 \cdot 5 = 40\ m^2$.
El flujo luminoso útil $\Phi_u = E\,S = 400 \cdot 40 = 16\,000\ lm$

b) El flujo luminoso total $\Phi_t = \dfrac{\Phi_u}{\eta} = \dfrac{16\,000}{0{,}4} = 40\,000\ lm$

c) Número de tubos fluorescentes $n_L = \dfrac{\Phi_t}{\Phi_L} = \dfrac{40\,000}{2\,600} = 15{,}38 \approx 16$ tubos

9.20-2 Una nave industrial de 36 m de largo por 12 m de ancho tiene alumbrado directo con iluminación uniforme, mediante 8 lámparas de 250 W y 13 500 lm cada una. El techo y las paredes son de colores claros. Calcular de forma aproximada:

a) Flujo luminoso útil.
b) Iluminación media.

Solución: a) 54 000 lm; b) 125 lx.

© Ediciones Paraninfo

2.20-3 Una nave industrial de 30 m de largo por 10 m de ancho se desea iluminar por lámparas de vapor de mercurio de 250 W, 13 500 lm con alumbrado directo. Sabiendo que la iluminación necesaria es de 180 lx y que el techo y paredes son de color claro. Calcular de forma aproximada:

a) Flujo luminoso útil.
b) Flujo luminoso total aproximado.
c) Número de lámparas necesarias.

Solución: a) 54 000 lm ; b) 108 000 lm; c) 8 lámparas.

9.21. RENDIMIENTO DE LA ILUMINACIÓN

Se calcula según catálogos de los fabricantes de luminarias, y es el producto de dos factores, rendimiento del local o recinto a iluminar y de la luminaria:

■ **Rendimiento del local** (η_R)

Se calcula según el índice del local K, siendo a la anchura del local en metros y b su longitud, para alumbrado directo:

$$K=\frac{a\cdot b}{h\cdot(a+b)}$$

Es necesario conocer el grado de reflexión del techo, paredes y suelo del local, que se indican en la tabla 9.9

Tabla 9.9

Color	Grado de reflexión %	Color	Grado de reflexión %	Material	Grado de reflexión %	Material	Grado de reflexión %
Blanco	70-85	Rosa	45-55	Espejo plata	80-90	Hormigón claro	30-50
Techo acústico blanco	50-65	Rojo claro	30-50	Aluminio anodizado	80-85	Hormigón oscuro	30-40
Gris claro	40-50	Rojo oscuro	10-20	Aluminio pulido	65-75	Mortero claro	35-55
Gris oscuro	10-20	Verde claro	45-65	Esmalte blanco	75-85	Mortero oscuro	20-30
Negro	4	Verde oliva. Ocre	25-35	Acero pulido	55-65	Arenisca blanca	30-40
Amarillo claro	55-65	Verde oscuro	10-20	Madera clara	30-50	Arenisca oscura	15-25
Marrón claro	30-40	Azul claro	45-55	Madera oscura	10-25	Ladrillo claro	30-40
Marrón oscuro	10-20	Azul oscuro	5-10	Mármol blanco	60-70	Ladrillo oscuro	15-25

A partir del índice del local, del grado de reflexión de techo, paredes y plano útil, y según el tipo de iluminación; se halla el rendimiento del local η_R en tablas distintas según la luminaria utilizada. En la tabla 9.10 se indica el rendimiento del local para una luminaria con alumbrado directo.

© Ediciones Paraninfo

Tabla 9.10

FACTORES DE REFLEXIÓN										
Techo	0,8		0,7					0,5		0,3
Paredes	0,7		0,7		0,5		0,3	0,3	0,1	0,3
Plano útil	0,3	0,1	0,3	0,1	0,3	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Índice del local	Rendimiento del local									
0,60	0,72	0,66	0,70	0,65	0,58	0,56	0,50	0,55	0,49	0,49
0,80	0,83	0,76	0,81	0,74	0,70	0,66	0,60	0,64	0,59	0,59
1,00	0,91	0,81	0,88	0,80	0,77	0,72	0,66	0,71	0,66	0,65
1,25	0,98	0,87	0,95	0.85	0,85	0,79	0,73	0,77	0,73	0,72
1,50	1,02	0,90	0,99	0,88	0,90	0,82	0,77	0,81	0,76	0,75
2,00	1,08	0,94	1,05	0,94	0,97	0,88	0,83	0,86	0,82	0,81
2,50	1,12	0,97	1,09	0,95	1,02	0,91	0,87	0,89	0,86	0,85
3,00	1,15	0.99	1,11	0,97	1,05	0,93	0,90	0,91	0,89	0,87
4,00	1,19	1,01	1,14	0,99	1,09	0,96	0,94	0,94	0,92	0.90
5,00	1,21	1,02	1,16	1,01	1,12	0,98	0,961	0,96	0,94	0.92

■ **Rendimiento de la luminaria** η_L

Es la relación entre el flujo emitido por la luminaria y el total de la lámpara. Lo proporciona el fabricante de la luminaria.

El rendimiento de la iluminación: $\eta = \eta_R \cdot \eta_L$

9.22. FACTOR DE CONSERVACIÓN

Para tener en cuanta el envejecimiento de la lámpara y el ensuciamiento por polvo del interior de la luminaria, el rendimiento de la iluminación se multiplica por un factor de conservación f_c, en función del ambiente de trabajo, según se indica en la siguiente tabla.

Tabla 9.11

TIPO DE LOCAL	FACTOR DE CONSERVACIÓN (f_c)
Acerías y fundiciones.	0,65
Soldadura y mecanizado.	0,7
Oficinas industriales.	0,75
Patios y locales públicos.	0,8
Despachos y oficinas.	0,85

© Ediciones Paraninfo

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

9.22-1 Se quiere iluminar una oficina de 6×16 m de planta y altura 3 m, con luminarias sujetas al techo y de dos tubos fluorescentes de 36 W cada uno, para iluminación directa extensiva, siendo el flujo luminoso por tubo 3 200 lm. La iluminación media deseada es de 500 lux. Los factores de reflexión según el color del techo, paredes y suelo son respectivamente: 0,7, 0,5 y 0,3. El rendimiento de la luminaria es de 0,82, según el fabricante, y como factor de conservación se utiliza 0,8. Calcular:

a) Índice del local, considerando el plano de trabajo a 0,80 m del suelo.
b) Flujo útil necesario.
c) Número de luminarias.

a) La altura de las luminarias sobre el plano de trabajo: $h=3\text{-}0{,}8=2{,}2$ m

El índice del local: $K=\dfrac{a\cdot b}{h\cdot(a+b)}=\dfrac{6\cdot 16}{2{,}2\cdot(6+16)}=1{,}98$

b) El flujo útil: $\Phi_u = E\,S = 500\cdot 6\cdot 16 = 48\,000$ lm

c) El rendimiento del local, utilizando la tabla 9.10, es de 0,97.

El flujo luminoso total: $\Phi_t=\dfrac{\Phi_u}{\eta f_c}=\dfrac{48\,000}{0{,}97\cdot 0{,}82\cdot 0{,}8}=75\,434$ lm

El número de luminarias: $n_L=\dfrac{\Phi_t}{\Phi_L}=\dfrac{75\,434}{2\cdot 3\,200}=12$ luminarias

9.22-2 En la iluminación de un taller de 50×20 m se colocan a 8 m de altura lámparas de vapor de mercurio de 400 W y 23 000 lm, para conseguir a una altura del suelo de 0,8 m una iluminación de 250 lx. Los factores de reflexión de techo, paredes y plano de utilización son: 0,7, 0,5 y 0,3. El rendimiento de la luminaria es de 0,8 y el factor de conservación 0,7. Calcular el número de luminarias, utilizando la tabla 9.10.

Solución: 20 luminarias.

9.22-3 Para la iluminación a 0,85 m del suelo de un local de 25×10 m de planta y altura 2,8 m, se colocan 44 luminarias formadas por dos tubos fluorescentes de 36 W y flujo 3 000 lm cada uno. Los factores de reflexión de techo, paredes y plano de utilización son 0,7, 0,5 y 0,1. El factor de conservación es 0,8 y el rendimiento de la luminaria 0,7. Calcular:

a) Índice del local.
b) Rendimiento del local utilizando la tabla 9.10.
c) Flujo útil.
d) Iluminación media.

Solución: a) 3,66; b) 0,95; c) 140 448 lm; d) 562 lx.

9.23. CONTROL Y REGULACIÓN DE LAS INSTALACIONES DE ALUMBRADO DE INTERIORES

■ Control de la instalación

Puede realizarse de forma local, de forma centralizada (para toda la instalación), o combinando ambas formas.

© Ediciones Paraninfo

Según los medios utilizados para el control de alumbrado, este puede ser:

- Control manual.
- Control automático.
- Control remoto.

Para el *control manual* local del alumbrado se utilizan:

- *Interruptores y conmutadores*. Los esquemas de conexiones más usuales en el interior de edificios para el mando de lámparas de alumbrado se indican en la figura 9.26. El uso de conmutadores (interruptor de dos circuitos) permite el encendido y apagado desde dos puntos distintos (esquema b). El conmutador de cuzamiento (conmutador de cuatro bornes de conexión dos a dos), conectado entre los otros dos conmutadores, permite el encendido y apagado desde tres o más puntos distintos (esquema c).

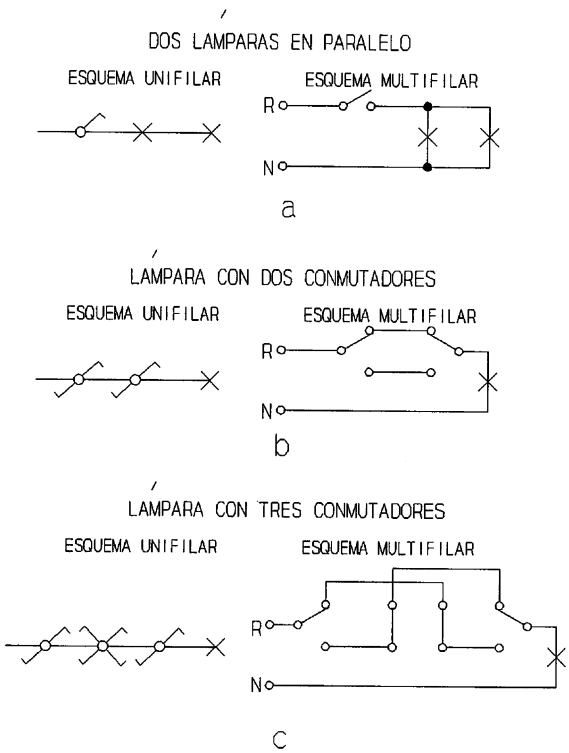


Fig. 9.26

- *Pulsadores*. Al pulsador va asociado un sistema de control, que permite el encendido y apagado dependiendo de otras variables (programado, temporizado, etc.). El circuito más utilizado es el que utiliza un relé temporizado (fig. 9.27); cuando se acciona un pulsador el contacto del relé cierra y se encienden las lámparas. Al cabo de un tiempo programado el contacto del relé se abre apagando las lámparas. La temporización puede ser para un valor fijo o según la hora mediante un relé programable. Una variante de este circuito es utilizando en lugar del relé temporizado un *telerruptor* (relé biestable), que cierra o abre su contacto por el accionamiento de los pulsadores. Si está abierto al pulsar se cierra, y se está cerrado se abre al pulsar.

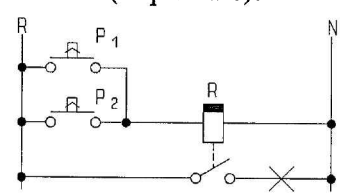


Fig. 9.27

- *Potenciómetro*. Que regula el flujo luminoso de la lámpara variando la intensidad, mediante la inserción de una resistencia en el circuito.

© Ediciones Paraninfo

- *Telemando*. Mando a distancia, generalmente por rayos infrarrojos. Necesitan emisores de infrarrojos, detectores y dispositivos de control.

En el *control automático*; para la utilización del alumbrado solamente en caso necesario, se utilizan varias medios:

- Detectores de presencia. Mecanismo sensible a la cercanía o al movimiento, asociado a un temporizador.
- Fotocélulas. Controlan el uso del alumbrado según el aporte de la luz natural.
- Multifuncional. Utilizando para el control de alumbrado varios tipos de sensores (telemando, infrarrojos, interruptores, etc.).
- Luminarias inteligentes. Luminarias con control y regulación propios; como fotocélula y detector de presencia.

El *control remoto*, consiste en el control centralizado de la instalación, que permite el encendido, el apagado y la regulación total o por zonas del alumbrado.

■ **Regulación del alumbrado**

La regulación del flujo luminoso se realiza de varias formas:

- Variación de la tensión de alimentación. Mediante transformadores de tensión de salida variable y en lámparas fluorescentes con inductancias regulables.
- Variación del tiempo en el que la intensidad circula por las lámparas. Mediante el uso de circuitos electrónicos con tiristores o triacs.
- Variación de la frecuencia de la tensión de alimentación. Con balastos electrónicos para lámparas fluorescentes, en las que la eficacia luminosa aumenta con la frecuencia.

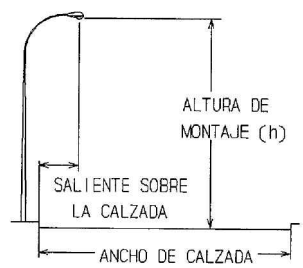


Fig. 9.28

9.24. ALUMBRADO EXTERIOR

Es el alumbrado de vías de comunicación, plazas u otra extensión descubierta.

Las luminarias son colocadas sobre soportes en forma de báculo (fig. 9.28), sobre columna o sobre brazo de sujeción, a una altura h sobre la vía a iluminar.

9.25. CÁLCULO DEL ALUMBRADO DE EXTERIORES POR EL MÉTODO DEL FLUJO LUMINOSO

Se utiliza el método del rendimiento de la iluminación, igual que en el alumbrado de interiores, considerando la superficie S iluminada por cada foco.

$$\Phi_t = \frac{\Phi_u}{\eta} = \frac{E\,S}{\eta}$$

© Ediciones Paraninfo

El rendimiento de la iluminación o coeficiente de utilización η se halla en tablas en función de las características de la luminaria y de la vía pública. Como valores orientativos pueden considerarse los siguientes:

- Colocación axial de los focos: $\eta = 0{,}5$.
- Colocación lateral de los focos: $\eta = 0{,}4$.

La colocación axial de los focos (según el eje de la vía), no se suele utilizar. En las vías de comunicación con mediana central se utilizan dos focos, iluminando cada uno la mitad de la vía. Las colocaciones laterales más utilizadas son: tresbolillo, unilateral y bilateral pareada (fig. 9.29).

La altura recomendada del punto de luz es función del flujo de la lámpara, según la siguiente tabla.

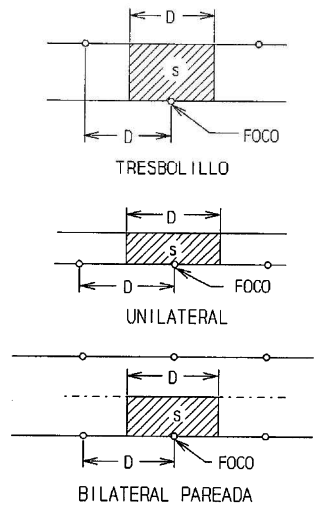


Fig. 9.29

Tabla 9.12

ALTURA DEL PUNTO DE LUZ (m)	FLUJO DE LA LÁMPARA (lm)
< 7,5	<15 000
7,5 - 9	15 000 - 20 000
9 - 12	20 000 - 40 000
> 12	>40 000

La altura de la luminaria está también en relación directa con la anchura de la vía a iluminar y la disposición de los focos, según la tabla siguiente:

Tabla 9.13

TIPO DE COLOCACIÓN	RELACIÓN **ALTURA/ANCHO**
Unilateral	0,85 - 1
Tresbolillo	0,5 - 0,85
Pareada	0,33 - 0,5

La relación de la separación a la altura de la luminaria es función de la iluminación media a conseguir sobre la vía, según la siguiente tabla:

Tabla 9.14

ILUMINACIÓN MEDIA E_m (lux)	RELACIÓN **SEPARACIÓN/ALTURA**
$2 \leq E_m < 7$	5 - 4
$7 \leq E_m < 15$	4 - 3,5
$15 \leq E_m \leq 30$	3,5 - 2

En la tabla 9.14 se indican valores orientativos de iluminación exterior y deportiva.

© Ediciones Paraninfo

Tabla 9.15

TIPO	E (lux)
Autopistas, autovías y carreteras principales.	35
Vías urbanas de tráfico rápido.	30
Vías urbanas y provinciales.	25-28
Campos de tenis.	100-300
Campos de baloncesto	300-500
Campos de fútbol.	300-1 000

La iluminación recomendada por la CIE (Comisión Internacional de Iluminación) según la importancia de las vías de comunicación, varía de 18 a 35 lux, con un factor de uniformidad medio de 0,35 a 0,65 y una luminancia de 1,1 a 2 cd/m^2.

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

9.25-1 Para iluminar una calle de 9 m de ancho se utilizan lámparas de vapor de sodio de 250 W, con luminarias (fig. 9.30), colocadas lateralmente por una acera. Si se desea obtener una iluminación media de 30 lx y el flujo por foco es de 25 000 lm, con un coeficiente de utilización de 0,4. Calcular la distancia entre focos.

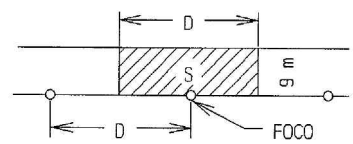


Fig. 9.30

El flujo útil de cada foco:

$$\Phi_u = \Phi_t \eta = 25\,000 \cdot 0{,}4 = 10\,000 \text{ lm}$$

La superficie iluminada por cada foco:

$$S = 9D = \frac{\Phi_u}{E} = \frac{10\,000}{30} = 333{,}33 \text{ m}^2$$

La distancia entre focos: $D = \dfrac{333{,}33}{9} = 37$ m

9.25-2 En una calle de 14 m de ancho se colocan luminarias al tresbolillo con lámparas de vapor de mercurio de 400 W, 23 000 lm. La iluminación media sobre la calzada es de 25 lx. Considerando un coeficiente de utilización de 0,4, calcular la distancia entre focos.

Solución: 26,3 m.

9.25-3 Para conseguir en una calle de 17 m de ancho una iluminación media de 30 lx, se colocan bilateralmente luminarias con lámparas de vapor de sodio de 250 W y flujo luminoso 25 000 lm. Calcular la distancia entre focos considerando un coeficiente de utilización de 0,4.

Solución: 39,2 m.

© Ediciones Paraninfo

9.25-4 En una calle de 12 m de ancho se colocan luminarias al tresbolillo, separadas entre sí 26 m. Si se desea obtener una iluminación media de 30 lm y el coeficiente de utilización o rendimiento es 0,4. Calcular el flujo necesario en la lámpara.

Solución: 23 400 lm.

9.26. LUMINARIAS PARA EL ALUMBRADO EXTERIOR

Las luminarias para el alumbrado exterior o público (fig. 9.31) son asimétricas, emitiendo mayor flujo en la dirección del eje de la vía a iluminar.

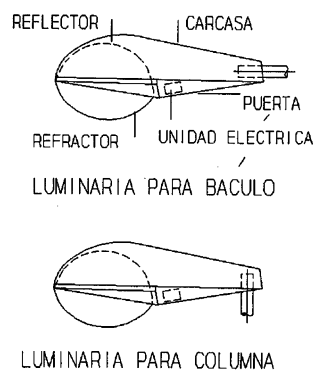


Fig. 9.31

Según sus característicos de emisión de luz las luminarias se clasifican en tres grupos (fig. 9.32):

1) *Luminarias cut-off (haz de luz recortado).* Su intensidad en la horizontal es menor del 5% de la máxima y la intensidad a 80° es inferior a 30 cd por 1 000 lm. Son las más utilizadas en alumbrado público.
2) *Luminarias semi cut-off (haz de luz semirrecortado).* Su intensidad en la horizontal es menor del 3% de la máxima y la intensidad a 80° es inferior a 100 cd por 1 000 lm.
3) *Luminarias non cut-off (haz de luz no recortado).* Su intensidad en la horizontal es superior a la de las luminarias semi cut-off.

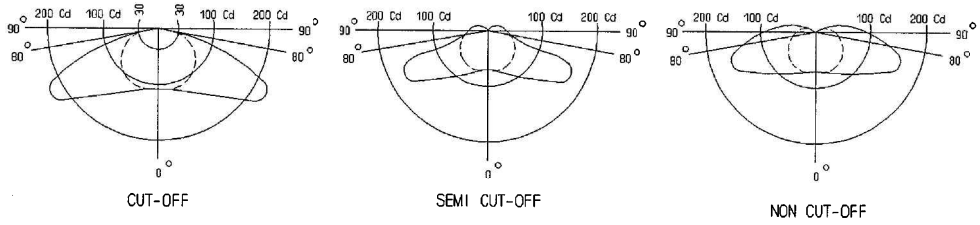


Fig. 9.32

Las luminarias para alumbrado público suelen ser de grado de aislamiento clase I y con protección mínima:

- Luminarias abiertas IP33.
- Luminarias cerradas IP43 o IP54 (ambiente con contaminación).
- Luminarias herméticas IP655.

9.27. CURVAS DE UTILIZACIÓN

El factor de utilización de la luminaria η (relación entre el flujo luminoso que llega a la superficie y el emitido por la lámpara) se calcula según las curvas de utilización de la luminaria (fig. 9.33) suministradas por el fabricante.

© Ediciones Paraninfo

Para una relación de *distancia transversal a la vertical de la luminaria/altura* se obtiene un factor para el lado de la calzada η_c y otro para el lado de acera η_a. Cuando la vertical de la luminaria cae sobre la calzada, la suma de los dos factores es el coeficiente de utilización $\eta = \eta_c + \eta_a$. Si la vertical cae dentro de la acera, se restan los dos factores que resultan del lado de la calzada.

Si se tiene en cuenta la conservación de la luminaria, el factor de utilización queda multiplicado por el *factor de conservación* f_c, suministrado por el fabricante, según el envejecimiento de la lámpara y la suciedad que se va acumulando sobre la luminaria. Para una luminaria hermética y para lámparas de vapor de mercurio o de vapor de sodio suele utilizarse 0,75.

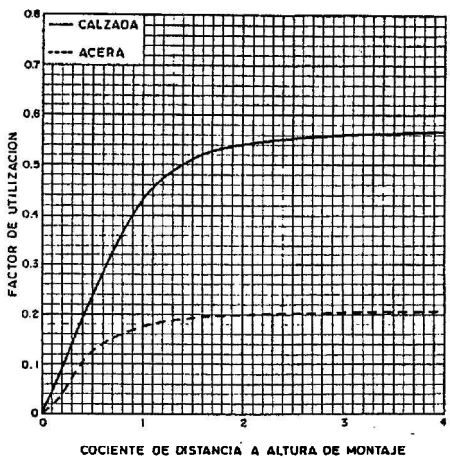


Fig. 9.33. Curva de utilización de una luminaria de exterior. (Cortesía Hadasa).

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

9.27-1 Para iluminar un vía urbana de ancho de calzada 12 m y de las aceras 3 m, se utilizan lámparas de vapor de mercurio de 400 W y 23 000 lm, con luminaria cerrada, de reparto de luz asimétrico y colocada sobre báculo de acero. El báculo se coloca en la acera de forma que la vertical de la luminaria está sobre la calzada a 1 m de la acera. La iluminación media debe ser de 30 lux. Calcular:

a) Tipo de colocación de los focos si se escoge un báculo que tiene como altura de suspensión de la luminaria 10 m.
b) Factor de utilización si las curvas de utilización, suministradas por el fabricante de la luminaria, son las de la figura 9.33.
c) Distancia entre focos, si se considera un factor de conservación de 0,75.

a) La relación altura/ancho $\dfrac{10}{12} = 0{,}83$

Según la tabla 9.13, el tipo de colocación debe ser al tresbolillo.

b) La relación para la acera es $\dfrac{1}{10} = 0{,}1$, por lo que el factor de acera según la figura 9.33 es $\eta_a = 0{,}01$.

La relación para la calzada es $\dfrac{11}{10} = 1{,}1$, por lo que el factor de calzada es $\eta_c = 0{,}46$.

El coeficiente de utilización: $\eta = 0{,}01 + 0{,}46 = 0{,}47$.

c) El flujo útil: $\Phi_u = E\,S = 30 \cdot 12 \cdot D$

El flujo total: $\Phi_t = \dfrac{30 \cdot 12 \cdot D}{0{,}47 \cdot 0{,}75} = 23\,000$; $\quad D = \dfrac{23\,000 \cdot 0{,}47 \cdot 0{,}75}{30 \cdot 12} = 22{,}52$ m

© Ediciones Paraninfo

9.27-2 Para iluminación de una vía de 9 m de ancho se utiliza lateralmente un luminaria asimétrica cerrada con lámpara de vapor de mercurio 250 W, 13 500 lm, colocada sobre un báculo de 7 m con la vertical de la luminaria sobre la orilla de la calzada. Considerando un factor de utilización de la luminaria de 0,4 y un factor de conservación de 0,8, calcular la distancia entre luminarias para una iluminación media de 25 lx.

Solución: 19,2 m

9.27-3 Se desea iluminar con luminaria cerrada y lámparas de vapor de sodio 150 W, 14 500lm, una vía con circulación en los dos sentidos, de calzada 9 m con colocación de los focos unilateral. La luminaria se coloca a una altura de 10 m. Calcular, para obtener una iluminación media de 25 lux.

a) Distancia entre lámparas, considerando un coeficiente de utilización de 0,4 y un factor de conservación de 0,8.
b) Iluminación sobre la calzada en la vertical de la luminaria, si la curva polar indica una intensidad de iluminación de 200 cd para 1 000 lm.

Solución: a) 20,6 m; b) 29 lx.

9.28. ALIMENTACIÓN Y CONTROL DE LAS INSTALACIONES DE ALUMBRADO DE EXTERIORES

■ Líneas de alimentación

La alimentación de las instalaciones de alumbrado público o exterior suele realizarse con una red de corriente alterna trifásica con neutro en B.T., con las luminarias repartidas entre las tres fases. Según el REBT (ITC-BT-09) los conductores serán de cobre, con tensión de aislamiento mínimo de 0,6/1kV. La sección mínima de cobre es para líneas aéreas 4 mm^2 y para líneas subterráneas 6 mm^2, con conductores bajo tubo de diámetro interior mínimo 60 mm a una profundidad mínima de 0,40 m. En el interior de los soportes la sección mínima es 2,5 mm^2.

La acometida de la instalación se conecta según el REBT y las especificaciones de la empresa suministradora, a un modulo de medida y a un armario donde se colocan los aparatos de maniobra y protección. Cada línea de alimentación a las lámparas (que se conectan en paralelo) lleva un interruptor diferencial (de 300 mA con tierra de 30 Ω), que puede ser de reenganche automático, y un interruptor magnetotérmico. Además cada punto de luz debe ser protegido contra sobreintensidades y compensado su factor de potencia como mínimo a 0,9. Todas las partes metálicas de la instalación y del mobiliario urbano (situado a una distancia menor de 2 m) se pondrán a tierra. Se instalará como mínimo un electrodo de puesta a tierra cada 5 soportes de luminarias y siempre el primero y último soporte de cada línea. La tensión de contacto a tierra no debe sobrepasar los 24 V. La sección mínima del conductor que une el soporte con el electrodo es 16 mm^2 (ITC-BT-09).

Si la potencia del alumbrado es muy grande, la acometida se realiza en M.T. a un centro de transformación, y la instalación se conecta en B.T. al secundario del transformador.

© Ediciones Paraninfo

El cálculo de las secciones de la línea de alimentación por caída de tensión, se puede realizar:

1) Considerando circuitos monofásicos:
   - Cuando la alimentación es monofásica.
   - Cuando la reducción de alumbrado se realiza desconectando dos fases de la instalación.
2) Considerando circuitos trifásicos.
   - Calculando la sección de la fase con mayor carga. El método más simple consiste en considerar el circuito trifásico equilibrado, con lo que no se tiene en cuenta la caída de tensión por el neutro de la instalación, por el que no circularía corriente.

■ **Regulación y control**

- *Regulación de la iluminación de exteriores*. Para disminuir el consumo se disminuye el nivel de iluminación a partir de un momento prefijado. Actualmente se realiza:
  1) *Interruptores crepusculares*. Células fotoeléctricas, que realizan el encendido y apagado de la instalación de forma automática según la iluminación de la luz diurna.
  2) *Interruptor horario astronómico*. Se emplea actualmente un programador electrónico que realiza automáticamente la maniobra de apagado y encendido de las instalaciones de alumbrado exterior, variando automáticamente la hora de encendido y apagado a lo largo del año según las coordenadas geográficas.
  3) *Balastos de doble nivel*. Una inductancia auxiliar conectada a la principal hace que la impedancia total aumente, con lo que la lámpara funciona en régimen reducido, con menor tensión en bornes y menor flujo luminoso.
  4) *Reductores de tensión*. Dispositivos que actúan bajando la tensión de alimentación de las lámparas para reducir su flujo luminoso.
  5) *Reguladores-estabilizadores*. Dispositivos que estabilizan la tensión de alimentación de las lámparas, evitando las sobretensiones, y regulan el flujo emitido por las mismas variando la tensión de alimentación.
- *Control de la iluminación de exteriores*. El encendido y apagado del alumbrado y la vigilancia e información sobre el estado de la instalación puede realizarse actuando:
  - Sobre cada punto de luz.
  - Sobre el cuadro de alumbrado, que controla varios puntos de luz.
  - Sobre puesto centralizado, que comanda varios cuadros de alumbrado.

En las instalaciones de alumbrado publico se suelen desconectar parte de las lámparas a determinadas horas de la noche por medio de un interruptor horario para reducción del consumo. Actualmente, en lugar de la desconexión de una parte

© Ediciones Paraninfo

de las lámparas, se utilizan reductores de consumo, con reloj programable, que actúan bajando la tensión de alimentación de las lámparas (fig. 9.34), con lo que baja también el nivel de iluminación, en el tiempo programado previamente.

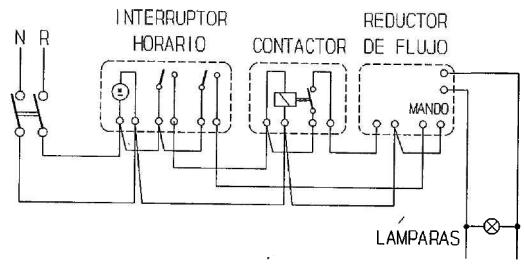


Fig. 9.34

Según el REBT (ITC-BT-09) se debe disponer para control del alumbrado, además de los dispositivos automáticos que se utilicen, un interruptor manual para el apagado y encendido de la instalación.

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

9.28-1 Se conectan mediante un línea subterránea con conductores de cobre, unipolares, aislados con XLPE, bajo tubo, 11 báculos con luminarias de 250 W, 230 V y separados entre sí 35 m. El tramo inicial es de 20 m. La línea de alimentación es trifásica con neutro 400/230 V y la caída de tensión máxima es el 2%. La derivación a cada luminaria es de 2,5 mm^2. Calcular la línea de alimentación, de sección uniforme:

a) Considerando la línea trifásica equilibrada.

b) Considerando circuitos monofásicos.

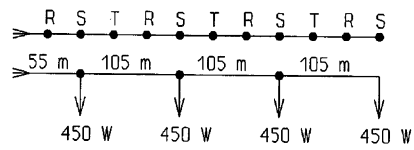


Fig. 9.35

a) La potencia a considerar en cada luminaria (ITC-BT-09), es:

$$250 \cdot 1{,}8 = 450 \text{ W}$$

La caída de tensión en la línea.

$$u = \frac{2 \cdot 230}{100} = 4{,}6 \text{ V}$$

Conectando las lámparas sucesivamente a las tres fases, la fase más cargada es la S (fig. 9.35). Para el cálculo de la sección, se considera como una línea monofásica sin tener en cuenta el neutro.

$$s = \frac{\Sigma (LP)}{cuV} = \frac{55 \cdot 450 + 160 \cdot 450 + 265 \cdot 450 + 370 \cdot 450}{56 \cdot 4{,}6 \cdot 230} = 6{,}46 \text{ mm}^2$$

La sección más próxima por exceso es de 10 mm^2, que admite bajo tubo según norma UNE 20460 (tabla 2.8 del libro) una intensidad de 44 A.

La intensidad que circula por el tramo más desfavorable con un factor de potencia unidad.

$$I = \frac{P}{V \cos\varphi} = \frac{450 \cdot 4}{230 \cdot 1} = 7{,}83 \text{ A}$$

Mucho menor que la intensidad permitida por el conductor, por lo que es válida la sección de 10 mm^2. En las líneas de alumbrado público la caída de tensión es la que marca la sección.

© Ediciones Paraninfo

b) Considerando el circuito de la fase S como monofásico, con el neutro de igual sección que la fase:

$$s = \frac{2\sum(LP)}{cuV} = 2 \cdot 6{,}46 = 12{,}94 \text{ mm}^2$$

La sección a utilizar para fases y neutro es de 16 mm²

9.28-2 Calcular la línea de sección uniforme que alimenta a 400/230 V, un alumbrado público con 12 lámparas de 400 W, 230 V, repartidas sobre las tres fases y separadas entre sí 30 m. El tramo inicial de la línea es de 70 m y la caída de tensión máxima 2%. Los conductores son de cobre, unipolares, aislados con XLPE, en instalación enterrada bajo tubo. Para reducción del flujo luminoso, se utilizan reductores de consumo, que disminuyen la tensión de alimentación.

Solución: 16 mm²

9.29. ALUMBRADO CON PROYECTORES

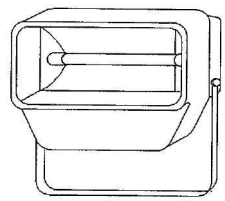


Fig. 9.36

Se llama *proyector* a una luminaria (fig. 9.36) que concentra la luz en un ángulo sólido determinado para conseguir una iluminación elevada. Se utiliza para iluminar un objeto o escena de forma que su iluminación será superior a la de sus alrededores.

La iluminación por proyectores, según sus aplicaciones, puede ser:

- Iluminación decorativa o arquitectónica: fachadas, edificios, etc.
- Iluminación utilitaria o industrial: muelles de carga, parques de almacenamiento, astilleros, etc.
- Iluminación deportiva.

Los proyectores se clasifican en 7 tipos según el ángulo de apertura del haz (ángulo sólido que contiene a todas las intensidades luminosas de valor igual o mayor al 10% de la máxima). La elección del tipo de proyector viene condicionada por su aplicación; para ello hay que considerar:

- La apertura del haz del proyector será tanto más pequeña cuanto mayor sea la distancia al objeto o escena a iluminar.
- Los bordes de los haces de los proyectores que inciden sobre una superficie deben superponerse para conseguir una iluminación uniforme.

Para el alumbrado industrial con proyectores, la separación entre estos no debe ser superior a 4 veces la altura a la que están situados.

Para calcular un alumbrado por proyección por el método de los lúmenes, se utiliza el rendimiento de la iluminación, igual que en el alumbrado de vías públicas, considerando la superficie iluminada por cada proyector.

$$\Phi_t = \frac{\Phi_u}{\eta} = \frac{ES}{\eta}$$

© Ediciones Paraninfo

El rendimiento de la iluminación o coeficiente de utilización η es la relación entre los lúmenes que inciden sobre la superficie a iluminar y los lúmenes totales. Debe estar comprendido entre 0,6 y 0,9. Puede estar determinado por experiencia o calcularse con el diagrama isocandelas del proyector sobre la superficie a iluminar, sumando los lúmenes que quedan dentro de la superficie y dividiendo por los lúmenes totales del proyector.

Si se considera el factor de conservación del proyector f_c, el coeficiente de utilización queda multiplicado por este coeficiente, que para proyectores cerrados, en función del ambiente de trabajo, se utilizan los valores siguientes:

- Zonas industriales: 0,7.
- Zonas de aparcamiento, almacenaje, etc: 0,75.
- Zonas deportivas: 0,8 - 0,95.

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

9.29-1 Se desea iluminar una pista de tenis de dimensiones 24×11 m, rodeada de un borde de 5 m de ancho. Se utilizan reflectores con lámpara de halogenuros metálicos de 400 W y 24 000 lm. El coeficiente de utilización es de 0,6 y el factor de conservación 0,7. Si se desea una iluminación media de 200 lux, calcular:

a) Flujo útil necesario.

b) Número de proyectores.

a) El flujo útil necesario sobre la pista $\Phi_u = E\,S = 200 \cdot 24 \cdot 11 = 52\,800$ lm

b) El flujo luminoso total $\Phi_t = \dfrac{\Phi_u}{\eta f_c} = \dfrac{52\,800}{0{,}6 \cdot 07} = 125\,714$ lm

El número de proyectores necesarios $n_p = \dfrac{\Phi_t}{\Phi_p} = \dfrac{125\,714}{24\,000} = 5{,}24 \approx 6$ proyectores

9.29-2 Calcular el número de proyectores necesario para iluminar la fachada de un edificio de superficie 240 m^2 y obtener una iluminación media de 100 lux, considerando un factor de utilización de 0,7 y un factor de conservación de 0,8. Los proyectores utilizan lámparas de 24 000 lm.

Solución: 2 proyectores.

9.29-3 Se desea iluminar un espacio abierto de superficie 29x72 m mediante proyectores que contienen cada uno una lámpara de vapor de sodio a alta presión 250 W, 25 000 lm. para una iluminancia media de 40 lux, calcular el número de proyectores necesarios, considerando un coeficiente de utilización de 0,6 y un factor de conservación de 0,7.

Solución: 8 proyectores.

© Ediciones Paraninfo

9.30. MANTENIMIENTO DE LAS INSTALACIONES DE ALUMBRADO

1) *Inspección de la instalación.* Se programan inspecciones periódicas, comprobando:
   - Para cada equipo de luz: aspecto de los conductores, apriete de tornillos y aspecto de los elementos del equipo auxiliar de las lámparas.
   - Para el cuadro de mando: interruptores horarios, contactores y elementos de protección. Con menor frecuencia medidas sobre aislamiento, resistencia de puesta a tierra y factor de potencia.
2) *Limpieza.* Se establecen programas de periodicidad de limpieza de las luminarias, nunca superior a un año (según la NTE-IEI). Las lámparas se limpian preferiblemente en seco. Las luminarias se limpian mediante paño con agua jabonosa. Para las luminarias de aluminio se utilizan soluciones jabonosas ni muy alcalinas ni muy ácidas.
3) *Reposición.* La reposición de las lámparas puede realizarse de forma individual, cuando se produce el fallo, pero es preferible realizarla por grupos según la vida media mínima, según un plan de reposición.
   Para elaborar un plan de reposición es necesario considerar la depreciación del flujo y la vida media de las lámparas.

En el alumbrado exterior la comprobación de la iluminación se realizará con luxómetro, por personal técnico, al menos una vez al año (según NTE-IEE).

Durante el mantenimiento, para la limpieza y reposición, se desconecta la instalación. Las herramientas estarán aisladas con grado de aislamiento II o alimentadas con tensión inferior a 50 V.

© Ediciones Paraninfo

PROBLEMAS DE RECAPITULACIÓN

P.9-1. Calcular el flujo luminoso que recibe una superficie de 50 m^2 si la iluminación sobre ella es en cualquier punto de la misma 200 lx.

Solución: 10 000 lm.

P.9-2. Calcular que intensidad luminosa debe tener un foco en la dirección de un punto, situado a una distancia horizontal de 9 m de la vertical de la luminaria, que está a una altura de 8 m, para obtener la iluminación de 20 lux en ese punto.

Solución: 4 365 cd.

P.9-3. Una luminaria situada a una altura de 10 m sobre la calzada, tiene una intensidad luminosa de 100 cd en cualquier dirección para un flujo de 1 000 lm. Calcular, si se utiliza una lámpara de 20 000 lm, la iluminancia sobre la calzada:

a) En la vertical de la luminaria.
b) En un punto situado a 12 m de la vertical de la luminaria.

Solución: a) 20 lx; b) 5,25 lx.

P.9-4. El valor de una curva isolux, para luminaria de 1 000 lm y altura 1 m, tiene un valor de 20 lx. Calcular el valor de iluminación de esa curva, cuando la luminaria se coloca a una altura de 12 m y con lámpara de 45 000 lm.

Solución: 6,25 lx.

P.9-5. Un local de techo y paredes de color claro y dimensiones 18 m de largo, 9 m de ancho y 3 m de alto se ilumina uniformemente con 8 luminarias de dos tubos fluorescentes de 36 W, 3 000 lm cada uno. El alumbrado es directo. Calcular:

a) Flujo luminoso total.
b) Flujo luminoso útil considerando un rendimiento de la iluminación de 0,5
c) Iluminación media sobre el plano de trabajo.

Solución: a) 48 000 lm; b) 24 000 lm; c) 148 lx.

P.9-6. En la iluminación de un local industrial de 40x20 m se colocan a 5 m de altura lámparas de vapor de mercurio de 400 W y 23 000 lm, para conseguir a una altura del suelo de 0,8 m una iluminación de 300 lux. Los factores de reflexión de techo, paredes y plano de utilización son: 0,7, 0,5 y 0,3. El rendimiento de la luminaria es de 0,8 y el factor de conservación 0,8. Calcular:

a) Índice del local.
b) Rendimiento del local utilizando la tabla 9.10.
c) Número de luminarias necesarias.

Solución: a) 3,17; b) 1,06; c) 16 luminarias.

© Ediciones Paraninfo

P.9-7. En una calle de 10 m de ancho se colocan luminarias unilateralmente, separadas entre sí 34 m, sobre una acera. Si se desea obtener una iluminación media de 20 lux y el coeficiente de utilización es 0,4, calcular el flujo necesario por foco.

Solución: 17 000 lm.

P.9-8. Para iluminación de una vía de 17 m de ancho se utilizan bilateralmente pareadas luminarias asimétricas cerradas con lámparas de vapor de sodio 250 W, 23 500 lm, colocadas sobre báculos de 9 m, con la vertical de la luminaria sobre la orilla de la calzada. Considerando un factor de utilización de la luminaria de 0,43 y un coeficiente de conservación de 0,75, calcular la distancia entre luminarias para una iluminación media de 30 lux.

Solución: 29,7 m.

P.9-9. Un alumbrado público con 16 lámparas de 250 W, 230 V, está alimentado con una línea trifásica 400/230 V. Las lámparas se reparten sobre las tres fases y están separadas entre sí 35 m. El tramo inicial de la línea es de 100 m y la caída de tensión máxima 2,5 %. Los conductores son de cobre, unipolares, aislados con XLPE, 0,6/1 kV, en instalación enterrada bajo tubo. Calcular la sección de los conductores si la línea es de sección uniforme:

a) Sin tener en cuenta la intensidad que circula por el neutro.

b) Considerando el circuito monofásico de la fase más cargada.

Solución: a) 16 mm^2; b) 35 mm^2.

P.9-10. Para iluminar una superficie de 320 m^2 se utilizan 2 reflectores con lámpara de vapor de sodio de 24 000 lm. El coeficiente de utilización es de 0,65 y el factor de conservación 0,75. Calcular la iluminación media.

Solución: 73 lx.

© Ediciones Paraninfo

A

CORRIENTE ALTERNA

A.1. CORRIENTE ALTERNA

Es una corriente eléctrica que se repite cambiando de sentido periódicamente. La corriente alterna más utilizada es la que realiza un ciclo de valores senoidales.

A.2. PERÍODO, FRECUENCIA Y ALTERNANCIA DE LA CORRIENTE ALTERNA

Período: Es el tiempo mínimo T, que tarda la corriente en repetir sus valores. En el tiempo de un período la corriente realiza una oscilación completa o ciclo.

Frecuencia: Es el número de ciclos f, realizados en un segundo.

La frecuencia es la inversa del período. $f = \frac{1}{T}$

El período por segundo recibe el nombre de **hercio** o hertz (Hz).

Alternancia: Cuando la corriente alterna. circula en un sentido realiza una alternancia. En cada período hay dos alternancias, una que consideramos positiva y otra negativa.

A.3. VALORES CARACTERÍSTICOS DE LAS MAGNITUDES ALTERNAS

Valor instantáneo: Es el valor (i o v), que toma la intensidad de la corriente o la tensión en un instante.

Valor máximo: Es el mayor valor ($I_{máx}$ o $V_{máx}$) que toma la intensidad de corriente o la tensión en una alternancia. Se llama también amplitud.

Valor medio: Es la media aritmética de los valores instantáneos de intensidad o tensión en una alternancia. El valor medio de una intensidad de corriente alterna, es el valor I_m que transporta la misma carga en el mismo tiempo que una corriente continua de igual intensidad.

El valor medio de la intensidad de corriente alterna senoidal en función del valor máximo es:

$$I_m = \frac{2 I_{máx}}{\pi} = 0{,}636\, I_{máx}$$

El valor medio de la tensión alterna senoidal en función del valor máximo es, de forma análoga que para la intensidad:

$$V_m = \frac{2 V_{máx}}{\pi} = 0{,}636\, V_{máx}$$

© Ediciones Paraninfo

Valor eficaz: Matemáticamente es la raíz cuadrada de la media aritmética de los cuadrados de valores instantáneos de intensidad de corriente o tensión durante un período. El valor eficaz es el valor (I) de una intensidad de corriente alterna que produce en un circuito la misma cantidad de calor por efecto Joule que una corriente continua de igual intensidad.

El valor eficaz de la intensidad de corriente alterna senoidal en función del valor máximo es:

$$I = \frac{I_{máx}}{\sqrt{2}} = 0{,}707\, I_{máx}$$

El valor eficaz (V)de una tensión alterna senoidal en función del valor máximo es, de forma análoga que para la intensidad:

$$V = \frac{V_{máx}}{\sqrt{2}} = 0{,}707\, V_{máx}$$

Se llama *factor de forma* a la relación entre el valor eficaz y el valor medio; para una tensión o intensidad alterna senoidal vale siempre 1,11

$$\frac{V}{V_m} = \frac{\frac{V_{máx}}{\sqrt{2}}}{\frac{2V_{máx}}{\pi}} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1{,}11$$

A.4. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE UNA MAGNITUD ALTERNA SENOIDAL

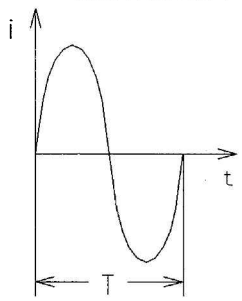


Fig. A.1

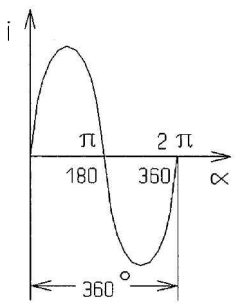


Fig. A.2

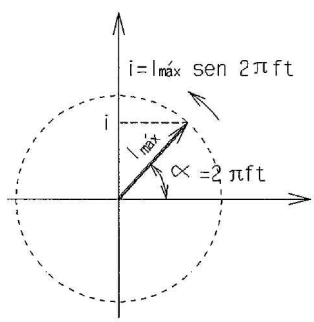


Fig. A.3

1) *Representación cartesiana*: Se representa mediante senoides.
   - En función del tiempo (fig. A.1): se toma el valor de la magnitud en ordenadas y el del tiempo en abscisas.
   - En función del ángulo (fig. A.2): se toma el valor de la magnitud en ordenadas y el del ángulo en abscisas; teniendo en cuenta que al tiempo de un período le corresponde un ángulo de 360°.

© Ediciones Paraninfo

2) *Representación vectorial*: Se representa por un vector giratorio o fasor (fig.A.3), de módulo el valor máximo de la magnitud, y que gira con movimiento uniforme describiendo una rotación completa en el tiempo de un período; con velocidad angular.

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

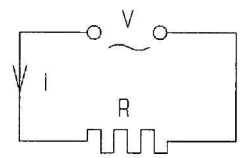
En los cálculos se suele representar el vector con el módulo del valor eficaz.

Dos magnitudes alternas están en fase cuando tienen en el mismo instante sus valores máximos y mínimos. Están desfasadas un ángulo φ o un tiempo t, cuando sus valores máximos y mínimos están desfasados ese ángulo o ese tiempo.

A.5. CIRCUITOS SIMPLES DE CORRIENTE ALTERNA

■ Circuito con resistencia óhmica

Un circuito tiene sólo resistencia óhmica cuando está desprovisto de autoinducción y capacidad. Al conectar una resistencia R a una tensión alterna senoidal de valor eficaz V y frecuencia f, como indica la figura A.4:



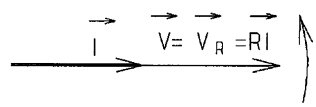


Fig. A.4

- Por la resistencia circula una corriente alterna senoidal de frecuencia f e intensidad eficaz:

$$I = \frac{V}{R}$$

- La intensidad de corriente está en fase con la tensión aplicada.
- La potencia consumida por efecto Joule en la resistencia se llama potencia activa P y se mide en vatios.

$$P = RI^2 = V_R I$$

DEMOSTRACIÓN

La intensidad en valor instantáneo

$$i = \frac{v}{R} = \frac{V_{máx} \operatorname{sen} 2\pi ft}{R} = \frac{V_{máx}}{R} \operatorname{sen} 2\pi ft = I_{máx} \operatorname{sen} 2\pi ft$$

La intensidad máxima $I_{máx} = \dfrac{V_{máx}}{R}$; $\sqrt{2}\, I = \dfrac{\sqrt{2}\, V}{R}$

Entonces, la intensidad eficaz $I = \dfrac{V}{R}$

■ Circuito con autoinducción

Un circuito tiene sólo autoinducción cuando está desprovisto de resistencia óhmica y capacidad. Al conectar una autoinducción de coeficiente L a una tensión alterna senoidal de valor eficaz V y frecuencia f (fig. A.5):

© Ediciones Paraninfo

- Por la autoinducción circula una corriente alterna senoidal de frecuencia f e intensidad eficaz:

$$I = \frac{V}{2\pi fL}$$

El valor $X_L = 2\pi fL$ se denomina reactancia de autoinducción o inductancia y se mide en ohmios. Es la oposición que presenta la autoinducción a la circulación de la corriente alterna.

- La intensidad de corriente está desfasada en retraso 90° (un cuarto de período) respecto a la tensión aplicada.
- La potencia consumida por la autoinducción, se llama potencia reactiva Q_L y se mide en voltiamperios reactivos (VAr).

$$Q_L = X_L I^2 = V_L I$$

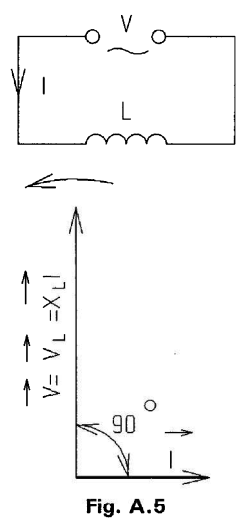


Fig. A.5

DEMOSTRACIÓN

En la autoinducción la intensidad de corriente es alterna variando de $-I_{máx}$ a $I_{máx}$ en el tiempo de medio período. La variación media de la intensidad es:

$$\frac{2I_{máx}}{\frac{T}{2}} = \frac{4I_{máx}}{T} = 4fI_{máx}$$

La tensión media en la autoinducción es igual a la variación media de flujo magnético, y como el flujo está relacionado con la intensidad por el coeficiente de autoinducción:

$$L = \frac{\Phi}{I}$$

La tensión media es igual al coeficiente de autoinducción por la variación media de la intensidad de corriente:

$$V_m = 4LfI_{máx}$$

Por la relación entre valores medios y máximos en funciones senoidales:

$$V_{máx} = \frac{\pi}{2} V_m = 2\pi fLI_{máx}$$

La tensión eficaz $V = 2\pi fLI = X_L I$

■ Circuito con capacidad

Un circuito tiene sólo capacidad cuando está desprovisto de resistencia óhmica y de autoinducción. Al conectar un condensador de capacidad C a una tensión alterna senoidal de valor eficaz V y frecuencia f (fig. A.6):

- Por el dieléctrico del condensador no circula corriente eléctrica; pero la influencia eléctrica entre las dos armaduras transmite la variación de tensión y el condensador se carga y descarga alternativamente. Por el circuito pasa una corriente alterna senoidal de frecuencia f y valor eficaz:

© Ediciones Paraninfo

$$I = \frac{V}{\frac{1}{2\pi fC}}$$

Se llama reactancia de capacidad o capacitancia X_C:

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC}$$

Esta reactancia se mide en ohmios y representa la oposición que ofrece la capacidad a la circulación de la corriente alterna.

- La intensidad de corriente alterna está desfasada en adelanto 90° (un cuarto de período) respecto a la tensión aplicada.
- La potencia consumida por el condensador se utiliza para la carga del mismo, se llama potencia reactiva Q_C y se mide en voltiamperios reactivos (Var).

$$Q_C = X_C I^2 = V_C I$$

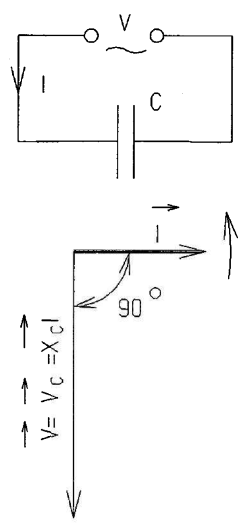


Fig. A.6

DEMOSTRACIÓN

En el circuito de corriente alterna senoidal, el condensador se carga desde cero a su valor máximo $Q_{máx}$ en un cuarto de período, por lo que la intensidad media será:

$$I_m = \frac{Q_{máx}}{\frac{T}{4}} = \frac{4Q_{máx}}{T} = 4fQ_{máx}$$

La capacidad del condensador es la relación entre la carga y la tensión:

$$C = \frac{Q_{máx}}{V_{máx}}$$

La intensidad media de carga $I_m = 4fCV_{máx}$

Por la relación entre valores medios y máximos en funciones senoidales:

$$I_{máx} = \frac{\pi}{2} I_m = 2\pi fCV_{máx}$$

La intensidad eficaz $I = 2\pi fCV = \frac{V}{\frac{1}{2\pi fC}} = \frac{V}{X_C}$

A.6. CIRCUITO SERIE DE CORRIENTE ALTERNA

Al conectar un circuito con varias resistencias, reactancias y capacidades en serie a una tensión alterna senoidal de valor eficaz V y frecuencia f:

- Por el circuito pasa una corriente alterna senoidal de frecuencia f e intensidad eficaz:

© Ediciones Paraninfo

$$I = \frac{V}{\sqrt{R_t^2 + (X_{Lt} - X_{Ct})^2}}$$

R_t: Suma de las resistencias óhmicas.
X_{Lt}: Suma de reactancias de autoinducción.
X_{Ct}: Suma de reactancias de capacidad.

- La impedancia del circuito es el valor $Z_t = \sqrt{R_t^2 + (X_{Lt} - X_{Ct})^2}$
- La intensidad de corriente está desfasada un ángulo φ respecto a la tensión.

$$\varphi = \text{ang tg} \frac{X_{Lt} - X_{Ct}}{R_t}$$

- La potencia que consume el circuito se divide en:
  - Potencia activa $P = R_t I^2 = VI\cos\varphi$
  - Potencia reactiva $Q = (X_{Lt} - X_{Ct})\, I^2 = VI\,\text{sen}\,\varphi$
  - Potencia aparente $S = Z_t I^2 = VI$

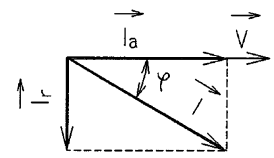


Fig. A.7

La relación entre las tres potencias $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$

- La intensidad de corriente puede considerarse analíticamente formada por dos componentes perpendiculares entre sí (fig. A.7):
  - Intensidad activa I_a en fase con la tensión
  - Intensidad reactiva I_r desfasada 90° respecto a la tensión.

$$I_a = I\cos\varphi$$
$$I_r = I\,\text{sen}\,\varphi$$

La intensidad es la suma vectorial de las dos componentes:

$$\vec{I} = \vec{I}_a + \vec{I}_r; \quad I = \sqrt{I_a^2 + I_r^2}$$

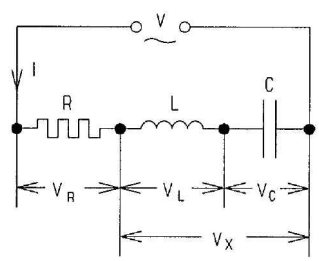


Fig. A.8

A.7. CONSTRUCCIONES GRÁFICAS

Considerando un circuito con resistencia, autoinducción y capacidad en serie (fig. A.8), se pueden realizar las gráficas siguientes:

- Triángulo de tensiones: La representación vectorial de las tensiones (fig. A.9) forma el triángulo de tensiones.

$$\vec{V} = \vec{V}_R + \vec{V}_L + \vec{V}_C = \vec{V}_R + \vec{V}_X$$

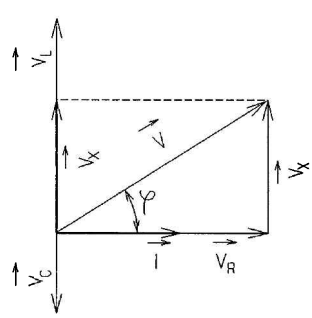


Fig. A.9

© Ediciones Paraninfo

Tensión activa $V_R = RI = V\cos\varphi$

Tensión reactiva $V_X = (X_L - X_C)I = V\operatorname{sen}\varphi$

Tensión aplicada al circuito $V = ZI = \sqrt{V_R^2 + V_X^2}$

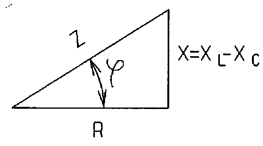


Fig. A.10

- Triángulo de resistencias: Dividiendo los tres lados del triángulo de tensiones por el valor de la intensidad se obtiene (fig. A.10), el triángulo de resistencias.

Resistencia óhmica $R = Z\cos\varphi$

Reactancia total $X = X_L - X_C = Z\operatorname{sen}\varphi$

Impedancia del circuito $Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$

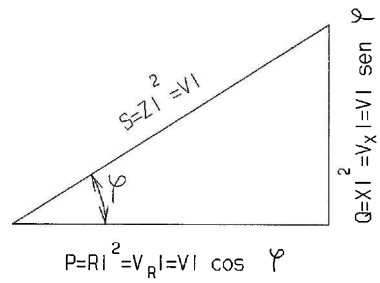


Fig. A.11

- Triángulo de potencias: Multiplicando los tres lados del triángulo de tensiones por el valor de la intensidad se obtiene el triángulo de potencias (fig. A.11).

A.8. PRINCIPIO DE SEPARACIÓN DE POTENCIAS

En una red de corriente alterna de frecuencia constante se conservan por separado las potencias activas y reactivas (teorema de Boucherot).

- La potencia activa total de un conjunto de receptores conectados en la red es igual a la suma aritmética de sus potencias activas.

$$P = P_1 + P_2 + \ldots.$$

- La potencia reactiva total de un conjunto de receptores conectados a la red es igual a la suma algebraica de sus potencias reactivas.

$$Q = Q_1 + Q_2 + \ldots$$

La potencia reactiva de capacidad tiene distinto signo que la reactiva de autoinducción.

- La potencia aparente total del conjunto de receptores:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

A.9. CIRCUITO PARALELO DE CORRIENTE ALTERNA

Al conectar varios receptores en paralelo a una tensión alterna senoidal de valor eficaz V y frecuencia f (fig. A.12):

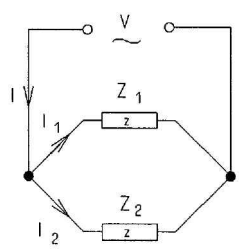


Fig. A.12

© Ediciones Paraninfo

- Por los receptores circula corriente alterna senoidal, siendo el valor de la intensidad total I, según la primera ley de kirchhoff[1], igual a la suma vectorial de las intensidades eficaces que circulan por cada receptor (fig. A.13).

$$\vec{I} = \vec{I}_1 + \vec{I}_2; \quad I = \sqrt{I_a^2 + I_r^2}$$

La intensidad activa total I_a es igual a la suma de las intensidades activas que circulan por cada receptor.

$$I_a = I_{a1} + I_{a2} = I_1 \cos\varphi_1 + I_2 \cos\varphi_2$$

La intensidad reactiva total I_r es igual a la suma de las intensidades reactivas que circulan por cada receptor.

$$I_r = I_{r1} + I_{r2} = I_1 \operatorname{sen}\varphi_1 + I_2 \operatorname{sen}\varphi_2$$

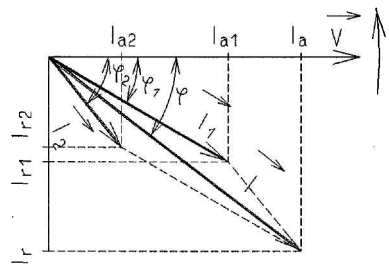


Fig. A.13

- La intensidad de corriente está desfasada un ángulo φ respecto a la tensión aplicada.

$$\varphi = \text{ángtg}\,\frac{I_r}{I_a}$$

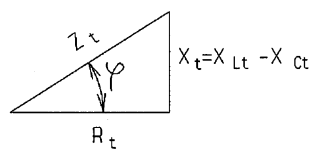


Fig. A.14

- Impedancia total del circuito (fig. A.14): $Z_t = \dfrac{V}{I}$

Resistencia total del circuito $R_t = Z_t \cos\varphi$

Reactancia total del circuito: $X_t = X_{Lt} - X_{Ct} = Z_t \operatorname{sen}\varphi$

- La potencia consumida por el circuito se divide en:
  - Potencia activa $P = VI\cos\varphi = P_1 + P_2 = VI_1\cos\varphi_1 + VI_2\cos\varphi_2$
  - Potencia reactiva $Q = VI\operatorname{sen}\varphi = Q_1 + Q_2 = VI_1\operatorname{sen}\varphi_1 + VI_2\operatorname{sen}\varphi_2$
  - Potencia aparente $S = VI = \sqrt{P^2 + Q^2}$

A.10. RESONANCIA

■ Resonancia en un circuito serie de corriente alterna

Un circuito de resistencia R, autoinducción L y capacidad C en serie, conectado a una tensión alterna senoidal de valor eficaz V y frecuencia f, está en resonancia (fig. A.15), cuando la intensidad de corriente alterna que lo recorre está en fase con la tensión aplicada. Esto ocurre cuando el valor de la reactancia de

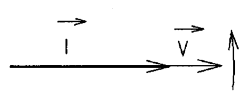


Fig. A.15

[1]Las leyes de Kirchhoff pueden aplicarse en corriente alterna representando los valores de las tensiones, fuerzas electromotrices e intensidades en forma vectorial.

© Ediciones Paraninfo

autoinducción es igual al valor de la reactancia de capacidad $X_L = X_C$.

La intensidad tomará un valor muy elevado al estar limitada solamente por la resistencia óhmica del circuito.

$$I = \frac{V}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}} = \frac{V}{\sqrt{R^2 + 0}} = \frac{V}{R}$$

Si la resistencia es muy pequeña (prácticamente nula) el circuito actúa, cuando está en resonancia, como un cortocircuito.

La frecuencia a la que se verifica la resonancia es $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$

DEMOSTRACIÓN

Si $X_L = X_C$, se verifica: $2\pi fL = \frac{1}{2\pi fC}$; $f^2 = \frac{1}{4\pi^2 LC}$; $f = \sqrt{\frac{1}{4\pi^2 LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$

■ **Resonancia en un circuito paralelo de corriente alterna**

Una bobina de resistencia R y coeficiente de autoinducción L, en paralelo con un condensador de capacidad C, conectados a una tensión alterna senoidal de valor eficaz V y frecuencia f, están en resonancia cuando la intensidad total absorbida I está en fase con la tensión aplicada (fig. A.16).

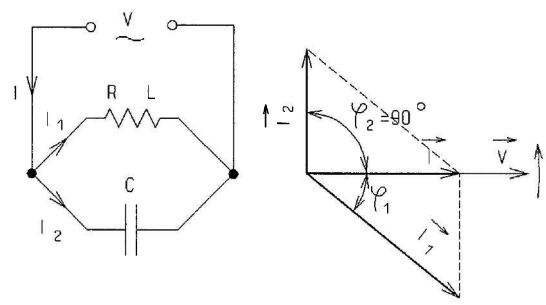


Fig. A.16

Cuando el circuito está en resonancia la intensidad total absorbida es muy pequeña; el circuito tiene una impedancia muy grande.

Si la resistencia de la bobina es muy pequeña (prácticamente nula), la resonancia tiene lugar cuando la reactancia de autoinducción es igual a la reactancia de capacidad y la frecuencia a la cual se verifica la resonancia se calcula igual que en el circuito serie. La intensidad total absorbida es nula y el circuito actúa como si estuviese abierto (impedancia infinita).

A.11. CORRIENTE ALTERNA TRIFÁSICA

Es un conjunto de tres corrientes alternas de iguales características y desfasadas entre sí un tercio de período o 120° ($2\pi/3$ radianes).

© Ediciones Paraninfo

A.12. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE MAGNITUDES TRIFÁSICAS SENOIDALES

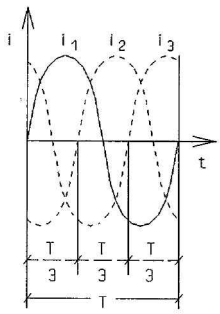


Fig. A.17

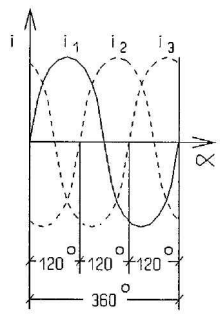


Fig. A.18

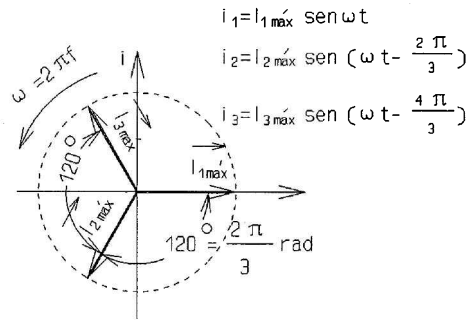


Fig. A.19

1) *Representación cartesiana*: Se representa mediante tres senoides desfasadas 120° o un tercio de período.
   - En función del tiempo (fig. A.17): se toma el valor de la magnitud en ordenadas y el tiempo en abscisas.
   - En función del ángulo: se toma el valor de la magnitud en ordenadas y el del ángulo en abscisas, teniendo en cuenta que al tiempo de un período le corresponden 360° o 2π radianes (fig. A.18).
2) *Representación vectorial*: Se representan las magnitudes mediante tres vectores giratorios iguales (fasores), de módulo el valor máximo de la magnitud y que giran con movimiento uniforme (fig. A.19), realizando una rotación en el tiempo de un período con velocidad angular:

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi \text{ rad}}{T \text{ s}}$$

En la práctica se representan los vectores con módulo del valor eficaz.
La suma de las tres magnitudes del sistema trifásico en cualquier instante es nula:

$$i_1 + i_2 + i_3 = 0$$

A.13. CONEXIÓN EN ESTRELLA

Tanto un receptor como un generador trifásico pueden conectarse en estrella en un punto común, llamado neutro (fig. A.20). Los tres extremos libres de las fases se conectan a tres conductores llamados activos o de fase y el punto común puede conectarse a un conductor llamado neutro.

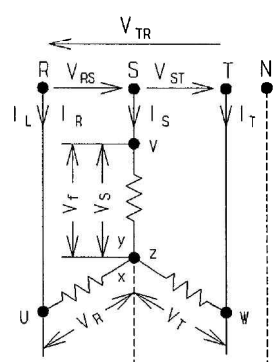


Fig. A.20

© Ediciones Paraninfo

Se llama tensión de línea V_L a la tensión existente entre los conductores o hilos de fase de una línea trifásica.

Se llama tensión de fase V_f a la tensión existente entre extremos de una fase.

Se llama intensidad de línea I_L a la intensidad que circula por cada conductor o hilo de fase de una línea trifásica.

Se llama intensidad de fase I_f a la intensidad que circula por una fase.

■ **Relación de tensiones y de intensidades**

La conexión se llama equilibrada cuando son iguales las tres fases. En una conexión estrella equilibrada, las relaciones entre valores de línea y de fase son fijas.

La intensidad de línea es igual a la de fase.

$$I_L = I_f; \quad I_R = I_S = I_T = I_L = I_f$$

La tensión de línea es $\sqrt{3}$ veces la de fase (fig. A.21).

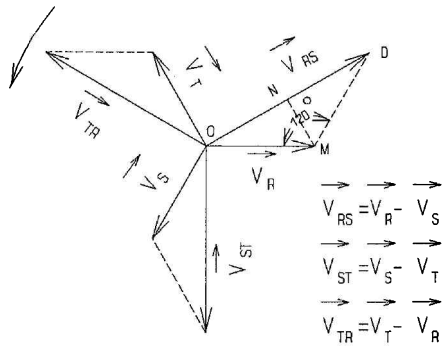


Fig. A.21

$$V_L = \sqrt{3}\, V_f; \quad V_{RS} = V_{ST} = V_{TR} = V_L; \quad V_R = V_S = V_T = V_f$$

DEMOSTRACIÓN

En el triángulo ONM de la figura A.21, se deduce:

$$\frac{V_L}{2} = V_f \operatorname{sen} 60° = V_f \frac{\sqrt{3}}{2}; \quad V_L = \sqrt{3}\, V_f$$

A.14. CONEXIÓN EN TRIÁNGULO

Tanto un receptor como un generador trifásico pueden conectarse en triángulo, uniendo el final de una fase con el principio de la siguiente (fig. A.22), y el final de la tercera con el principio de la primera para cerrar el triángulo.

Las conexiones entre las fases se conectan a tres conductores llamados activos o de fase.

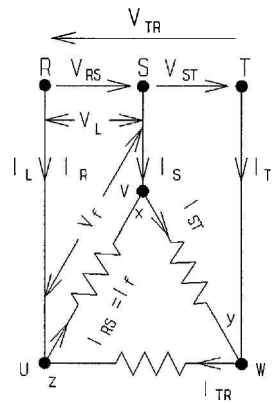


Fig. A.22

■ **Relación de tensiones y de intensidades**

En la conexión triángulo equilibrada las relaciones entre valores de línea y de fase son fijas.

La tensión de línea es igual a la de fase. $V_L = V_f; \quad V_{RS} = V_{ST} = V_{TR} = V_L = V_f$

La intensidad de línea es $\sqrt{3}$ veces la de fase (fig. A.23).

$$I_L = \sqrt{3}\, I_f$$

$$I_R = I_S = I_T = I_L; \quad I_{RS} = I_{ST} = I_{TR} = I_f$$

© Ediciones Paraninfo

DEMOSTRACIÓN

Del triángulo ONM de la figura A. 23, se deduce:

$$\frac{I_L}{2} = I_f \operatorname{sen} 60° = I_f \frac{\sqrt{3}}{2}; \quad I_L = \sqrt{3}\, I_f$$

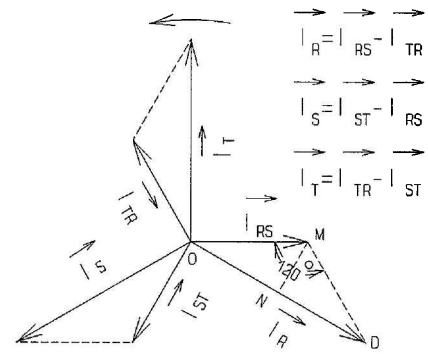


Fig. A.23

A.15. POTENCIA EN CORRIENTE ALTERNA TRIFÁSICA

La potencia de un sistema trifásico es la suma de potencias de las tres fases. Si el sistema es equilibrado:

- Potencia activa: $P = 3\, V_f I_f \cos\varphi = \sqrt{3}\, V_L I_L \cos\varphi$
- Potencia reactiva: $Q = 3\, V_f I_f \operatorname{sen}\varphi = \sqrt{3}\, V_L I_L \operatorname{sen}\varphi$
- Potencia aparente: $S = 3\, V_f I_f = \sqrt{3}\, V_L I_L$

Siendo φ el ángulo de desfase entre la tensión y la intensidad de fase.

La relación entre las tres potencias $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$

En el cálculo de las potencias se suelen utilizar valores compuestos o de línea.

La potencia activa del sistema trifásico equilibrado es tres veces la potencia de una fase.

DEMOSTRACIÓN

En estrella $V_f = \dfrac{V_L}{\sqrt{3}}$; $I_f = I_L$. La potencia activa $P = 3\dfrac{V_L}{\sqrt{3}} I_L \cos\varphi = \sqrt{3}\, V_L I_L \cos\varphi$

En triángulo $V_f = V_L$; $I_f = \dfrac{I_L}{\sqrt{3}}$. La potencia activa $P = 3 V_L \dfrac{I_L}{\sqrt{3}} \cos\varphi = \sqrt{3}\, V_L I_L \cos\varphi$

De forma análoga se pueden deducir las fórmulas de la potencia reactiva y de la potencia aparente.

A.16. CÁLCULO DE UN CIRCUITO TRIFÁSICO EQUILIBRADO

El circuito trifásico equilibrado en tensiones e intensidades se calcula a partir de una sola fase, como un circuito monofásico:

$$I_f \text{ (intensidad de fase)} = \frac{V_f \text{ (tensión de fase)}}{Z_f \text{ (impedancia de fase)}}$$

De los valores de tensiones e intensidades de fase se obtienen los valores de línea, según el tipo de conexión del circuito.

© Ediciones Paraninfo

A.17. APLICACIÓN DE LOS NÚMEROS COMPLEJOS AL CÁLCULO DE CIRCUITOS EN CORRIENTE ALTERNA SENOIDAL

En el triángulo de resistencias de un circuito de corriente alterna senoidal podemos representar la impedancia Z por el complejo[2] $Z=R+Xj$ (fig. A.24).

En cualquier caso, representando la tensión V y la intensidad I por números complejos, la impedancia del circuito está dada, según la ley de Ohm, por el cociente:

$$Z = \frac{V}{I}$$

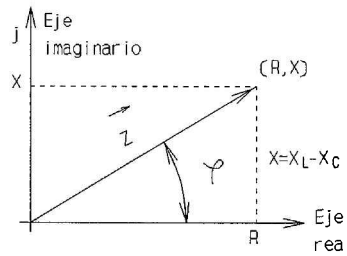


Fig. A.24

Se pueden aplicar en los circuitos de corriente alterna senoidal las mismas leyes que en los circuitos de corriente continua, con la particularidad de emplear números complejos para representar magnitudes en lugar de números reales.

La impedancia total o equivalente Z de la conexión de impedancias de un circuito, en forma de números complejos (fig. A.25), se calcula de la siguiente manera:

a) Impedancias en serie:

$$Z = Z_1 + Z_2 + Z_3$$

b) Impedancias en paralelo:

$$Z = \frac{1}{\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_3}}$$

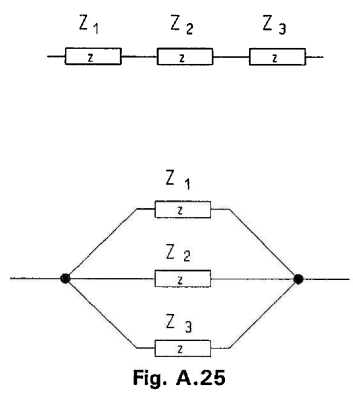


Fig. A.25

[2]La norma UNE 21405, indica como notación para la parte imaginaria *jX*. En el libro se mantiene la notación, utilizada habitualmente en matemáticas para representar números complejos, indicando el número y, a continuación, la unidad imaginaria.

© Ediciones Paraninfo

PROBLEMAS RESUELTOS

A.1. A una red de corriente alterna senoidal de 230 V de tensión y frecuencia 50 Hz se conecta una estufa eléctrica de resistencia de 25 Ω. Calcular:
a) La intensidad eficaz que circula por la estufa.
b) Valor máximo de la intensidad.
c) Potencia que consume.
Nota: Cuando no se especifica expresamente, los valores de las magnitudes alternas son los eficaces.

a) La intensidad $I = \dfrac{V_R}{R} = \dfrac{230}{25} = 9{,}2 \text{ A}$

b) El valor máximo de la intensidad $I_{máx} = \sqrt{2}\, I = \sqrt{2} \cdot 9{,}2 = 13 \text{ A}$

c) La potencia $P = RI^2 = V_R I = 25 \cdot 9{,}2^2 = 230 \cdot 9{,}2 = 2\,116 \text{ W}$

A.2. Una bobina de resistencia despreciable y coeficiente de autoinducción $L = 0{,}02$ H y se conecta a una tensión alterna senoidal de 150 V, 50 Hz. Calcular:
a) Reactancia de la bobina e intensidad de corriente que circula por ella.
b) Potencia reactiva que consume.
c) Potencia reactiva si la frecuencia de la línea disminuye a 40 Hz.

a) La reactancia de la bobina $X_L = 2\pi fL = 2 \cdot 3{,}14 \cdot 50 \cdot 0{,}02 = 6{,}28\ \Omega$

La intensidad que circula por la bobina $I = \dfrac{V_L}{X_L} = \dfrac{150}{6{,}28} = 23{,}89 \text{ A}$

La potencia reactiva consumida:

$$Q_L = X_L I^2 = V_L I = 6{,}28 \cdot 23{,}89^2 = 150 \cdot 23{,}89 = 3\,584 \text{ VAr}$$

b) La reactancia de la bobina $X_L = 2\pi fL = 2 \cdot 3{,}14 \cdot 40 \cdot 0{,}02 = 5\ \Omega$

La intensidad que circula por la bobina $I = \dfrac{V_L}{X_L} = \dfrac{150}{5} = 30 \text{ A}$

La potencia reactiva consumida:

$$Q_L = X_L I^2 = V_L I = 150 \cdot 30 = 4\,500 \text{ VAr}$$

A.3. A una línea de corriente alterna senoidal de tensión 230 V, se conecta un condensador de 20 μF de capacidad. Calcular:
a) La reactancia del condensador, la intensidad y la potencia reactiva, si la frecuencia de la red es de 50 Hz.
b) Intensidad si la frecuencia de la red aumenta a 60 Hz.

a) La reactancia del condensador $X_C = \dfrac{1}{2\pi fC} = \dfrac{1}{2 \cdot 3{,}14 \cdot 50 \cdot 20 \cdot 10^{-6}} = 159{,}24\ \Omega$

La intensidad eficaz $I = \dfrac{V_C}{X_C} = \dfrac{230}{159{,}24} = 1{,}44 \text{ A}$

La potencia reactiva $Q_C = X_C I^2 = V_C I = 159{,}24 \cdot 1{,}44^2 = 230 \cdot 1{,}44 = 331 \text{ VAr}$

© Ediciones Paraninfo

b) La reactancia del condensador $X_C = \dfrac{1}{2\pi fC} = \dfrac{1}{2 \cdot 3{,}14 \cdot 60 \cdot 20 \cdot 10^{-6}} = 132{,}7\ \Omega$

La intensidad eficaz $I = \dfrac{V_C}{X_C} = \dfrac{230}{132{,}7} = 1{,}73$ A

A.4. Una bobina de resistencia $R=10\ \Omega$ y coeficiente de autoinducción $L=0{,}01$ H se conecta a una tensión alterna senoidal de 230 V, 50 Hz.Calcular:

a) Reactancia.
b) Impedancia del circuito.
c) Intensidad de corriente.
d) Ángulo de desfase entre la tensión aplicada al circuito y la intensidad.
e) Potencia activa, reactiva y aparente consumida.

a) La reactancia total $X = X_L - X_C$

$X_L = 2\pi fL = 2 \cdot 3{,}14 \cdot 50 \cdot 0{,}01 = 3{,}14\ \Omega$

$X_C = 0\ \Omega$

$X = 3{,}14 - 0 = 3{,}14\ \Omega$

b) La impedancia del circuito $Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{10^2 + 3{,}14^2} = 10{,}48\ \Omega$

c) La intensidad de corriente $I = \dfrac{V}{Z} = \dfrac{230}{10{,}48} = 21{,}95$ A

d) La tangente del ángulo de desfase $\operatorname{tg}\varphi = \dfrac{X_L - X_C}{R} = \dfrac{3{,}14}{10} = 0{,}314$

El ángulo de desfase entre la tensión y la intensidad $\varphi = 17{,}43° = 17°26'$; con retraso de la intensidad respecto a la tensión.

e) La potencia activa:

$P = RI^2 = VI\cos\varphi = 10 \cdot 21{,}95^2 = 230 \cdot 21{,}95 \cdot \cos 17{,}43° = 4\,818$ W

La potencia reactiva:

$Q = XI^2 = VI\,\operatorname{sen}\varphi = 3{,}14 \cdot 21{,}95^2 = 230 \cdot 21{,}95 \cdot \operatorname{sen} 17{,}43° = 1\,513$ VAr

La potencia aparente $S = ZI^2 = VI = 10{,}48 \cdot 21{,}95^2 = 230 \cdot 21{,}95 = 5\,049$ VA

A.5. Una resistencia de 100 Ω se conecta en serie con un condensador de 60 μF y con dos bobinas, una bobina de resistencia despreciable y coeficiente de autoinducción L=0,2 H y la otra de resistencia 200 Ω y coeficiente de autoinducción 0,04 H. La tensión aplicada es alterna senoidal de 400 V, 50 Hz. Calcular:

a) Impedancia total.
b) Intensidad de corriente.
c) Ángulo de desfase entre tensión e intensidad.
d) Potencias activa, reactiva y aparente totales.

a) La resistencia total $R_t = R_1 + R_2 = 100 + 200 = 300\ \Omega$

La reactancia de autoinducción:

$X_{Lt} = X_{L1} + X_{L2} = 2\pi fL_1 + 2\pi fL_2 = 2 \cdot 3{,}14 \cdot 50 \cdot 0{,}2 + 2 \cdot 3{,}14 \cdot 50 \cdot 0{,}04 = 75{,}36\ \Omega$

La reactancia total de capacidad $X_{Ct} = X_{C1}$

© Ediciones Paraninfo

$$X_{C1} = \frac{1}{2\pi f C_1} = \frac{1}{2 \cdot 3{,}14 \cdot 50 \cdot 60 \cdot 10^{-6}} = \frac{10^6}{2 \cdot 3{,}14 \cdot 50 \cdot 60} = 53{,}1\ \Omega$$

$$X_{Ct} = 53{,}1\ \Omega$$

La impedancia del circuito:

$$Z_t = \sqrt{R_t^2 + (X_{Lt} - X_{Ct})^2} = \sqrt{300^2 + (75{,}36 - 53{,}1)^2}$$

$$Z_t = \sqrt{300^2 + 22{,}26)^2} = \sqrt{90495{,}51} = 300{,}82\ \Omega$$

b) La intensidad de corriente $I = \frac{V}{Z_t} = \frac{400}{300{,}82} = 1{,}33$ A

c) La tangente del ángulo de desfase $\operatorname{tg}\varphi = \frac{X_L - X_C}{R} = \frac{22{,}26}{300} = 0{,}0742$

El ángulo de desfase entre la tensión y la intensidad $\varphi = 4{,}24° = 4°14'$; con retraso de la intensidad respecto a la tensión. El efecto de la autoinducción predomina sobre el de capacidad.

d) La potencia activa:

$$P = RI^2 = VI\cos\varphi = 300 \cdot 1{,}33^2 = 400 \cdot 1{,}33 \cdot \cos 4{,}24° = 531\ \text{W}$$

La potencia reactiva:

$$Q = XI^2 = VI\operatorname{sen}\varphi = 22{,}26^2 = 400 \cdot 1{,}33 \cdot \operatorname{sen} 4{,}24° = 39\ \text{VAr}$$

La potencia aparente:

$$S = ZI^2 = VI = 300{,}82 \cdot 1{,}33^2 = 400 \cdot 1{,}33 = 532\ \text{VA}$$

A.6. Una bobina de resistencia 0,5 Ω y coeficiente de autoinducción 0,1 H se conecta en serie con un condensador de 50 μF. Calcular:

a) Frecuencia de resonancia.

b) Si el circuito está en resonancia a la tensión 200 V, la intensidad de corriente.

a) La resonancia se produce cuando se verifica que $X_L = X_C$

$$2\pi f L = \frac{1}{2\pi f C};\quad f^2 = \frac{1}{4\pi^2 L C};\quad f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2 \cdot 3{,}14 \cdot \sqrt{0{,}1 \cdot 50 \cdot 10^{-6}}} = 71{,}2\ \text{Hz}$$

b) La intensidad en resonancia $I = \frac{V}{R} = \frac{200}{0{,}5} = 400$ A

A.7. A una línea eléctrica de corriente alterna senoidal de 230 V, 50 Hz, se conectan los siguientes receptores:

- Una estufa de 2 kW, 230 V.
- Un motor que consume 0,8 kW con factor de potencia (coseno del ángulo de desfase entre la intensidad de corriente y la tensión) de 0,8 inductivo.
- Una instalación de alumbrado que consume 600 W, con factor de potencia 0,86, inductivo.

Calcular:

a) Potencia activa, reactiva y aparente total.

b) Intensidad total.

c) Factor de potencia total.

© Ediciones Paraninfo

a) La potencia activa total $P = P_1 + P_2 + P_3 = 2 + 0{,}8 + 0{,}6 = 3{,}4$ kW

La potencia reactiva total $Q = Q_1 + Q_2 + Q_3$

Por ser la estufa una resistencia óhmica $Q_1 = 0$

Del triángulo de potencias del motor (fig. A.26):

$$Q_2 = P_2 \operatorname{tg} \varphi_2$$

$$\cos \varphi_2 = 0{,}8; \quad \varphi_2 = 36{,}87°$$

$$Q_2 = 0{,}8 \cdot \operatorname{tg} 36{,}87° = 0{,}8 \cdot 0{,}75 = 0{,}6 \text{ kVAr}$$

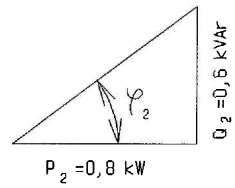


Fig. A.26

De forma análoga que para el motor, la potencia reactiva de la instalación de alumbrado:

$$\cos \varphi_3 = 0{,}86; \quad \varphi_2 = 30{,}68°$$

$$Q_3 = 0{,}6 \cdot \operatorname{tg} 30{,}68° = 0{,}6 \cdot 0{,}593 = 0{,}356 \text{ kVAr}$$

$$Q = 0 + 0{,}6 + 0{,}356 = 0{,}956 \text{ kVAr}$$

La potencia aparente total $S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{3{,}4^2 + 0{,}956^2} = 3{,}532$ kVA

b) La intensidad total se calcula a partir de la potencia aparente total:

$$S = VI; \quad I = \frac{S}{V} = \frac{3\,532}{230} = 15{,}36 \text{ A}$$

c) El factor de potencia total se calcula a partir de triángulo de potencias totales (fig. A.27).

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{3\,400}{3\,532} = 0{,}96$$

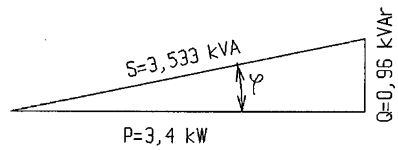


Fig. A.27

A.8. Una bobina de resistencia 100 Ω y coeficiente de autoinducción 0,05 H se conecta en paralelo con otra bobina de resistencia despreciable y coeficiente de autoinducción 0,2 H a una tensión alterna senoidal de 220 V, 50 Hz (fig. A.28). Calcular:

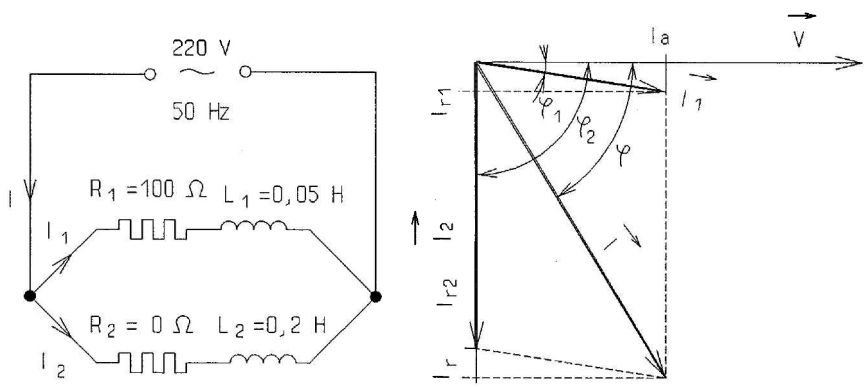


Fig. A.28

a) Intensidad que circula por cada bobina.
b) Intensidad total que consumen las dos bobinas.
c) Ángulo de desfase entre la tensión y la intensidad total.

© Ediciones Paraninfo

a) La intensidad por la primera bobina $I_1 = \dfrac{V}{Z_1}$

$$X_{L1} = 2\pi f L_1 = 2 \cdot 3{,}14 \cdot 50 \cdot 0{,}05 = 15{,}7\ \Omega$$
$$Z_1 = \sqrt{R_1^2 + X_{L1^2}} = \sqrt{100^2 + 15{,}7^2} = 101{,}23\ \Omega$$
$$I_1 = \frac{220}{101{,}23} = 2{,}17\ \text{A}$$

La intensidad que circula por la segunda bobina $I_2 = \dfrac{V}{Z_2}$

$$X_{L2} = 2\pi f L_2 = 2 \cdot 3{,}14 \cdot 50 \cdot 0{,}2 = 62{,}8\ \Omega$$
$$Z_2 = \sqrt{R_2^2 + X_{L2}{}^2} = \sqrt{0^2 + 62{,}8^2} = 62{,}8\ \Omega$$
$$I_2 = \frac{220}{62{,}8} = 3{,}5\ \text{A}$$

Las componentes de la intensidad en la primera bobina:

$$I_{a1} = I_1 \cos\varphi_1; \quad I_{r1} = I_1 \operatorname{sen}\varphi$$
$$\cos\varphi_1 = \frac{R_1}{Z_1} = \frac{100}{101{,}23} = 0{,}988; \quad \operatorname{sen}\varphi_1 = \frac{X_{L1}}{Z_1} = \frac{15{,}7}{101{,}23} = 0{,}155$$
$$I_{a1} = 2{,}17 \cdot 0{,}988 = 2{,}14\ \text{A}; \quad I_{r1} = 2{,}17 \cdot 0{,}155 = 0{,}34\ \text{A}$$

En la segunda bobina, con solo reactancia, la intensidad está desfasada con ángulo de 90° en retraso respecto a la tensión. Las componentes de la intensidad en la segunda bobina:

$$I_{a2} = I_2 \cos\varphi_2 = 0\ \text{A}; \quad I_{r2} = I_2 \operatorname{sen}\varphi_2 = 3{,}5\ \text{A}$$

b) La intensidad total $I = \sqrt{I_a^2 + I_r^2}$

$$I_a = I_{a1} + I_{a2} = 2{,}14 + 0 = 2{,}14\ \text{A}$$
$$I_r = I_{r1} + I_{r2} = 0{,}34 + 3{,}5 = 3{,}84\ \text{A}$$
$$I = \sqrt{2{,}14^2 + 3{,}84^2} = 4{,}4\ \text{A}$$

c) El ángulo de desfase entre la tensión y la intensidad total:

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{I_r}{I_a} = \frac{3{,}84}{2{,}14} = 1{,}794; \quad \varphi = 60°52'$$

A.9. Un receptor trifásico está formado por tres bobinas iguales, de resistencia 10 Ω y coeficiente de autoinducción 0,02 H cada una, conectadas en estrella a una línea trifásica de 400 V, 50 Hz (fig. A.29). Calcular:

a) Intensidad de línea.
b) Ángulo de desfase entre tensión e intensidad de fase.
c) Potencia activa, reactiva y aparente consumida.

a) La tensión de fase $V_f = \dfrac{V_L}{\sqrt{3}} = \dfrac{400}{\sqrt{3}} = 230\ \text{V}$

La impedancia de fase $Z_f = \sqrt{R_f^2 + (X_{Lf} - X_{Cf})^2}$

© Ediciones Paraninfo

$X_{Lf} = 2\pi fL = 2 \cdot 3{,}14 \cdot 50 \cdot 0{,}02 = 6{,}28\ \Omega$

$Z_f = \sqrt{10^2 + 6{,}28^2} = 11{,}81\ \Omega$

La intensidad de fase:

$$I_f = \frac{V_f}{Z_f} = \frac{230}{11{,}81} = 19{,}48\ \text{A}$$

La intensidad de línea en la conexión estrella es igual a la de fase. $I_L = I_f = 19{,}48$ A

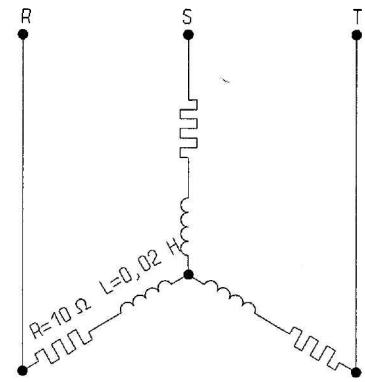


Fig. A.29

c) La tangente del ángulo de desfase:

$$\text{tg}\,\varphi = \frac{X_f}{R_f} = \frac{6{,}28}{10} = 0{,}628$$

El ángulo de desfase $\varphi = 32°8'$

d) La potencia activa:

$$P = \sqrt{3}\, V_L I_L \cos\varphi = \sqrt{3} \cdot 400 \cdot 19{,}48 \cdot 0{,}847 = 11\,431\ \text{W}$$

La potencia reactiva:

$$Q = \sqrt{3}\, V_L I_L \,\text{sen}\,\varphi = \sqrt{3} \cdot 400 \cdot 19{,}48 \cdot 0{,}532 = 7\,180\ \text{VAr}$$

La potencia aparente $S = \sqrt{3}\, V_L I_L = \sqrt{3} \cdot 400 \cdot 19{,}48 = 13\,496$ VA

A.10. Un receptor trifásico conectado en triángulo está formado por tres bobinas iguales de resistencia 20 Ω y coeficiente de autoinducción 0,08 H (fig. A.30). La línea de alimentación es trifásica de 400 V, 50 Hz. Calcular:

a) Intensidad de fase.
b) Intensidad de línea.
c) Ángulo de desfase entre tensión e intensidad de fase.
d) Potencia activa, reactiva y aparente.

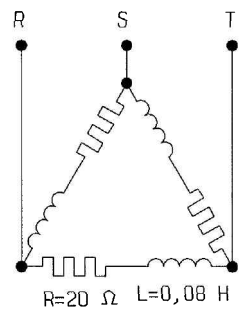


Fig. A.30

a) En la conexión triángulo la tensión de fase es igual a la de línea.

$$V_L = V_f = 400\ \text{V}$$

La impedancia de fase:

$$Z_f = \sqrt{R_r^2 + (X_{Lf} - X_{Cf})^2}$$

$X_{Lf} = 2\pi fL = 2 \cdot 3{,}14 \cdot 50 \cdot 0{,}08 = 25{,}12\ \Omega$

$Z_f = \sqrt{20^2 + 25{,}12^2} = 32{,}11\ \Omega$

b) La intensidad de fase $I_f = \dfrac{V_f}{Z_f} = \dfrac{400}{32{,}11} = 12{,}46$ A

c) La intensidad de línea $I_L = \sqrt{3}\, I_f = \sqrt{3} \cdot 12{,}46 = 21{,}58$ A

d) El factor de potencia $\cos\varphi = \dfrac{R_f}{Z_f} = \dfrac{20}{32{,}11} = 0{,}62286$

El ángulo de desfase $\varphi = 51{,}48°$

e) La potencia activa $P = \sqrt{3}\, V_L I_L \cos\varphi = \sqrt{3} \cdot 400 \cdot 21{,}58 \cdot 0{,}62286 = 9\,312$ W

© Ediciones Paraninfo

La potencia reactiva $Q = \sqrt{3}\, V_L I_L \operatorname{sen}\varphi = \sqrt{3}\cdot 400\cdot 21{,}58\cdot 0{,}7824 = 11\,698$ VAr

La potencia aparente $S = \sqrt{3}\, V_L I_L = \sqrt{3}\cdot 400\cdot 21{,}58 = 14\,951$ VA

A.11. En el circuito de la figura 31, calcular:

a) Impedancia total.

b) Intensidad total.

c) Intensidad que circula por cada una de las dos ramas en paralelo.

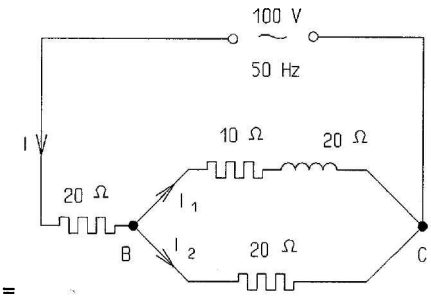


Fig. A.31

a) $\boldsymbol{Z}_1 = 10 + 20\,j = 22{,}36 \angle 63{,}43°$;
$\boldsymbol{Z}_2 = 20 + 0j = 20 \angle 0°$

La impedancia resultante entre B y C:

$$\boldsymbol{Z}_{BC} = \frac{1}{\frac{1}{10+20j} + \frac{1}{20+0j}} = \frac{(20+0j)(10+20j)}{(20+0j)+(10+20j)} =$$

$$\frac{200+400j}{30+20j} = \frac{(200+400j)(30-20j)}{900+400} = \frac{14\,000+8\,000j}{1\,300} = 10{,}77 + 6{,}15j = 12{,}4 \angle 29{,}73° \ \Omega$$

Impedancia total $\boldsymbol{Z} = 20 + 10{,}77 + 6{,}15j = 30{,}77 + 6{,}15j = 31{,}38 \angle 11{,}3° \ \Omega$

b) Intensidad total $\boldsymbol{I} = \dfrac{\boldsymbol{V}}{\boldsymbol{Z}} = \dfrac{100 \angle 0°}{31{,}38 \angle 11{,}3°} = 3{,}19 \angle -11{,}3° = (3{,}13 - 0{,}62j)$ A

c) El factor de potencia $\cos\varphi = \cos 11{,}3° = 0{,}981$

Tensión entre B y C $\boldsymbol{V}_{BC} = \boldsymbol{Z}_{BC}\cdot\boldsymbol{I} = 12{,}4 \angle 29{,}73°\cdot 3{,}19 \angle -11{,}3° = 39{,}56 \angle 18{,}43°$ V

$$\boldsymbol{I}_1 = \frac{\boldsymbol{V}_{BC}}{\boldsymbol{Z}_1} = \frac{39{,}56 \angle 18{,}43°}{22{,}36 \angle 63{,}43°} = 1{,}77 \angle -45° = (1{,}25 - 1{,}25j) \text{ A}$$

$$\boldsymbol{I}_2 = \frac{\boldsymbol{V}_{BC}}{\boldsymbol{Z}_2} = \frac{39{,}56 \angle 18{,}43°}{20 \angle 0°} = 1{,}98 \angle 18{,}43° = (1{,}88 + 0{,}63j) \text{ A}$$

Se cumple la primera ley de kirchhoff:

$\boldsymbol{I} = \boldsymbol{I}_1 + \boldsymbol{I}_2 = (1{,}25 - 1{,}25j) + (1{,}88 + 0{,}63j) = (3{,}13 - 0{,}62j)$ A

PROBLEMAS PROPUESTOS

A.12. Un condensador de 30 μF de capacidad se conecta en serie con una resistencia de 20 Ω a una tensión alterna senoidal de 230 V, 50 Hz. Calcular:

a) Impedancia del circuito.

b) Intensidad de corriente que circula por él.

c) Potencia reactiva del condensador.

d) Potencia aparente del circuito.

Solución: a) 108 Ω; b) 2,13 A; c) 481,4 VAr; d) 489,9 VA

© Ediciones Paraninfo

A.13. Una resistencia de 30 Ω se conecta en serie con un condensador de 60 μF y con una bobina de resistencia 10 Ω y coeficiente de autoinducción 0,2 H, a una tensión alterna senoidal de 230 V, 50 Hz. Calcular:
a) Impedancia total.
b) Intensidad de corriente.
c) Coseno del ángulo de desfase entre tensión e intensidad (factor de potencia).
d) Potencias activa, reactiva y aparente.
Solución: a) 41,18 Ω; b) 5,59 A; c) 0,971 (circuito inductivo); d) P=1,25 kW, Q=0,306 kVAr, S=1,28 kVA.

A.14. En un circuito de corriente alterna de 60 Hz de frecuencia están conectados una bobina con un amperímetro que indica 4 A, un vatímetro que indica 450 W, y un voltímetro que indica 150 V. Calcular:
a) La potencia aparente total.
b) El factor de potencia.
c) La impedancia.
d) Reactancia.
e) Coeficiente de autoinducción de la bobina.
Solución: a) 600 VA; b) 0,75; c) 37,5 Ω; d) 24,8 Ω; e) 0,066 H.

A.15. Dos receptores están conectados a una línea de tensión alterna senoidal de 230 V, 50 Hz. Uno de los receptores consume 2 kW con factor de potencia unidad y el otro consume 1 kW con factor de potencia 0,8 inductivo. Calcular:
a) Intensidad que consume el primer receptor.
b) Intensidad que consume el segundo receptor.
c) Potencia activa total.
d) Potencia reactiva total.
e) Potencia aparente total.
f) Intensidad de corriente total.
g) Factor de potencia total.
Solución: a) 8,7 A; b) 5,43 A; c) 3 kW; d) 0,75 kVAr; e) 3,092 kVA; f) 13,44 A; g) 0,97 inductivo.

A.16. Una bobina de resistencia despreciable y coeficiente de autoinducción L=0,2 H está conectada en paralelo con un condensador de capacidad C=20 μF a una tensión alterna senoidal de 150 V, 50 Hz. Calcular:
a) La frecuencia de resonancia de este circuito.
b) Intensidad de corriente que circula por la bobina.
c) Intensidad de corriente que circula por el condensador.
d) Intensidad total.
e) Factor de potencia del circuito.
Solución: a) 79,58 Hz; b)2,39 A; c) 0,94 A; d) 1,45 A; e) 0

© Ediciones Paraninfo

A.17. La línea de alimentación a un bajo comercial es trifásica de 400 V, 50 Hz. Por cada conductor de la línea el comercio consume una corriente de intensidad 25 A con factor de potencia 0,88 inductivo. Calcular la potencia activa, reactiva y aparente que consume la instalación.

Solución: $P=15\,242$ W; $Q=8\,227$ VAr; $S=17\,321$ VA.

A.18. Un receptor trifásico tiene tres fases idénticas de impedancia 100 Ω. Se conecta a una línea trifásica de tensión alterna senoidal 400 V, 50 Hz. Calcular:

a) Intensidad de fase y de línea si la conexión del receptor es en triángulo.
b) Tensión de fase e intensidad de línea si el receptor está conectado en estrella.

Solución: a) $I_f=4$ A, $I_L=6{,}93$ A; b) $V_f=230{,}9$ V, $I_L=2{,}3$ A.

A.19. En el circuito de la figura 32, calcular:

a) Impedancia de cada rama.
b) Impedancia total.
c) Intensidad total.
d) Factor de potencia total.
e) Potencias activa, reactiva y aparente.

Solución: a) $Z_1=(20\text{-}20j)$ Ω; $Z_2=(10+20j)$ Ω; b) $(20+6{,}67j)$ Ω; c) $(9-3j)$ A; b) 0,949; e) $P=1\,800$ W, $Q=600$ VAr, $S=1\,897$ VA.

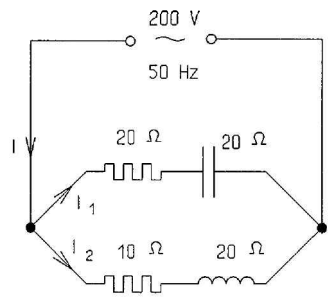


Fig. A.32

A.20. En el circuito de la figura 33, calcular:

a) Impedancia total.
b) Intensidad total.
c) Tensión entre B y C.
d) Intensidad en la resistencia de 20 Ω.
e) Potencia activa total.

Solución: a) $10{,}47\angle 56{,}37°\,\Omega$; b) $38{,}2\angle 56{,}37$ A; c) $229{,}2\angle 16{,}16°$ V; d) $11{,}46\angle 16{,}16°$ A; e) 8464 W.

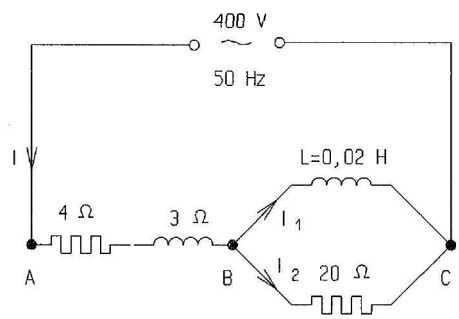


Fig. A.33

© Ediciones Paraninfo

B

TRANSFORMADOR

B.1. TRANSFORMADOR

Es la máquina eléctrica estática capaz de transformar un sistema de corriente alterna en otro de corriente alterna, pero de distinta tensión e intensidad.

B.2. CONSTITUCIÓN Y PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE UN TRANSFORMADOR MONOFÁSICO

■ Constitución

Un transformador monofásico está básicamente constituido por:

- Un circuito magnético de chapas de hierro aisladas entre sí (para limitar las corrientes parásitas). La forma más utilizada en el circuito magnético es la acorazada (fig. B.1).
- Dos devanados aislados entre sí y de las chapas, dispuestos en forma concéntrica o alternada.
  El devanado conectado a la línea de alimentación se llama primario y el conectado al circuito de utilización recibe el nombre de secundario.
- Accesorios que completan el transformador (bornes, cuba, aceite de refrigeración, depósito de expansión, termostato, etc.).

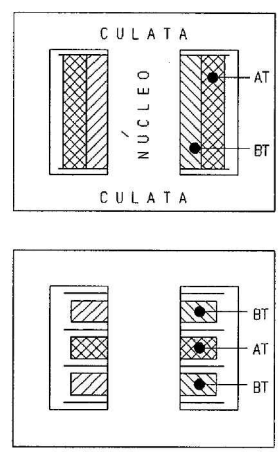


Fig. B.1

■ Principio de funcionamiento

El bobinado primario, alimentado por una corriente alterna, se comporta como un receptor y crea un flujo magnético alternativo de acuerdo con la frecuencia de la corriente, induciendo una fuerza electromotriz alterna en el devanado secundario.

© Ediciones Paraninfo

El secundario se comporta como un generador, alimentando mediante una corriente alterna al circuito de utilización. Esta corriente secundaria se opone (fig. B.2), según la ley de Lenz, a la variación del flujo inductor, obligando a aumentar la corriente primaria para mantener el flujo magnético, que permanece prácticamente constante.

El transformador es reversible, pudiendo funcionar como primario cualquiera de los devanados.

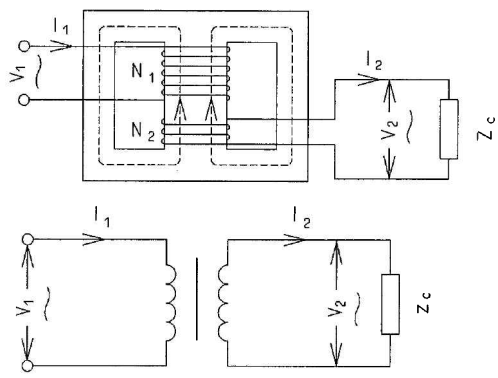


Fig. B.2: Transformador monofásico

B.3. TRANSFORMADOR IDEAL

Un transformador ideal es aquel que no tiene pérdidas de potencia y el flujo magnético es el mismo para los dos devanados.

■ **Fuerzas electromotrices primaria y secundaria**

- La fuerza electromotriz (f.e.m.) engendrada en el primario por el flujo variable alterno es una fuerza contraelectromotriz, proporcional al flujo máximo $\Phi_{máx}$, a la frecuencia f de la corriente de alimentación y al número de espiras N_1 del devanado.

$$E_1 = 4{,}44\,\Phi_{máx} f N_1$$

E_1: Fuerza electromotriz eficaz del primario (V).
$\Phi_{máx}$: Flujo máximo (Wb).
f: Frecuencia de la corriente alterna (Hz)
N_1: Número de espiras del primario.

La fuerza electromotriz engendrada en el secundario por el flujo magnético variable es también proporcional al flujo máximo, a la frecuencia de la corriente de alimentación y al número de espiras del devanado N_2.

$$E_2 = 4{,}44\,\Phi_{máx} f N_2$$

E_2: Fuerza electromotriz eficaz del secundario (V)
N_2: Número de espiras del secundario.

DEMOSTRACIÓN

Considerando el flujo magnético alterno senoidal, su variación en un cuarto de período es de cero a flujo máximo (fig. B.3).

La f.e.m. media en el primario $E_{m1} = N_1 \dfrac{\Phi_{máx}}{\frac{T}{4}} = \dfrac{4\,\Phi_{máx} N_1}{T} = 4\,\Phi_{máx} f N_1$

© Ediciones Paraninfo

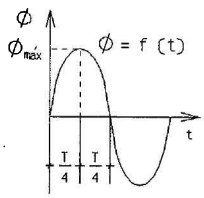


Fig. B.3

Siendo la f.e.m. eficaz $E_1 = 1{,}11\,E_{m1}$ $E_1 = 4{,}44\,\Phi_{máx} f N_1$

■ Relaciones fundamentales en un transformador ideal

- *Relación de transformación*: es la relación entre los números de espiras de primario y secundario, que coincide con la relación de fuerzas electromotrices y con la relación de tensiones.

$$m = \frac{N_1}{N_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{V_1}{V_2}$$

Si N_1 es mayor que N_2, el transformador es reductor.
Si N_1 es menor que N_2, el transformador es elevador.

- *Relación entre las potencias primaria y secundaria*: las potencias activas, reactivas y aparentes suministradas por el secundario y las absorbidas por el primario son iguales.

$$V_1 I_1 \cos\varphi_1 = V_2 I_2 \cos\varphi_2$$
$$V_1 I_1 \operatorname{sen}\varphi_1 = V_2 I_2 \operatorname{sen}\varphi_2$$
$$V_1 I_1 = V_2 I_2$$

- *Relación entre intensidades primaria y secundaria*: las intensidades primaria I_1 y secundaria I_2 están en relación inversa a la relación de transformación.

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{1}{m} = \frac{N_2}{N_1}$$

B.4. TRANSFORMADOR REAL

En un transformador real hay que tener en cuenta la resistencia y reactancia de los devanados, además de las pérdidas de potencia en el hierro del circuito magnético.

El transformador, como toda máquina eléctrica, lleva una placa de características normalizada. Los datos incluidos en ella son de dos tipos: identificativos y técnicos (potencia, conexión, tensiones, intensidades, etc.). Cuando el transformador funciona según los valores de su placa de características se dice que funciona a régimen nominal o a plena carga. El funcionamiento real de una máquina es distinto, habitualmente, del régimen nominal. La potencia nominal del transformador es la potencia aparente que suministra por el secundario a plena carga.

© Ediciones Paraninfo

■ **Ensayo en vacío del transformador**

Se efectúa conectando uno de los devanados a su tensión nominal y dejando abierto el otro devanado (fig. B.4).

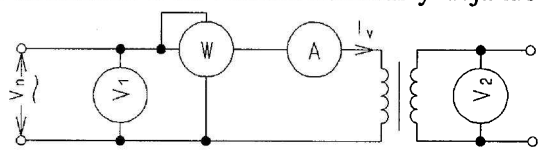


Fig. B.4: Ensayo en vacío

Por el devanado conectado circulará una corriente de intensidad I_v de pequeño valor. (En los transformadores de gran potencia del orden del 5% de la intensidad nominal, mientras que en los de pequeña potencia puede llegar al 25 %).

La potencia perdida en el devanado conectado es, en los transformadores grandes, despreciable; por lo que la potencia consumida en el ensayo P_v es la necesaria para cubrir las pérdidas de potencia del circuito magnético P_{Fe}.

$$P_v = P_{Fe}$$

En el ensayo se obtiene también la relación de transformación $m = \dfrac{V_1}{V_2}$

Como el devanado tiene una gran reactancia, el transformador funciona en vacío como una bobina con núcleo de hierro, y la corriente absorbida está retrasada cerca de un cuarto de período (90°) respecto a la tensión aplicada.

■ **Ensayo en cortocircuito del transformador**

Se efectúa conectando uno de los devanados en cortocircuito (generalmente el de baja tensión) y aplicando al otro una tensión de pequeño valor V_{cc} (fig. B.5), de forma que por los devanados circule corriente con su intensidad nominal I_n.

La tensión de cortocircuito V_{cc} se suele expresar en tanto por ciento del valor nominal V_n

$$u_{cc} = \frac{V_{cc} \cdot 100}{V_n}$$

La potencia consumida en el ensayo P_{cc} es la necesaria para cubrir las pérdidas de potencia en los devanados P_{Cu} a la carga nominal.

$$P_{cc} = P_{Cu}$$

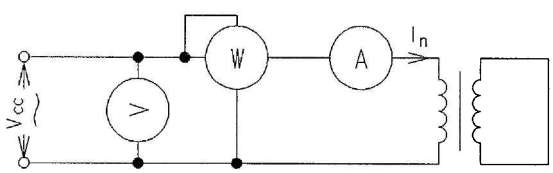


Fig. B.5: Ensayo en cortocircuito

La resistencia R_{cc}, impedancia Z_{cc} y reactancia X_{cc} de cortocircuito que presenta el transformador, desde el devanado conectado a la tensión de ensayo, se determinan de la forma siguiente:

$$R_{cc} = \frac{P_{cc}}{I_n^2}; \quad Z_{cc} = \frac{V_{cc}}{I_n}; \quad X_{cc} = \sqrt{Z_{cc}^2 - R_{cc}^2}$$

© Ediciones Paraninfo

La tensión porcentual de cortocircuito u_{cc} y sus componentes activa u_R y reactiva u_X se calculan de la forma siguiente:

$$u_{cc} = \frac{Z_{cc} I_n}{V_n} 100; \quad u_R = \frac{R_{cc} I_n}{V_n} 100; \quad u_X = \frac{X_{cc} I_n}{V_n} 100$$

Siendo φ_{cc} el ángulo de desfase entre V_{cc} e I_n en el ensayo.

También pueden calcularse, partiendo del triángulo de cortocircuito (fig. B.6)

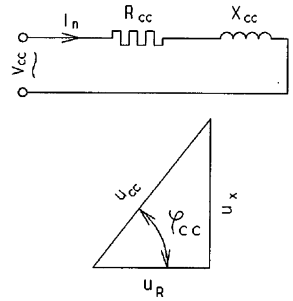


Fig. B.6: Triángulo de cc

$$u_R = u_{cc} \cos\varphi_{cc}; \quad u_X = u_{cc} \operatorname{sen}\varphi_{cc}; \quad \cos\varphi_{cc} = \frac{P_{cc}}{V_{cc} I_n}$$

La impedancia de cortocircuito también puede calcularse en función de la potencia nominal S_n

$$Z_{cc} = \frac{V_n^2}{S_n} \cdot \frac{u_{cc}}{100}$$

DEMOSTRACIÓN

La impedancia de cortocircuito $Z_{cc} = \frac{V_n}{I_n} \cdot \frac{u_{cc}}{100}$, puede obtenerse en función de la potencia multiplicando y dividiendo por V_n

$$Z_{cc} = \frac{V_n \cdot V_n}{I_n \cdot V_n} \cdot \frac{u_{cc}}{100} = \frac{V_n^2}{S_n} \cdot \frac{u_{cc}}{100}$$

■ Rendimiento de un transformador

El transformador real tiene pérdidas de potencia en el hierro del circuito magnético P_{Fe} (por histéresis y corrientes parásitas) y en los devanados de cobre o aluminio (por efecto Joule) P_{Cu}. Todas estas pérdidas se transforman en calor.

El rendimiento del transformador es la relación entre la potencia activa suministrada por el secundario P_2 y la potencia activa absorbida por el primario P_1

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_{Cu} + P_{Fe}}$$

Las pérdidas en el hierro son constantes y se obtienen en el ensayo de vacío. Las pérdidas en el cobre se obtienen en el ensayo en cortocircuito y son proporcionales al cuadrado de la intensidad de corriente de carga (o de la potencia aparente).

$$P_{Cu} = kS^2$$

El rendimiento máximo se obtiene cuando las pérdidas en el cobre son iguales a las pérdidas en el hierro: $P_{Cu} = P_{Fe}$.

© Ediciones Paraninfo

B.5. CAÍDA DE TENSIÓN EN EL TRANSFORMADOR

■ Regulación de tensión

La regulación de tensión es la variación porcentual de la misma. La regulación de tensión secundaria del transformador para cualquier carga:

$$u = \frac{V_{2V} - V_2}{V_{2V}} 100$$

siendo V_{2V} la tensión secundaria en vacío y V_2 la tensión secundaria en carga. Se puede calcular, para los transformadores de elevada potencia, en los que la intensidad que consumen en vacío puede despreciarse, de la forma siguiente:

$$u = \beta (u_R \cos\varphi_2 + u_X \operatorname{sen}\varphi_2)$$

Siendo β el índice de carga $\beta = \frac{I_2}{I_{2n}} = \frac{S}{S_n}$,

φ_2: Ángulo de desfase entre la tensión y la intensidad de corriente del secundario.

La tensión en bornes del secundario depende del valor de la carga y de su carácter. Si la carga es inductiva, la tensión disminuye más que si la carga es solamente activa. Si la carga es capacitiva, la tensión aumenta a medida que crece la carga.

DEMOSTRACIÓN

La tensión secundaria en vacío es igual a la tensión en carga más la caída de tensión en resistencia R_{cc} y en la reactancia X_{cc}, según la ecuación vectorial representada en la figura B.7.

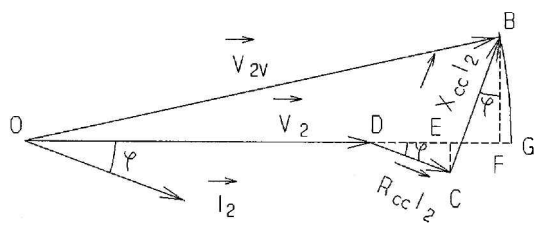


Fig. B.7

$$V_{2V} = V_2 + R_{cc}I_2 + X_{cc}I_2$$

La caída de tensión $u = V_{2V} - V_2 \simeq \overline{DF} = \overline{DE} + \overline{EF} = R_{cc}I_2\cos\varphi_2 + X_{cc}I_2 sen\varphi_2$

La regulación de tensión, para la intensidad nominal secundaria I_{2n} (índice de carga unidad), considerando la tensión secundaria en vacío como la tensión nominal V_{2n}:

$$u = \frac{V_{2n} - V_2}{V_{2n}} 100 \simeq 100\frac{R_{cc}I_{2n}}{V_{2n}}\cos\varphi_2 + 100\frac{X_{cc}I_{2n}}{V_{2n}} sen\varphi_2 = u_R\cos\varphi_2 + u_X sen\varphi_2$$

■ Dispositivos de regulación de tensión en los transformadores de potencia

Para regular la tensión secundaria del transformador, se dispone en uno de los devanados (habitualmente en el de alta tensión) de un conmutador que permite cambiar el número de espiras mediante varias tomas. En los transformadores de distribución la conmutación de espiras se efectúa con el transformador desconectado y permite variar la tensión en $\pm 5\%$, con escalones de $\pm 2{,}5\%$.

En transformadores de gran potencia se utiliza un regulador en carga.

© Ediciones Paraninfo

B.6. CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO

Cuando en funcionamiento normal se produce un cortocircuito en el secundario del transformador, la intensidad de cortocircuito:

$$I_{cc} = \frac{I_{2n}}{u_{cc}} 100$$

Siendo I_{2n} la intensidad nominal del secundario.

La potencia aparente de cortocircuito $S_{cc} = \frac{S_n}{u_{cc}} 100$

S_n: Potencia nominal del transformador.

DEMOSTRACIÓN

Por el secundario en cortocircuito circula la intensidad nominal I_{2n} cuando la tensión aplicada es la del ensayo en cortocircuito a la corriente nominal. Cuando se produce un cortocircuito con la tensión de la red (100% de la tensión), la intensidad es directamente proporcional a la tensión, y considerando la red de alimentación del transformador de potencia infinita (de manera que mantiene siempre la misma tensión en cualquier condición de carga), se puede establecer la proporción:

$$\frac{100}{u_{cc}} = \frac{I_{cc}}{I_{2n}}$$

Entonces, la intensidad de cortocircuito en el secundario $I_{cc} = \frac{I_{2n}}{u_{cc}} 100$

B.7. TRANSFORMADOR TRIFÁSICO

■ Constitución

Está formado por tres transformadores monofásicos dispuestos sobre una misma armazón magnética.

El circuito magnético tiene dos culatas y tres columnas (fig. B.8). Sobre cada una de estas columnas va arrollado un devanado primario y otro secundario.

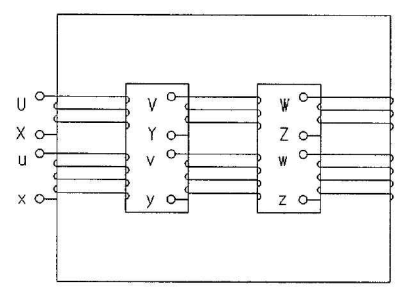


Fig. B.8: Transformador trifásico

Los tres devanados primarios y también los tres secundarios, pueden conectarse (fig. B.9) en estrella (conexión y), triángulo (conexión d) o zigzag (conexión z).

En grandes potencias y muy altas tensiones se utilizan tres transformadores monofásicos iguales conectados entre sí, de forma que sea posible la transformación de un sistema trifásico de tensiones.

En algunos transformadores trifásicos se usan devanados terciarios para alimentación de circuitos auxiliares de mando y maniobra, y también dos o más circuitos primarios o secundarios independientes para alimentación de dos o más líneas.

© Ediciones Paraninfo

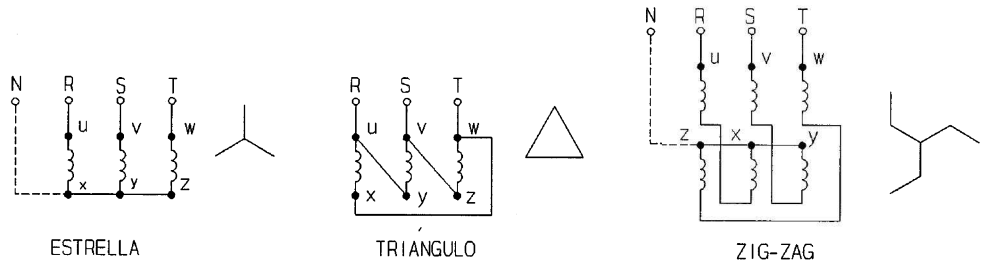


Fig. B.9: Conexiones trifásicas

Según la Comisión Electrotécnica Internacional (C.E.I.) los transformadores se clasifican en grupos de conexión. Las empresas distribuidoras de energía eléctrica utilizan para centros de transformación los tipos de transformadores siguientes:

Yz11 Para potencias de 25 a 100 kVA.

Dy11 Para potencias de 160 a 1 000 kVA.

El número que acompaña a la indicación de la conexión es el índice horario que, multiplicado por 30, indica el desfase entre las tensiones compuestas o de línea de primario y secundario en el sentido de giro de las agujas del reloj.

En la tabla B.1 se indican los grupos de conexión de transformadores.

■ Relaciones fundamentales en un transformador trifásico ideal

- *Relación de transformación*
  - Relación de transformación simple o de fase. Es la relación entre el número de espiras de fase del primario N_1 y del secundario N_2, que coincide, en el transformador ideal, con la relación de tensiones de fase de primario V_{f1} y secundario V_{f2}:

$$m = \frac{N_1}{N_2} = \frac{V_{f1}}{V_{f2}}$$

  - Relación de transformación compuesta. Es la relación entre las tensiones de línea de primario V_{L1} y secundario V_{L2}:

$$m_c = \frac{V_{L1}}{V_{L2}}$$

- *Relación entre potencias de primario y secundario.* Las potencias activa, reactiva y aparente sumininistradas por el secundario son iguales a las absorbidas por el primario:

$$\sqrt{3}\, V_{L1} I_{L1} \cos\varphi_1 = \sqrt{3}\, V_{L2} I_{L2} \cos\varphi_2$$

$$\sqrt{3}\, V_{L1} I_{L1} \operatorname{sen}\varphi_1 = \sqrt{3}\, V_{L2} I_{L2} \operatorname{sen}\varphi_2$$

$$\sqrt{3}\, V_{L1} I_{L1} = \sqrt{3}\, V_{L2} I_{L2}$$

© Ediciones Paraninfo

- *Relación de intensidades.*
  - La relación entre las intensidades de línea de primario I_{L1} y de secundario I_{L2} es la inversa de la relación de transformación compuesta:

$$\frac{I_{L1}}{I_{L2}} = \frac{1}{m_c}$$

  - La relación entre las intensidades de fase de primario I_{f1} y de secundario I_{f2} es la inversa de la relación de transformación simple o de fase:

$$\frac{I_{f1}}{I_{f2}} = \frac{1}{m}$$

■ **Ensayo de los transformadores trifásicos**

Se ensayan en vacío y en cortocircuito igual que los transformadores monofásicos. En los cálculos se utilizan las mismas expresiones que para los monofásicos, con valores de fase de tensión, intensidad y potencia.

B.8. CONEXIÓN EN PARALELO DE TRANSFORMADORES

Dos o más transformadores se acoplan en paralelo conectando los devanados primarios a la línea de alimentación y los secundarios a la línea de utilización.

Las condiciones que deben cumplir dos o más transformadores para poder acoplarse en paralelo son:

1) Iguales relaciones de transformación, con la mismas tensiones nominales. Los transformadores trifásicos deben tener igual relación de transformación compuesta.
2) Tensiones de cortocircuito lo más iguales posible. Como la tensión de cortocircuito varía según la potencia, la CEI recomienda que las potencias nominales de los transformadores conectados no difieran más del doble.
3) Terminales homólogos conectados a un mismo conductor (son terminales homólogos aquellos que tienen la misma tensión en cualquier instante). Los transformadores trifásicos deben tener igual grupo de conexiones (los desfases de las tensiones secundarias respecto a la línea de alimentación han de ser iguales, y el sentido de rotación de los vectores de las tensiones secundarias ha de ser el mismo para todos los transformadores).

En transformadores conectados en paralelo y con la misma tensión de cortocircuito, la carga total de la red se distribuye proporcionalmente a sus potencias nominales.

En transformadores conectados en paralelo y con la misma potencia nominal, la carga total de la red se distribuye en razón inversa de sus tensiones de cortocircuito.

Antes de la puesta en servicio de un transformador en paralelo con otro, es conveniente efectuar una comprobación experimental por medio de voltímetros

© Ediciones Paraninfo

conectados en serie con el secundario, que deben indicar tensión nula (fig. B.10). Si se utilizan pilotos de señalizacióm, la ausencia de tensión la indican cuando están apagados.

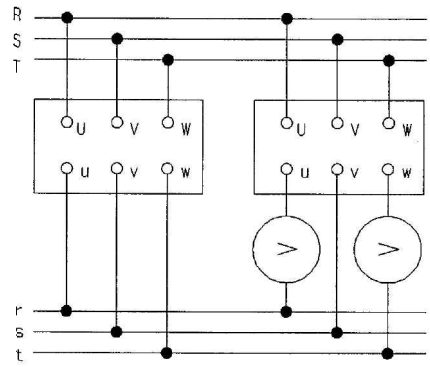


Fig. B.10

B.9. AUTOTRANSFORMADOR

Es un transformador que tiene unidos el primario y el secundario (fig. B.11), formando un solo devanado. Es de construcción más barata que los transformadores ordinarios, pero tiene la desventaja de la unión de los devanados de alta y baja tensión.

Las relaciones fundamentales del transformador ideal se mantienen también para el autotransformador ideal.

1) Relación de transformación $m = \frac{N_1}{N_2} = \frac{V_1}{V_2}$

2) Relación entre potencias $V_1 I_1 = V_2 I_2$

3) Relación entre intensidades $\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{m}$

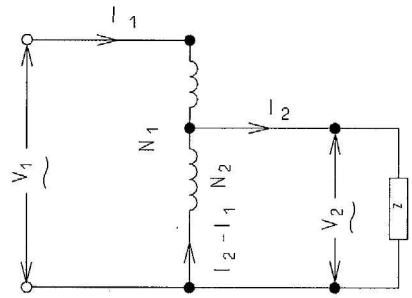


Fig. B.11: Autotransformador

Considerando el autotransformador ideal, la intensidad de corriente eléctrica en el devanado común a primario y secundario es la diferencia de intensidades.

Se llama potencia de paso del autotransformador a la potencia aparente suministrada por el secundario:

$$S_2 = V_2 I_2$$

La potencia propia o electromagnética del autotransformador S_p, es la potencia aparente transmitida por el flujo magnético del primario al secundario. Es la que determina las dimensiones del núcleo del circuito magnético y se calcula en el devanado común o en el devanado serie:

$$S_p = V_2 (I_2 - I_1) = I_1 (V_1 - V_2)$$

El Reglamento sobre Centrales Eléctricas, Subestaciones y Centros de Transformación especifica que en caso de utilizar autotransformadores trifásicos de potencia, serán de conexión estrella (fig. B.12), recomendándose la puesta a tierra del neutro (MIE RAT 07).

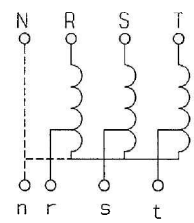


Fig. B.12

El autotransformador tiene menos pérdidas que el transformador y menos impedancia, por lo que las intensidades de cortocircuito son muy elevadas.

© Ediciones Paraninfo

B.10. TRANSFORMADORES DE MEDIDA

Los transformadores de medida se utilizan para transformar la magnitud que se quiere medir (tensión o intensidad) a un valor proporcional a ésta y utilizable (del orden de 5 A o 110 V), separando los circuitos de medida de los que están a la tensión de la instalación. Los devanados primario y secundario están eléctricamente separados, solamente con el circuito magnético común. Se utilizan también para conexión de relés de protección que no pueden soportar intensidades de corriente ni tensiones elevadas.

Igual que en los aparatos de medida, en estos transformadores se indica una *clase* según la precisión de la medida. Los errores pueden ser de relación de transformación o de fase entre las magnitudes primarias y secundarias. Se utilizan aparatos de clases 0,2 o 0,5 para mediciones precisas y de clase 1 para medidas de funcionamiento.

La conexión al secundario de muchos aparatos de medida disminuye la precisión, por lo que el consumo de los mismos no debe sobrepasar la potencia de precisión del transformador. (Potencia aparente o carga nominal en VA, indicada en su placa de características).

■ Transformador de medida de tensión

Es un transformador reductor en el que el primario se conecta a la tensión a medir y el secundario a un voltímetro (fig. B.13) o a circuitos voltimétricos de los aparatos de medida.

La tensión del primario $V_1 = \dfrac{N_1}{N_2} V_2$

Se utiliza para medir en alta tensión, siendo la máxima tensión secundaria 110 V.

Para proteger el transformador contra el peligro de cortocircuito se utilizan fusibles en primario y secundario.

Para proteger el secundario contra posibles descargas de alta tensión (por averías de aislamiento) se conecta este devanado a tierra.

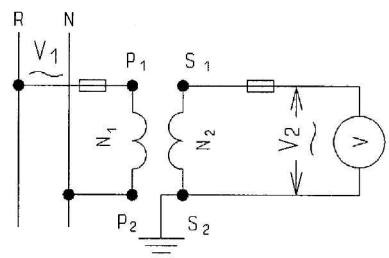


Fig. B.13: Transformador de tensión

En corriente alterna trifásica es muy usado el transformador de tensión en V o triángulo abierto (fig. B.14).

En tensiones iguales o mayores de 220 kV se utilizan *transformadores de tensión capacitivos*. Consisten en un divisor de tensión formado por condensadores en serie. A los terminales de uno de los condensadores se conecta el primario del transformador de

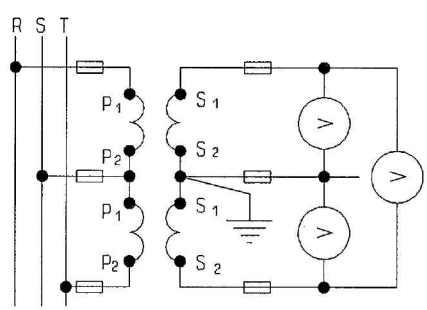


Fig. B.14: Transformador en V

© Ediciones Paraninfo

tensión inductivo, que alimenta por el secundario a los aparatos de medida o protección. Este sistema permite utilizar la línea de A.T. para comunicación y telemando.

Los transformadores de medida de tensión más utilizados en centros de transformación, para líneas de alimentación a 20 kV, son de relación de transformación 22 000/110 V, clase de precisión 0,5, tensión nominal 24 kV y potencias de precisión 10, 25, 50 y 100 VA.

■ **Transformador de medida de intensidad**

Es un transformador con muchas más espiras en el secundario que en el primario, el cual está, en muchos casos, formado por el propio conductor de la red. El secundario se conecta a un amperímetro (fig. B.15) o a los circuitos amperimétricos de los aparatos de medida.

La intensidad del primario $I_1 = \frac{N_2}{N_1} I_2$

Se utiliza siempre en alta tensión. En baja tensión se utiliza para medir grandes intensidades, siendo la intensidad secundaria como máximo 5 A.

No debe abrirse el secundario del transformador de intensidad en funcionamiento. El gran flujo magnético del primario, al no estar contrarrestado por el flujo secundario, calentaría excesivamente el núcleo e induciría en el devanado secundario tensiones demasiado elevadas que podrían llegar a dañar el aislamiento.

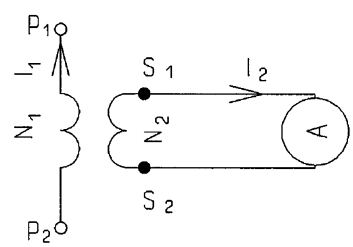


Fig. B. 15

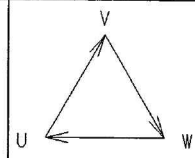
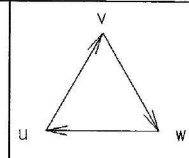
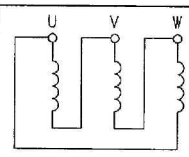
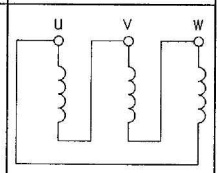
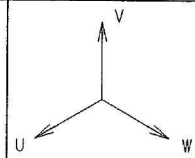
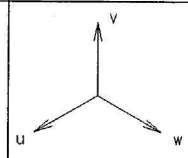
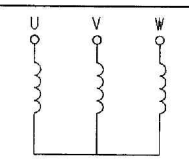
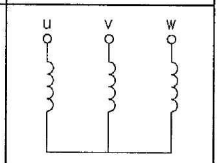
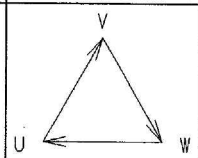
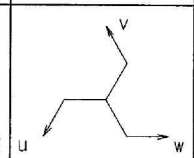
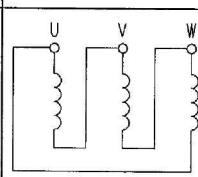
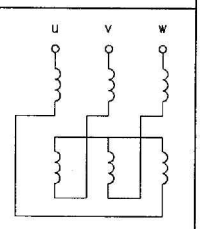
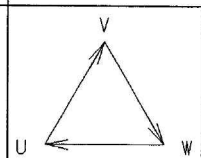
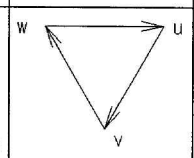
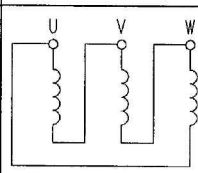
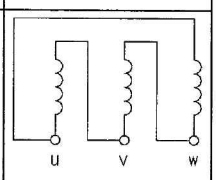
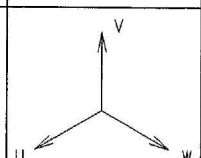
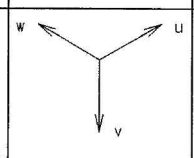
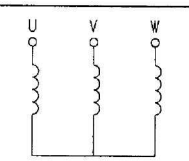
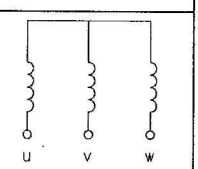
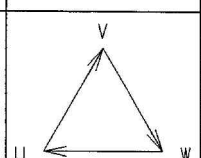
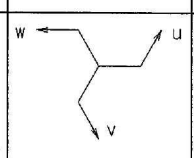
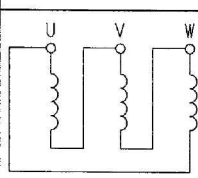
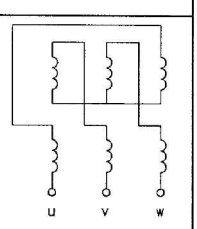
En los transformadores de medida de intensidad en alta tensión, se conecta a tierra el secundario para proteger este devanado en caso de descarga de tensión de primario a secundario. Es obligatorio en la conexión de aparatos de medida de energía para facturación, la instalación de dispositivos que permitan su separación para verificación o sustitución sin desconectar la instalación y sin interrumpir, en los transformadores de intensidad, la continuidad del secundario (MIE RAT 08).

Los transformadores de medida de intensidad más utilizados en centros de transformación, para líneas de 20 kV, son de intensidad primaria nominal: 10, 15, 30, 40, 50, 60 A; intensidad secundaria nominal 5 A, clase de precisión 0,5, tensión nominal 24 kV y potencias de precisión 5, 10, 15 y 30 VA.

La norma UNE 21088 define las características de los transformadores de medida.

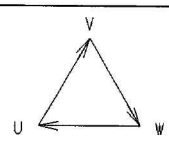
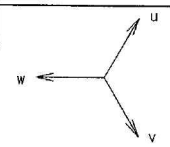
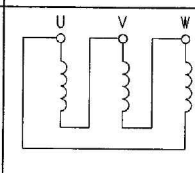
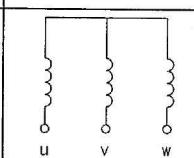
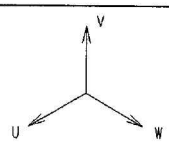
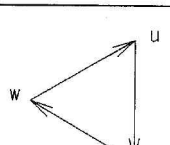
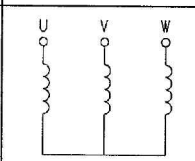
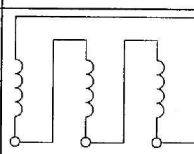
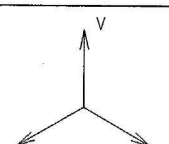
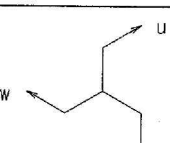
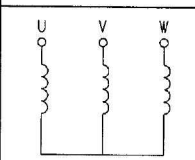
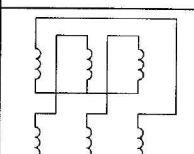
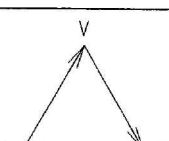
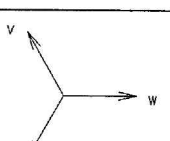
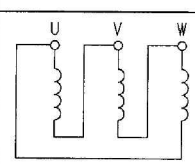
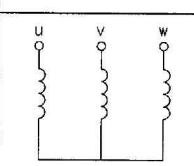
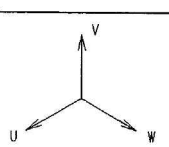
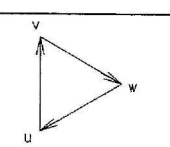
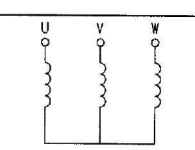
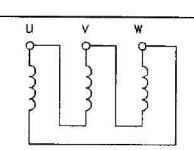
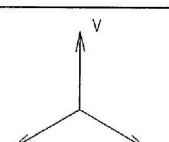
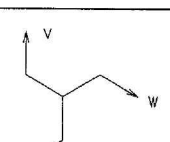
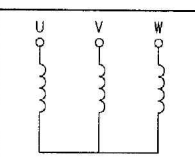
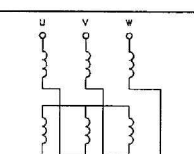
© Ediciones Paraninfo

Tabla B.1. Grupos de conexión de los transformadores trifásicos

ÍNDICE DE CONEXIÓN	GRUPO DE CONEXIÓN C.E.I.	DIAGRAMA VECTORIAL		ESQUEMA DE CONEXIONES	
		ALTA TENSIÓN	BAJA TENSIÓN	ALTA TENSIÓN	BAJA TENSIÓN
0	Dd0				
	Yy0				
	Dz0				
6	Dd6				
	Yy6				
	Dz6				

© Ediciones Paraninfo

Tabla B.1. Grupos de conexión de los transformadores trifásicos

ÍNDICE DE CONEXIÓN	GRUPO DE CONEXIÓN C.E.I.	DIAGRAMA VECTORIAL		ESQUEMA DE CONEXIONES	
		ALTA TENSIÓN	BAJA TENSIÓN	ALTA TENSIÓN	BAJA TENSIÓN
5	Dy5				
	Yd5				
	Yz5				
11	Dy11				
	Yd11				
	Yz11				

(Continuación)

© Ediciones Paraninfo

PROBLEMAS RESUELTOS

B.1. Un transformador monofásico con circuito magnético tipo acorazado tiene un núcleo de 5×6 cm de lado y se considera que la sección neta es el 90% de la sección geométrica. El número de espiras en el primario es 306 y en el secundario 167. La inducción máxima admitida es 1,2 T a la frecuencia de 50 Hz. Calcular las fuerzas electromotrices de primario y secundario.

La f.e.m. primaria $E_1 = 4{,}44\Phi_{máx} f N_1$

La sección neta del núcleo $s_n = 0{,}9 \cdot 30 = 27\ \text{cm}^2 = 27 \cdot 10^{-4}\ \text{m}^2$

El flujo máximo $\Phi_{máx} = B_{máx}\, s_n = 1{,}2 \cdot 27 \cdot 10^{-4} = 0{,}00324\ \text{Wb}$

Entonces $E_1 = 4{,}44 \cdot 0{,}00324 \cdot 50 \cdot 306 = 220\ \text{V}$

La f.e.m. secundaria $E_2 = 4{,}44\, \Phi_{máx} f N_2 = 4{,}44 \cdot 0{,}00324 \cdot 50 \cdot 167 = 120\ \text{V}$

B.2. Un transformador monofásico de relación de transformación 400/230 V suministra a una carga 600 W de potencia a 230 V. Considerando el transformador ideal y el factor de potencia de la carga 0,9 inductivo, calcular las intensidades de primario y secundario.

La relación de transformación $m = \dfrac{V_1}{V_2} = \dfrac{400}{230} = 1{,}74$

La intensidad que suministra el transformador $I_2 = \dfrac{P_2}{V_2 \cos\varphi} = \dfrac{600}{230 \cdot 0{,}9} = 2{,}9\ \text{A}$

La intensidad que circula por el primario se calcula partiendo de la relación de transformación:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{1}{m};\quad I_1 = \frac{I_2}{m} = \frac{2{,}9}{1{,}74} = 1{,}67\ \text{A}$$

B.3. Un transformador monofásico de 50 kVA, 10 000/230 V, 50 Hz, se ensaya en cortocircuito conectándolo a una tensión alterna senoidal regulable, de frecuencia 50 Hz por el devanado de alta tensión. Si las indicaciones de los aparatos son 410 V, 820 W y 5 A, calcular:

a) Tensión porcentual de cortocircuito.
b) Variación porcentual de la tensión secundaria y tensión en bornes del secundario trabajando a plena carga y con factor de potencia 0,8 inductivo.
c) Tensión en bornes del secundario trabajando el transformador a media carga con factor de potencia 0,2 en adelanto.

a) La tensión porcentual de cortocircuito $u_{cc} = \dfrac{V_{cc}}{V_n} 100 = \dfrac{410}{10\,000} \cdot 100 = 4{,}1\ \%$

b) La variación porcentual de tensión secundaria $u = \beta\,(u_R \cos\varphi_2 + u_X \operatorname{sen}\varphi_2)$
El factor de potencia en el ensayo de cortocircuito:

$$\cos\varphi_{cc} = \frac{P_{cc}}{V_{cc} I_n} = \frac{820}{410 \cdot 5} = 0{,}4$$

© Ediciones Paraninfo

$u_R = u_{cc} \cos \varphi_{cc} = 4{,}1 \cdot 0{,}4 = 1{,}64\ \%$; $u_X = \sqrt{u_{cc}^2 - u_R^2} = \sqrt{4{,}1^2 - 1{,}64^2} = 3{,}76\ \%$

El factor de potencia de la carga $\cos \varphi_2 = 0{,}8$; $\varphi_2 = 36{,}87°$; $\operatorname{sen} \varphi_2 = 0{,}6$

El índice de carga cuando se trabaja a plena carga $\beta = 1$

Entonces la variación de tensión $u = 1\,(1{,}64 \cdot 0{,}8 + 3{,}76 \cdot 0{,}6) = 3{,}57\ \%$

$$u = \frac{V_{2V} - V_2}{V_{2V}} 100; \quad V_2 = \frac{100 - u}{100} V_{2V} = \frac{100 - 3{,}57}{100} \cdot 230 = 221{,}79\ \text{V}$$

c) El factor de potencia de la carga capacitiva:

$$\cos \varphi_2 = 0{,}2; \quad \varphi_2 = -78{,}46°; \quad \operatorname{sen} \varphi_2 = -0{,}9798$$

El índice de carga cuando trabaja a media carga $\beta = \frac{1}{2}$

La variación porcentual de tensión en bornes del secundario:

$$u = \frac{1}{2}(1{,}64 \cdot 0{,}2 - 3{,}76 \cdot 0{,}9798) = -1{,}68\ \%$$

La tensión en bornes del secundario $V_2 = \frac{100 + 1{,}68}{100} \cdot 230 = 233{,}86\ \text{V}$

B.4. La placa de características de un transformador monofásico indica los siguientes datos: 100 kVA, 6 000/400 V, 50 Hz, u_{cc}=4 %. Calcular:

a) Intensidad de corriente de cortocircuito en el secundario, considerando la red de alimentación del transformador de potencia infinita.

b) Potencia aparente de cortocircuito.

a) La intensidad de cortocircuito en el secundario $I_{cc} = \frac{I_{2n}}{u_{cc}} 100$

La intensidad nominal del secundario $I_{2n} = \frac{S_n}{V_{2n}} = \frac{100\,000}{400} = 250\ \text{A}$

Entonces $I_{cc} = \frac{250}{4} \cdot 100 = 6\,250\ \text{A} = 6{,}25\ \text{kA}$

b) La potencia de cortocircuito en el secundario.

$$S_{cc} = \frac{S_n}{u_{cc}} 100 = \frac{100\,000}{4} \cdot 100 = 2\,500\,000\ \text{VA} = 2{,}5\ \text{MVA}$$

B.5. Se ensaya un transformador monofásico de 100 kVA, 6 000/230 V, 50 Hz. El ensayo en cortocircuito se realiza conectando el devanado de alta tensión a una fuente de tensión regulable, alterna senoidal de frecuencia 50 Hz. Los datos obtenidos en el ensayo son: 300 V, 16,67 A, 1,8 kW.

El ensayo en vacío se realiza conectando el devanado de baja tensión a una tensión alterna senoidal, 230 V, 50 Hz siendo el consumo de potencia de 400 W.

Calcular:

a) Rendimiento a plena carga, con factor de potencia 0,8 inductivo.

b) Rendimiento a tres cuartos de plena carga con igual factor de potencia.

c) Potencia aparente de rendimiento máximo.

© Ediciones Paraninfo

d) Rendimiento máximo con factor de potencia unidad.

a) La intensidad nominal en alta tensión $I_{1n} = \frac{S_n}{V_{1n}} = \frac{100\,000}{6\,000} = 16{,}67$ A

El ensayo en cortocircuito fue realizado a la intensidad nominal.

La potencia suministrada $P_2 = S_n \cos\varphi_2 = 100\,000 \cdot 0{,}8 = 80\,000$ W $= 80$ kW

Rendimiento a plena carga $\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_{Cu} + P_{Fe}} = \frac{80}{80 + 1{,}8 + 0{,}4} = 0{,}973 = 97{,}3\,\%$

b) Las pérdidas en el cobre varían en proporción directa al cuadrado de la potencia aparente suministrada, que a 3/4 de plena carga es de 75 kVA:

$$\frac{P_{Cu}}{1{,}8} = \frac{75^2}{100^2}$$

Las pérdidas en el cobre a 3/4 de plena carga $P_{Cu} = \frac{75^2}{100^2} \cdot 1{,}8 = 1{,}0125$ kW

La potencia suministrada a 3/4 de plena carga $P_2 = 75 \cdot 0{,}8 = 60$ kW

El rendimiento a 3/4 de plena carga $\eta = \frac{60}{60 + 1{,}0125 + 0{,}4} = 0{,}977 = 97{,}7\,\%$

c) El rendimiento máximo se verifica para una potencia suministrada a la cual las pérdidas en el cobre son igual a las del hierro 0,4 kW.

Entonces $\frac{1{,}8}{0{,}4} = \frac{100^2}{S_2^2}$

La potencia aparente de rendimiento máximo $S_2 = 100\sqrt{\frac{0{,}4}{1{,}8}} = 47{,}14$ kVA

d) Con rendimiento máximo y factor de potencia 1, $P_2 = S_2 \cos\varphi_2 = 47{,}14 \cdot 1 = 47{,}14$ kW

El rendimiento máximo $\eta_{máx} = \frac{47{,}14}{47{,}14 + 0{,}4 + 0{,}4} = 0{,}983 = 98{,}3\,\%$

B.6. Un transformador trifásico de 400 kVA, 20 000/400 V, 50 Hz se ensaya en cortocircuito conectándolo por el lado de alta tensión. Siendo las medidas del ensayo: 4,6 kW, 800 V, 11,55 A. Calcular:

a) Tensión porcentual de cortocircuito.
b) Regulación de tensión y tensión de línea en bornes del secundario trabajando a plena carga con factor de potencia 0,8 inductivo.
c) Intensidad de cortocircuito en el secundario.
d) Potencia de cortocircuito.

a) Intensidad nominal del devanado primario: $I_{L1} = \frac{S_n}{\sqrt{3}\,V_{L1}} = \frac{400\,000}{\sqrt{3} \cdot 20\,000} = 11{,}55$ A

El ensayo está realizado a la intensidad nominal.

La tensión de línea porcentual de cortocircuito:

$$u_{cc} = \frac{V_{Lcc}}{V_{L1}}\,100 = \frac{800}{20\,000} \cdot 100 = 4\,\%$$

© Ediciones Paraninfo

Los valores porcentuales se mantienen iguales para valores de fase o de línea.

b) El factor de potencia en el ensayo en cortocircuito:

$$\cos\varphi_{cc} = \frac{P_{cc}}{\sqrt{3}\, V_{cc} I_{L1}} = \frac{4\,600}{\sqrt{3}\cdot 800\cdot 11{,}55} = 0{,}287$$

$u_R = u_{cc}\cos\varphi_{cc} = 4\cdot 0{,}287 = 1{,}15\,\%$; $u_X = \sqrt{u_{cc}^2 - u_R^2} = \sqrt{4^2 - 1{,}15^2} = 3{,}83\,\%$

El factor de potencia de la carga $\cos\varphi_2 = 0{,}8$; $\varphi_2 = 36{,}87°$; $\operatorname{sen}\varphi_2 = 0{,}6$

El índice de carga cuando trabaja a plena carga, $\beta = 1$

La variación porcentual de tensión de línea o regulación de tensión:

$$u = \beta(u_R\cos\varphi_2 + u_X \operatorname{sen}\varphi_2) = 1\cdot(1{,}15\cdot 0{,}8 + 3{,}83\cdot 0{,}6) = 3{,}22\,\%$$

La tensión de línea en bornes del secundario:

$$V_{L2} = \frac{100 - u}{100} V_{L2V} = \frac{100 - 3{,}22}{100}\cdot 400 = 387 \text{ V}$$

c) La intensidad de línea nominal del secundario $I_{L2} = \dfrac{S_n}{\sqrt{3}\, V_{L2}} = \dfrac{400\,000}{\sqrt{3}\cdot 400} = 577{,}4$ A

La intensidad de cortocircuito en el secundario:

$$I_{cc} = \frac{I_{L2}}{u_{cc}} 100 = \frac{577{,}4}{4}\cdot 100 = 14\,435 \text{ A}$$

d) La potencia aparente de cortocircuito:

$$S_{cc} = \frac{S_n}{u_{cc}} 100 = \frac{400\,000}{4}\cdot 100 = 10\,000\,000 \text{ VA} = 10 \text{ MVA}$$

B.7. Un transformador Yz11 de 100 kVA, 20 000/400 V, 50 Hz y u_{cc}=4% se conecta en paralelo con otro transformador Yz11, de 50 kVA, 20 000/400 V, 50 Hz. y u_{cc}=4%. La carga total que suministran los dos transformadores es de 120 kVA. Calcular qué carga suministra cada uno.

La carga se reparte directamente proporcional a sus potencias nominales.

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{100}{50} = 2;\quad S_1 + S_2 = 120;\quad \frac{120 - S_2}{S_2} = 2;\quad S_2 = \frac{120}{3} = 40 \text{ kVA}$$

La carga que suministra el primer transformador: $S_1 = 120 - 40 = 80$ kVA

B.8. Un autotransformador monofásico elevador (fig. B.16) de 127/220 V, 50 Hz funciona suministrando 2 400 VA. Considerando el aparato ideal, calcular:

a) Intensidades que circulan en el devanado serie y común.

b) Potencia propia.

a) La intensidad de corriente absorbida por el primario:

$$I_1 = \frac{S_n}{V_1} = \frac{2\,400}{127} = 18{,}9 \text{ A}$$

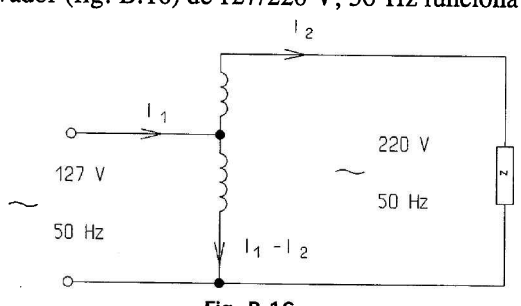


Fig. B.16

© Ediciones Paraninfo

La intensidad de corriente suministrada por el secundario:

$$I_2 = \frac{S_n}{V_2} = \frac{2\,400}{220} = 10{,}9 \text{ A}$$

La intensidad que circula por devanado serie $I_s = I_2 = 10{,}9$ A

La intensidad en el devanado común $I_{co} = I_1 - I_2 = 18{,}9 - 10{,}9 = 8$ A

b) La potencia propia o electromagnética $S_p = V_1 I_{co} = 127 \cdot 8 = 1\,016$ VA

B.9. Para construir un autotransformador monofásico 220/48 V, 50 Hz con un núcleo acorazado de sección geométrica 4×4 cm, considerando la sección neta el 90% de la sección geométrica, se admite una inducción máxima de 1,2 T y una densidad de corriente de 3 A/mm^2. Si el autotransformador es ideal, calcular:

a) Número de espiras en el devanado serie y común.

b) Diámetro de los conductores de cobre de ambos devanados.

a) La sección neta del núcleo $s_n = 0{,}9 \cdot 16 = 14{,}4$ cm^2

El flujo magnético en el núcleo $\Phi_{máx} = B_{máx} s_n = 1{,}2 \cdot 14{,}4 \cdot 10^{-4} = 1{,}73 \cdot 10^{-3}$ Wb.

La tensión en el devanado común $V_{co} = V_2 = 48$ V

La tensión en el devanado serie $V_s = V_1 - V_2 = 220 - 48 = 172$ V

El número de espiras del devanado serie:

$$N_s = \frac{V_s}{4{,}44 \Phi_{máx} f} = \frac{172}{4{,}44 \cdot 1{,}73 \cdot 10^{-3} \cdot 50} = 448 \text{ espiras}$$

El número de espiras del devanado común:

$$N_{co} = \frac{48}{4{,}44 \cdot 1{,}73 \cdot 10^{-3} \cdot 50} = 125 \text{ espiras}$$

b) La potencia propia o electromagnética se puede calcular de forma aproximada en función de la sección neta del núcleo:

$$S_p = s_n^2 = 14{,}4^2 = 207{,}36 \text{ VA}$$

La intensidad en el devanado serie:

$$I_s = I_1 = \frac{S_p}{V_1 - V_2} = \frac{207{,}36}{220 - 48} = 1{,}2 \text{ A}$$

La potencia nominal $S_n = S_1 = V_1 I_1 = 220 \cdot 1{,}2 = 264$ VA

La intensidad nominal secundaria $I_2 = \frac{S_n}{V_2} = \frac{264}{48} = 5{,}5$ A

La intensidad en el devanado común $I_{co} = I_2 - I_1 = 5{,}5 - 1{,}2 = 4{,}3$ A

La sección del conductor del devanado serie $s_s = \frac{I_s}{\delta} = \frac{1{,}2}{3} = 0{,}4$ mm^2

El diámetro del conductor del devanado serie se calcula a partir de su sección:

$$s_s = \pi \frac{d_s^2}{4}; \quad d_s = \sqrt{4 \frac{s_s}{\pi}} = \sqrt{4 \cdot \frac{0{,}4}{3{,}14}} = 0{,}71 \text{ mm}$$

© Ediciones Paraninfo

La sección del conductor del devanado común $s_{co} = \frac{I_{co}}{\delta} = \frac{4,3}{3} = 1,43 \text{ mm}^2$

El diámetro del conductor del devanado común:

$$d_{co} = \sqrt{4 \frac{s_{co}}{\pi}} = \sqrt{4 \cdot \frac{1,43}{3,14}} = 1,35 \text{ mm}$$

B.10. Un transformador de tensión de 50 VA, 22 000/110 V está conectado por el primario a una red de alta tensión. Calcular, considerando el aparato ideal:

a) Tensión de la línea a la que está conectado, si la tensión secundaria es de 99 V.

b) Potencia aparente que suministra el transformador de medida, si los aparatos conectados al secundario consumen 0,5 A.

a) La relación de transformación $m = \frac{V_1}{V_2} = \frac{22\,000}{110} = 200$

La tensión de la línea primaria $V_1 = m\, V_2 = 99 \cdot 200 = 19\,800$ V

c) La potencia aparente que suministra el secundario $S_2 = V_2 I_2 = 99 \cdot 0,5 = 49,5$ VA

B.11. Un transformador de intensidad de 30 VA y relación de intensidades 250. Alimenta a los aparatos de medida con una intensidad de 5 A, y la impedancia total es de 0,4 Ω. Calcular:

a) Intensidad del primario.

b) Potencia aparente que suministra por el secundario.

a) La intensidad del primario $I_1 = 250 \cdot 5 = 1\,250$ A

b) La potencia aparente que suministra:

$$S_2 = V_2 I_2; \quad V_2 = Z_2 I_2; \quad S_2 = Z_2 I_2^2 = 0,4 \cdot 5^2 = 10 \text{ VA}$$

PROBLEMAS PROPUESTOS

B.12. Un transformador monofásico, que tiene 620 espiras en el primario y 422 en el secundario, se conecta a una red alterna senoidal de 220 V, 50 Hz. Considerando el transformador ideal calcular:

a) El flujo máximo en el circuito magnético.

b) La f.e.m. del secundario.

c) El flujo máximo y la f.e.m. del secundario si la frecuencia pasa a ser 60 Hz.

Solución: a) $1,6 \cdot 10^{-3}$ Wb; b) 150 V; c) $1,33 \cdot 10^{-3}$ Wb, 150 V.

B.13. Un transformador monofásico de 10 kVA, 6000/240 V, se conecta a una tensión alterna senoidal de 240 V, 50 Hz para el ensayo en vacío. Consume en el ensayo una corriente de intensidad 1,8 A y una potencia de 80 W. Calcular el factor de potencia en vacío.

© Ediciones Paraninfo

B.14. Un transformador monofásico de 10 kVA, 6 000/240 V, 50 Hz se ensaya en vacío y en cortocircuito.

El ensayo en cortocircuito se realiza por el devanado de alta tensión, conectando el devanado de baja tensión en cortocircuito. Los datos obtenidos en el ensayo son: 250 V, 190 W, 1,67 A.

El ensayo en vacío se realiza conectando el devanado de baja tensión a una tensión alterna senoidal de 240 V, 50 Hz, siendo la intensidad 1,6 A y la potencia consumida 70 W.

Calcular:

a) Regulación de tensión a plena carga para un factor de potencia 0,8 inductivo.
b) Tensión en bornes del secundario a plena carga con factor de potencia unidad.
c) Rendimiento del transformador a plena carga con factor de potencia unidad.
d) Potencia aparente de rendimiento máximo.
e) Rendimiento máximo con factor de potencia 0,9 inductivo.
f) Intensidad de cortocircuito en el secundario, considerando la red de alimentación de potencia infinita.

Solución: a) 3,75%; b) 235,44 V; c) 97,47%; d) 6,07 kVA; e) 97,5%; f) 1 kA.

B.15. Un transformador trifásico de conexión Dy11, 1 000 kVA, 50 Hz, 20 000/400 V; se conecta a una línea trifásica de 20 kV, 50 Hz. Calcular considerando el transformador ideal:

a) Intensidad de línea en primario y secundario a plena carga.
b) Potencia que suministra a plena carga con factor de potencia 0,86 inductivo.
c) Tensión de fase del secundario.
d) Número de espiras por fase del primario si el secundario tiene 72 espiras por fase.

Solución: a) $I_{L1}=28{,}87$ A, $I_{L2}=1\,443$ A; b) 860 kW c) 230 V; d) 6 261 espiras.

B.16. En un transformador trifásico Yz11 de 250 kVA, 20 000/400 V, 50 Hz, tensión de cortocircuito 4%. Calcular:

a) Intensidad de cortocircuito en el secundario considerando la línea de alimentación de potencia infinita.
b) Potencia de cortocircuito.

Solución: a) 9,02 kA; b) 6 250 kVA.

B.17. Un transformador trifásico de 630 kVA, 20 000/400 V, 50 Hz se ensaya en cortocircuito y para una intensidad igual a la nominal consume 6 500 W. En el ensayo en vacío a la tensión nominal consume 1 300 W. Calcular:

a) Rendimiento a plena carga con factor de potencia unidad.
b) Potencia de rendimiento máximo con factor de potencia unidad y valor de dicho rendimiento.

Solución: a) 98,77%; b) 281,74 kVA, 99,1%

© Ediciones Paraninfo

B.18. Un transformador trifásico Yy de 630 kVA, 50 Hz, alimentado en vacío con 20000V, absorbe 1300 W con una tensión secundaria de 400 V. En cortocircuito, con una tensión primaria de 800 V, consume una potencia de 6500 W con una intensidad de corriente en el secundario de 909 A. Calcular:

a) Regulación de tensión a plena carga con factor de potencia 0,8 inductivo.
b) Rendimiento del transformador a esta carga.

Solución: a) 3,14%; b) 98,4%

B.19. Una carga de 1 875 kVA está alimentada por dos transformadores en paralelo, de 20 000/400 V y tensión porcentual de cortocircuito 6%. Uno de ellos tiene de potencia nominal 800 kVA y el otro de 1 250 kVA. Calcular la carga que suministra cada transformador.

Solución: $S_1 = 731{,}71$ kVA, $S_2 = 1\,143{,}29$ kVA

B.20. Se tiene un circuito de chapa magnética tipo acorazado, con sección geométrica del núcleo 30 cm^2. Se quiere construir, aprovechando este circuito, un autotransformador monofásico de relación de transformación 230/110 V, 50 Hz. Se considera la sección neta del núcleo el 90% de la sección geométrica. Admitiendo una inducción máxima en el núcleo de 1,2 T y una densidad de corriente en los conductores de 3 A/mm^2. Calcular considerando el autotransformador ideal:

a) Potencia propia aproximada.
b) Intensidades en los devanados serie y común a plena carga.
c) Diámetro de los conductores en los devanados serie y común.
d) Número de espiras en los devanados serie y común.

Solución: a) 729 VA; b) $I_s = 6{,}08$ A, $I_{co} = 6{,}63$ A; c) $d_s = 1{,}61$ mm, $d_{co} = 1{,}68$ mm; d) $N_s = 167$ espiras, $N_{co} = 153$ espiras.

B.21. Se utiliza un transformador de tensión de 50 VA, 22 000/110 V, conectado por el primario a una línea de alta tensión. Si la tensión secundaria es de 100 V y la impedancia total de los circuitos de medida conectados al secundario es de 315 Ω. Calcular:

a) Tensión en el primario.
b) Potencia aparente suministrada.

Solución: a) 20 000 V; b) 31,7 VA.

B.22. En un cuadro de medida de un centro de transformación se utiliza un transformador de intensidad de 30 VA, 10/5 A, que se conecta por el primario a una línea de corriente alterna. Si por el secundario circulan 4,9 A, calcular:

a) Intensidad que circula por el primario.
b) Impedancia máxima de los circuitos de medida conectados al secundario para no sobrepasar la potencia de precisión del transformador.

Solución: a) 9,8 A; b) 1,25 Ω

© Ediciones Paraninfo

C

PROYECTO TÉCNICO

C.1. PROYECTO TÉCNICO

El proyecto técnico consiste en un conjunto de documentos que definen una obra a realizar, de forma que un técnico competente pueda dirigir, siguiendo estos documentos, las obras o trabajos proyectados.

Un proyecto técnico completo es un proceso que comprende varias fases, como estudio previo con anteproyecto, el proyecto en sí, ejecución de lo proyectado y comprobación del resultado.

Los proyectos técnicos se realizan de acuerdo con la legislación vigente, según la actividad que se proyecta. Se tramitan ante la Administración Pública competente y ante entidades no oficiales. La norma UNE 157001, indica los criterios generales para la elaboración de proyectos.

C.2. FASES DE UN PROYECTO TÉCNICO

El proyecto técnico puede ser un proceso complicado, que en algunos casos, como la realización de un aparato o construcción compleja, es necesario realizar en su totalidad. En la mayoría de los casos, como en una instalación eléctrica el proyecto se simplifica al poder prescindir de alguna de sus fases.

Las fases de un proyecto técnico completo son:

1) *Estudio previo*. Consiste en el análisis de los condicionantes de todo tipo (económicos, técnicos, etc.) que afectan al proyecto.
2) *Anteproyecto*. Consiste en realizar el diseño previo de soluciones posibles, realizando los cálculos pertinentes.
   En algunos caso, como en la construcción de nuevos aparatos, se realizan prototipos, que se ensayan antes de realizar el proyecto definitivo.
   Para tramitar ante la administración la solicitud de una obra se utiliza en ocasiones el *anteproyecto*, que consiste en un conjunto de documentos para definir en líneas generales una obra o trabajos a realizar, dando una idea de conjunto y el presupuesto aproximado. En el anteproyecto se utilizan los siguientes documentos:
   - Memoria descriptiva.
   - Planos a gran escala.
   - Valoraciones aproximadas.

© Ediciones Paraninfo

3) *Proyecto*. Consiste en la descripción del trabajo a realizar, con el cálculo técnico y económico.
El proyecto consta de los siguientes documentos:
- Memoria.
- Planos.
- Presupuesto.
- Pliego de condiciones.
- Estudio de seguridad y salud o estudio básico de seguridad y salud (según indique la legislación).

Las instalaciones eléctricas de A.T. para su ejecución y puesta en servicio necesitan presentación previa de proyecto.
En instalaciones eléctricas de B.T. la administración hace una clasificación de las instalaciones en función de su importancia. Así, existen instalaciones que necesitan para su ejecución, puesta en servicio y tramitación aprobación previa de proyecto, e instalaciones más simples que no necesitan proyecto y quedan definidas por la Memoria Técnica de Diseño (MTD) redactada por el instalador autorizado o el técnico titulado competente (ITC-BT-04).

4) *Tramitación*. El proyecto técnico se presenta al visado en el Colegio Profesional al que pertenece el técnico competente que lo confecciona. El visado consiste en un reconocimiento de la firma del técnico, observancia de los acuerdos sobre el ejercicio profesional y corrección formal de los documentos que integran el proyecto según la legislación vigente.
Una vez visado, el proyecto se presenta ante los órganos competentes de la Administración Pública y ante otras entidades no oficiales, a fin de obtener los permisos y licencias necesarios para la ejecución de la obra proyectada.

5) *Ejecución*. Consiste en la realización de la obra proyectada.
En algunos casos la adjudicación de la obra es por demanda de oferta, que se publica por medios diversos. Los organismos públicos suelen publicarla en los Boletines Oficiales. El que ofrece la ejecución de la obra debe cumplir los requisitos establecidos en el pliego de condiciones, lo que se compruebe en tras la apertura de plicas (pliego cerrado y sellado). Se firma un contrato (en el que figuran programa de realización, plazos, etc.) con el adjudicatario, que puede a su vez contratar la obra a terceros.

6) *Recepción*. Consiste en la comprobación de la obra o producto realizado, verificando que cumple las especificaciones de funcionamiento y demás características. Si las pruebas dan resultado satisfactorio se firma el acta de recepción.

© Ediciones Paraninfo

C.3. DOCUMENTOS DEL PROYECTO TÉCNICO

■ Documentos del proyecto en general

Los documentos que definen técnicamente la obra a realizar y sus condiciones, según el proyecto, se presentan en forma de informes o de planos.

1) *Memoria.* Documento que contiene los datos básicos que han servido para la definición de la obra y la justificación de la solución técnica adoptada. Lleva al principio un índice, todas las páginas numeradas, y como mínimo consta de:
   - Objeto del proyecto.
   - Peticionario.
   - Emplazamiento.
   - Descripción de las instalaciones, según las reglamentaciones que deben cumplir.

   Como anejos a la memoria se añaden otros documentos, como cálculos justificativos y otra documentación necesaria, que puede ser diversa según el tipo de proyecto (estudio medioambiental, estudio económico, etc.).
   Al final de la memoria y de los anejos a la misma, figura la fecha, firma, nombre, apellidos del técnico proyectista y número de colegiado.
2) *Planos.* Los planos del proyecto tienen carácter vinculante, son documentos que ordenan ejecutar la obra tal como se define en ellos. Al principio se incluye un índice donde figuran los planos de que consta el proyecto numerados. Según el tipo de proyecto los planos son distintos:
   - Planos de situación geográfica.
   - Planos de emplazamiento.
   - Planos de arquitectura (edificios).
   - Planos de obra civil (movimientos de terreno, zanjas, etc.).
   - Planos de estructuras y cimentaciones.
   - Planos de instalaciones

   Los planos deben estar perfectamente delineados, en papel normalmente de tamaño A-3 o A-4, con cajetín en todos ellos con la información siguiente: título del proyecto, situación de la obra, título del plano o esquema, peticionario, número de plano, escala, fecha y autor del proyecto con su firma, nombre, apellidos y número de colegiado.
   Los planos de formato superior al tamaño A-4 se pliegan de forma que quede a la vista un formato A-4 con el cajetín, según norma UNE 1027.
   Cada plano debe estar rotulado y acotado de forma que contenga toda la información necesaria de acuerdo con su destino, con referencias a otros planos, en caso necesario, para que todo el proyecto forme un conjunto coordinado.

© Ediciones Paraninfo

3) *Presupuesto*. El presupuesto está desarrollado por capítulos independientes de la obra o unidades constructivas. En él se especifican todos los elementos a instalar y que figuran en el proyecto, necesarios para la puesta en servicio de la instalación, con los precios actuales en el mercado.
El presupuesto viene presentado en hojas numeradas, con columnas de la forma siguiente:

Nº de orden	Nº de unidades de obra o piezas	DESIGNACIÓN	IMPORTE	
			Precio de la unidad Euros	Total Euros

En el precio de las unidades constructivas se indica el total de material y mano de obra. A ello habrá que añadir gastos generales, beneficio industrial, impuesto (IVA), etc.
El importe total del presupuesto se suele indicar en números y en letra.
Al final del presupuesto figura la fecha y firma del técnico proyectista, nombre, apellidos y número de colegiado.

4) *Pliego de condiciones*. Es el documento que indica las condiciones de realización de la obra en los aspectos de materiales, planificación, ejecución y calidad. Vinculan a través del contrato y pliego de condiciones particular para cada contratista, al inversor y contratista o contratistas que intervienen en la otra.
El aspecto técnico de este documento debe acompañar todo proyecto; se llama *pliego de condiciones técnicas* y determina las condiciones mínimas aceptables para su ejecución:

- Características de los materiales a emplear con las condiciones que deben reunir y ensayos a los que deben ser sometidos, en caso necesario.
- Programación de los trabajos a realizar para la ejecución de la obra, con las normas y precauciones a adoptar.
- Normas para la elaboración de materiales de fábrica.
- Normas técnicas para la recepción de la obra.
- Forma de medir las distintas unidades de obra.

En ocasiones se incluyen en el pliego de condiciones otros aspectos, como plazos de garantía de las instalaciones, aplicación de fianzas, bases del concurso subasta (cuando sea necesario), recepción provisional, recepción definitiva, etc.
Al final del pliego de condiciones va la fecha, firma, nombre y apellidos del proyectista con su número de colegiado.

©. Ediciones Paraninfo

5) *Estudio de seguridad y salud.* En el proyecto debe incluirse un estudio de seguridad y salud (Real Decreto 1627/1997), que según el tipo de proyecto, duración estimada de las obras, etc. puede ser un estudio completo o un estudio básico.

El *estudio de seguridad y salud* consta, como mínimo, de los siguientes documentos:

- Memoria descriptiva. Contiene las descripción de equipos y medios auxiliares a utilizar. Identificación de riesgos laborales que pueden ser evitados con las medidas técnicas necesarias. Identificación de los riesgos laborales que pueden reducirse con las medidas y protecciones necesarias. Descripción de los servicios sanitarios y comunes necesarios en la obra. Se tendrá en cuenta las condiciones del entorno en el que se realice la obra.
- Pliego de condiciones particulares. Con las normas y prescripciones aplicables a la utilización de máquinas y equipos preventivos.
- Planos. Con gráficos y esquemas de las medidas preventivas de riesgo.
- Mediciones. Con medidas de los elementos de seguridad y salud.
- Presupuesto. Cuantificación de gastos previstos para aplicación del estudio de seguridad y salud.

El *estudio básico de seguridad y salud* describe las normas de seguridad y salud aplicables a la obra, teniendo en cuenta las condiciones del entorno en el que se realice. Identificación de riesgos laborales que pueden ser evitados con las medidas técnicas necesarias. Identificación de los riesgos laborales que pueden reducirse con las medidas y protecciones necesarias.

Al final del estudio completo o del estudio básico de seguridad y salud va la fecha, firma, nombre y apellidos del proyectista con su número de colegiado.

■ **Documentos del proyecto de una línea aérea de M.T.**

El proyectista de una línea eléctrica conoce el punto al que hay que suministrar energía eléctrica. Para conocer el punto de entronque con otra línea de distribución o centro de transformación, debe consultar con la empresa suministradora.

Después de conocer los extremos de la línea, se elige la traza más conveniente por donde va a efectuarse el tendido. Es necesario el permiso por escrito de los propietarios del terreno donde se van a colocar los apoyos. En caso necesario se puede proceder a la expropiación forzosa de los terrenos que ocupan los apoyos.

El Reglamento de Líneas de A.T.(ITC-LAT-09) indica los documentos de que debe constar el proyecto. Basándose en ello se utilizan los documentos siguientes:

1) *Memoria.* con los siguientes apartados preceptivos:

- Justificación de la necesidad de la línea.
- Emplazamiento.
- Trazado, indicando las provincias y términos municipales afectados.

© Ediciones Paraninfo

- Descripción de la instalación, indicando características y materiales.
- Relación de cruzamientos y paralelismos.
- Anexo de afecciones, con la relación de bienes u derechos afectados.

2) *Cálculos*. Contiene los cálculos eléctricos y mecánicos, con:
   - Cálculos eléctricos del conductor con caída de tensión y pérdida de potencia.
   - Cálculo mecánico que justifique el conjunto de la línea y sus elementos.
3) *Planos*. Deberán especificar los aspectos siguientes:
   - Situación, de forma que el emplazamiento de la línea quede perfectamente definido.
   - Perfil longitudinal y planta de la línea, con escala mínima horizontal 1:2 000 y escala vertical 1:500, situándose en planta todos los servicios que existen en una franja de 50 m de anchura a cada lado de la línea.
   - Tipos de apoyo y cimentación.
   - Detalles de aisladores, herrajes y tomas de tierra.
4) *Presupuesto*.
   - Mediciones.
   - Presupuesto de las partidas principales de la línea.
   - Presupuesto general de la instalación. Con presupuesto de ejecución de las distintas unidades constructivas, incrementado con otros gastos administrativos, gastos generales, beneficio industrial y cualquier otro que proceda.
5) *Pliego de condiciones*. Con las condiciones técnicas de con informcación de materiales y equipos. A las condiciones técnicas se le añaden otras de tipo administrativo, cuando sea necesario según la legislación o lo requiera el propietario de la instalación.
6) *Estudio de seguridad o estudio básico de seguridad y salud*. Según la legislación sobre seguridad.

■ **Documentos del proyecto de C.T. en edificio prefabricado**

Antes de la confección del proyecto es necesario solicitar datos de la empresa suministradora de energía, que deberá facilitarlos (MIE RAT 19): tensión nominal de la red, nivel de aislamiento, intensidad máxima de cortocircuito trifásico a tierra y tiempos máximos de desconexión en caso de defectos. La documentación del proyecto debe cumplir la instrucción MIE RAT 20. Basándose en ella se utilizan los siguientes documentos:

1) *Memoria*
   - Antecedentes y objeto del proyecto, con reglamentación y normativa considerada.
   - Titular de la instalación.

© Ediciones Paraninfo

- Emplazamiento.
- Características generales del C.T.: dimensiones, accesos, etc.
- Características de la instalación eléctrica: Celdas, transformador, cuadro de baja, alumbrado, red de tierras, protecciones, etc.
- Características de la línea subterránea de alimentación.

2) *Cálculos*

- Intensidades de corriente de cortocircuito en M.T. y en B.T.
- Cálculo de la línea de alimentación al C.T.
- Cálculo del embarrado.
- Cálculo de la ventilación necesaria.
- Cálculos del sistema de puesta a tierra.

3) *Planos*

- Plano de situación.
- Entronque y línea subterránea de M.T.
- Planos del C.T.: excavación, vistas de alzado, planta, frontal y lateral.
- Esquemas unifilares de la línea y del C.T.
- Sistemas de puesta a tierra.

4) *Presupuesto*

- Cuantificación de la cantidad de cada una de las unidades constructivas para el precio final de ejecución de la obra.
- Presupuesto general. Al de la ejecución del proyecto se le añaden otros gastos, como gastos generales, beneficio industrial y cualquier otro que proceda.

5) *Pliego de condiciones*. Además del pliego de condiciones técnicas puede llevar otras condiciones de tipo general cuando sea necesario según la legislación o lo requiera el propietario de la instalación.

6) *Estudio de seguridad o estudio básico de seguridad y salud.* Según la legislación sobre seguridad.

■ **Documentos del proyecto de instalaciones eléctricas de B.T.**

Las instalaciones eléctricas de B.T. son muy variadas según sean en viviendas, en edificios singulares o instalaciones industriales. El REBT en la instrucción ITC-BT-04 indica los datos que se expresarán especialmente. En el proyecto de instalaciones industriales se utilizan los documentos siguientes:

1) *Memoria*

- Antecedentes y objeto del proyecto, con normativa considerada.
- Titular de la instalación.
- Situación.
- Clasificación y características de las instalaciones.

© Ediciones Paraninfo

- Clasificación según el riesgo de las dependencias
- Características: canalizaciones, identificación de los conductores, receptores, protecciones, etc.

• Necesidades de potencia.
- Potencia instalada en fuerza y alumbrado.
- Contadores de energía y potencia a contratar.

• Descripción de la instalación.
- Instalaciones de enlace.
- Instalaciones receptoras de fuerza y alumbrado.
- Instalación de puesta a tierra.
- Otras instalaciones: señalización, alumbrados especiales, compensadores de reactiva, etc.

• Programa de ejecución de la instalación.

2) *Cálculos*
- Cálculos de las canalizaciones y protecciones de fuerza y alumbrado.
- Cálculos luminotécnicos.
- Cálculo de puesta a tierra.

3) *Planos*
- Plano de situación
- Plano general de la industria con ubicación de los receptores.
- Esquema unifilar completo, indicando potencias de los receptores y características de canalizaciones y protecciones.
- Croquis del trazado de la instalación.
- Esquema de puesta a tierra.

4) *Presupuesto*
- Presupuesto de los elementos que constituyen la instalación, con cantidad y precio de los mismos, totalizando el importe general de ejecución de obra. Se le suele añadir un 1,5% de gastos imprevistos justificables.
- Presupuesto general. Al presupuesto de ejecución se le añaden los gastos generales y el beneficio industrial, realizándose a continuación el IVA del total.

5) *Pliego de condiciones*. Cuando sea necesario según la legislación o lo requiera el propietario de la instalación, además del pliego de condiciones técnicas se confecciona el pliego de condiciones generales.

6) *Estudio de seguridad o estudio básico de seguridad y salud*. Según la legislación de seguridad.

■ **Documentos de la Memoria Técnica de Diseño en las instalaciones de B.T.**

La MTD se redactará sobre impresos, según modelo determinado por el Órgano competente de la Comunidad Autónoma. Se incluirán en ella los siguientes datos:

© Ediciones Paraninfo

- Los referentes al propietario.
- Identificación de la persona que firma la memoria y su competencia.
- Emplazamiento de la instalación y uso a que se destina.
- Relación nominal de los receptores que se prevean instalar y su potencia.
- Cálculos justificativos de la línea general de alimentación, derivaciones individuales y líneas secundarias, elementos de protección y utilización.
- Pequeña memoria descriptiva.
- Esquema unifilar de la instalación, con protecciones, secciones y utilización.
- Croquis del trazado.

C.4. TRAMITACIÓN DE LOS PROYECTOS TÉCNICOS

Terminado y visado el proyecto técnico, se necesita la tramitación ante los organismos oficiales para la obtención de licencias y permisos de obra, de acuerdo con la legislación vigente.

La licencia para la ejecución de la obra, que debe estar de acuerdo con el Plan de Urbanización y con las Ordenanzas Municipales, se solicita del Ayuntamiento.

La autorización para una nueva instalación o modificación de una instalación eléctrica corresponde al Ministerio de Industria y Energía o al organismo competente de la Comunidad Autónoma, ante el que se tramita la autorización.

Según el tipo de proyecto es necesario solicitar permisos de otros organismos Administrativos o de entidades privadas. Las instalaciones eléctricas deben tramitarse ante la empresa suministradora de energía, que tiene sus normas particulares aprobadas por el Ministerio de Industria y Energía o por los organismos competentes de la Comunidad Autónoma.

C.5. ESTUDIO PREVIO DEL PROYECTO DE UNA INSTALACIÓN ELÉCTRICA DE BAJA TENSIÓN

Antes de iniciar el proyecto de ejecución de una instalación eléctrica, es necesario un estudio previo, que consiste en una observación de las características técnicas con una serie de referencias. Antes de realizar un diseño previo es necesario conocer los receptores a instalar, para establecer la demanda de potencia y necesidades de suministro de energía.

■ Receptores a instalar

En los receptores hay que tener en cuenta:

1) *Alimentación.* Los receptores pueden ser monofásicos o trifásicos y estos alimentados por las tres fases o por las tres fases y el neutro.
   Es necesario tener en cuenta si la instalación va a necesitar *suministro de reserva* y *sistemas de alimentación ininterrumpida* (SAI).
2) *Tensión, intensidad y factor de potencia.* Datos que se obtienen de su placa de características nominales.

© Ediciones Paraninfo

3) *Motores*. Es necesario tomar nota de los dispositivos de arranque y tener en cuenta que para su alimentación se prevé un incremento de corriente del 25% del consumo del mayor motor alimentado por la línea (ITC-BT-47).
4) *Lámparas de descarga*. Tienen elementos auxiliares de arranque y funcionamiento. En el dimensionamiento de la línea de alimentación, para tener en cuenta el consumo de los elementos auxiliares (ITC-BT-44), se incrementa su potencia de consumo en un 80%.

■ **Demanda de potencia**

En la demanda de potencia de una instalación se presentan dos casos:

1) *Receptores conocidos*. Cuando las características de los equipos a instalar son conocidas, la demanda de potencia se obtiene de la potencia nominal.
En general, según el uso a que se destine la instalación, la suma de la potencia de los receptores viene afectada por un coeficiente de simultaneidad, que suele variar entre 0,4 y 0,9.
En muchos casos no se considera factor de simultaneidad sobredimensionando la instalación, para posibles ampliaciones.
Para líneas de tomas de corriente se suele tomar un factor de simultaneidad entre 0,1 y 0,3. También se utiliza (0,1+0,9/n), siendo n=nº de tomas.
2) *Receptores desconocidos*. Si los receptores a instalar son de características desconocidas por el proyectista, se parte para la demanda de potencia, del uso del local y de su superficie.

■ **Suministro de energía**

Según la potencia prevista de consumo, es necesario solicitar de la empresa suministradora de energía datos sobre punto de conexión de la acometida en baja o media tensión. Si la acometida es en M.T. hay que solicitar datos para el proyecto del centro de transformación.

■ **Diseño previo**

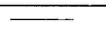
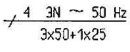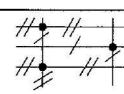
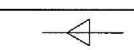
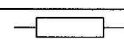
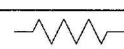
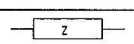
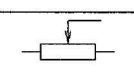
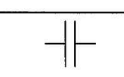
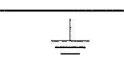
En el inicio del diseño de la instalación se realizan las siguientes fases:

1) *Situación de los receptores*. Es necesario situar sobre un plano los emplazamientos de los elementos a instalar, receptores, cuadros de protección y centro de transformación si fuera necesario.
2) *Trazado de canalizaciones*. Sobre un plano se trazan los recorridos de las canalizaciones que enlazan los distintos elementos de la instalación. El tipo de distribución influye en el número de conductores en las canalizaciones en B.T. (el esquema de distribución más utilizado es TT).
3) *Elección de materiales*. Se eligen los materiales que configurarán la instalación, cables, aparamenta, tubos, etc. según el tipo de local y el uso a que se destina (locales de pública concurrencia, locales con peligro de incendio, con presencia de polvo, etc.).

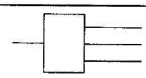
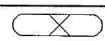
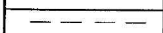
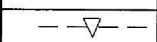
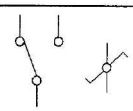
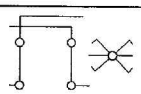
© Ediciones Paraninfo

D

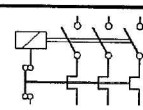
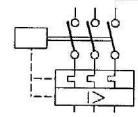
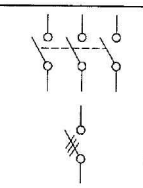
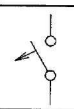
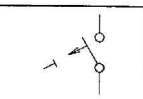
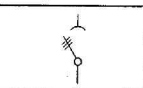
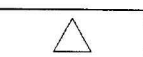
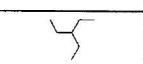
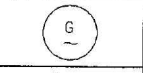
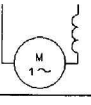
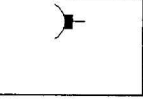
SÍMBOLOS GRÁFICOS

SÍMBOLOS	DENOMINACIÓN	SÍMBOLOS	DENOMINACIÓN
NATURALEZA DE LA CORRIENTE			
	Corriente continua.		Corriente continua o corriente alterna indistintamente.
	Corriente alterna.		
SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN			
	Corriente alterna de m fases y frecuencia f.	N	Neutro.
	Polaridad positiva.	—	Polaridad negativa.
LÍNEAS, CONDUCTORES			
	Línea en general, un conductor o un grupo de varios conductores.		Línea de tres conductores en representación unifilar y multifilar.
	Circuito de corriente trifásica, 50 Hz, con tres conductores de 50 mm^2 y el neutro de 25 mm^2		
TERMINALES Y CONEXIONES			
	Unión o conexión de conductores, especialmente unión fija.		Unión desmontable, borne.
	Derivación.		Conductores o canalizaciones cruzadas y conectadas.
	Terminal para cable.		
RESISTENCIAS, BOBINAS, CONDENSADORES Y OTROS ELEMENTOS			
	Variabilidad, símbolo general.		Resistencia en general.
	Resistencia no reactiva.		Resistencia en el caso de que no sea necesario especificar si es reactiva.
	Impedancia.		Inductancia.
	Reóstato.		Condensador.
			Tierra, toma de tierra.

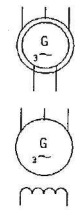
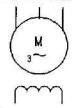
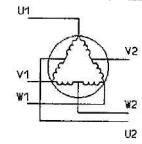
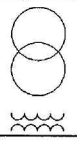
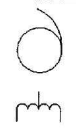
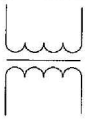
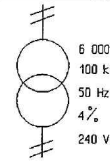
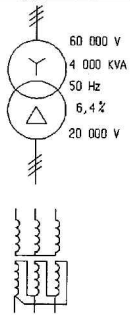
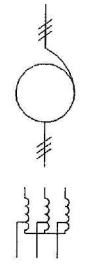
© Ediciones Paraninfo

SÍMBOLOS	DENOMINACIÓN	SÍMBOLOS	DENOMINACIÓN
	Masa, toma de masa.		Línea de separación o de marco.
	Elemento de pila o acumulador.		Batería de acumuladores.
SÍMBOLOS PARA ESQUEMAS EN EDIFICACIONES			
	Caja de llegada para alimentación general.		Cuadro de distribución con una canalización de entrada y tres de salida.
LÁMPARAS			
	Lámpara de señalización.		Lámpara de descarga.
			Lámpara en general.
TOMAS DE CORRIENTE			
	Base de toma de corriente de poco. consumo.		Base de toma de corriente con contacto de protección (por ejemplo: conexión a tierra).
MANDOS MECÁNICOS			
	Sentido del esfuerzo o del movimiento de rotación hacia la izquierda.		Sentido del esfuerzo o del movimiento de traslación hacia la derecha.
	Acoplamiento mecánico.		Enclavamiento mecánico.
APARATOS DE CONEXIÓN Y PROTECCIÓN			
	Interruptor unipolar.		Conmutador bidireccional.
	Conmutador de cruce.		Interruptor seccionador.
	Seccionador fusible.		Órgano de mando con devanado único.
	Órgano de mando de relé térmico.		Órgano de mando con desconexión. por máxima corriente.

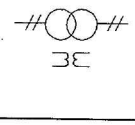
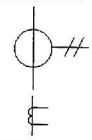
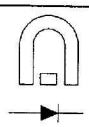
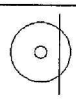
© Ediciones Paraninfo

SÍMBOLOS	DENOMINACIÓN	SÍMBOLOS	DENOMINACIÓN
	Órgano de mando con pasada retardada a la posición de trabajo.		Contactor con relé térmico.
	Órgano de mando con pasada retardada a la posición de reposo.		
	Pararrayos autoválvula.		Interruptor automático con disparadores magnetotérmicos.
	Pulsador que desconecta al pulsar.		
	Pulsador que establece contacto al pulsar.		Interruptor tripolar en representación. unifilar y multifilar.
	Fusible, cortacircuito.		
	Interruptor de protección de corriente máxima.		Interruptor de protección contra defecto de aislamiento. Diferencial.
	Interruptor automático.		Seccionador tripolar.
MODO DE CONEXIÓN DE LOS DEVANADOS DE CORRIENTE ALTERNA			
	Devanado trifásico, conexión V.		Devanado trifásico, conexión en triángulo.
	Devanado trifásico, conexión en estrella.		Devanado trifásico en zig-zag.
MÁQUINAS ELÉCTRICAS			
	Devanado en general, devanado de excitación en paralelo o independiente.		Devanado serie.
	Devanado de conmutación o compensación.		Generador de corriente continua. Símbolo general.
	Motor de corriente continua. Símbolo general.		Generador de corriente alterna. Símbolo general.
	Motor de corriente alterna de colector, monofásico serie.		Escobillas sobre colector.

© Ediciones Paraninfo

SÍMBOLOS	DENOMINACIÓN	SÍMBOLOS	DENOMINACIÓN
	Motor de corriente alterna. Símbolo general.		Alternador trifásico.
	Motor sincrónico.		Motor de inducción trifásico con rotor en cortocircuito.
	Motor de inducción trifásico con rotor bobinado.		Motor monofásico con rotor en cortocircuito.
	Motor de inducción trifásico con rotor en cortocircuito y con seis bornes de salida del estátor.		Motor de polos conmutables. Dos velocidades.
	Transformador.		Autotransformador.
	Transformador cuando es preciso indicar la presencia de núcleo ferromagnético.		Transformador monofásico. (6 000/240 V, 100 kVA, 50 Hz, tensión de cortocircuito 4%).
	Transformador trifásico. (60 000/20 000 V, 4 000 kVA, 50 Hz, tensión de cortocircuito 6,4%; conexión: estrella-triángulo).		Autotransformador trifásico; conexión: estrella.

© Ediciones Paraninfo

SÍMBOLOS	DENOMINACIÓN	SÍMBOLOS	DENOMINACIÓN
	Transformador de tensión.		Transformador de intensidad.
APARATOS DE MEDIDA			
	Aparato indicador. Símbolo general.		Aparato registrador. Símbolo general.
	Contador. Símbolo general.		Tensión de ensayo 500 V.
	Tensión de ensayo 2 kV.		Posición de empleo vertical.
	Posición de empleo horizontal.		Posición de empleo inclinada el ángulo indicado respecto a la horizontal.
1,5	Clase del aparato.		Aparato de bobina móvil e imán fijo.
	Aparato de bobina móvil e imán fijo con rectificador.		Aparato de hierro móvil.
	Aparato electrodinámico.		Aparato ferrodinámico.
	Aparato de inducción.		Aparato de lengüetas vibrantes.
	Corrector de cero.		Voltímetro.
	Amperímetro.		Vatímetro.
	Frecuencímetro.		Óhmetro.
	Galvanómetro.		Contador de energía activa.
	Reloj.		Contador de energía reactiva.

© Ediciones Paraninfo

E

SOLUCIONES A LOS PROBLEMAS DE RECAPITULACIÓN

Capítulo 1: LÍNEAS DE DISTRIBUCIÓN

Problema P.1-1.

a) La potencia aparente $S = \sqrt{3}\, V_L I_L$

La intensidad de línea. $I_L = \dfrac{S}{\sqrt{3}\, V_L} = \dfrac{1 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 20\,000} = 28{,}87$ A

La densidad de corriente $\delta = \dfrac{I_L}{s}$

La sección mínima $s = \dfrac{I_L}{\delta} = \dfrac{28{,}87}{3} = 9{,}62$ mm^2

b) La intensidad de línea: $I_L = \dfrac{S}{\sqrt{3}\, V_L} = \dfrac{1 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 15000} = 38{,}49$ A

La sección mínima: $s = \dfrac{I_L}{\delta} = \dfrac{38{,}49}{3} = 12{,}83$ mm^2

Problema P.1-2.

Utilizando números complejos y considerando el vector tensión horizontal.

$$\boldsymbol{I}_1 = \frac{230\angle 0°}{50\angle 30°} = 4{,}6\angle -30° \text{ A}$$

La intensidad consumida por la instalación de alumbrado

$I_2 = \dfrac{P_2}{V \cos\varphi_2} = \dfrac{2400}{230 \cdot 0{,}86} = 12{,}13$ A; $\cos\varphi_2 = 0{,}86$; $\varphi_2 = 30{,}68°$; $\boldsymbol{I}_2 = 12{,}13\angle -30{,}68° \text{ A}$

La intensidad consumida por el motor.

$$I_3 = \frac{P_3}{V \cos\varphi_3} = \frac{700}{230 \cdot 0{,}8} = 3{,}8 \text{ A}; \quad \cos\varphi_3 = 0{,}8; \quad \varphi_3 = 36{,}87°;$$

$$\boldsymbol{I}_3 = 3{,}8\angle -36{,}87° \text{ A}$$

La intensidad total y el factor de potencia total

$$\boldsymbol{I} = \boldsymbol{I}_1 + \boldsymbol{I}_2 + \boldsymbol{I}_3 = 20{,}5\angle -31{,}72° \text{ A}; \quad \cos\varphi = \cos 31{,}72° = 0{,}85$$

Problema P.1-3.

a) La intensidad de línea en el primer receptor es igual a la de fase, por la conexión estrella. Considerando la intensidad simple o de fase R como horizontal.

© Ediciones Paraninfo

$$\boldsymbol{I}_{L1} = \boldsymbol{I}_{R1} = \frac{\boldsymbol{V}_R}{\boldsymbol{Z}_{R1}} = \frac{230\angle 0°}{100\angle 0°} = 2{,}3\angle 0° \text{ A}$$

b) La intensidad de línea en el segundo receptor.

$$I_{L2} = \frac{P_2}{\sqrt{3} V_L \cos\varphi_2} = \frac{8000}{\sqrt{3}\cdot 400\cdot 0{,}8} = 14{,}43 \text{ A}; \quad \cos\varphi_2 = 0{,}8; \quad \varphi_2 = 36{,}87°;$$

$$\boldsymbol{I}_{L2} = \boldsymbol{I}_{R2} = 14{,}43\angle -36{,}87° \text{ A}$$

c) La potencia absorbida por el motor a plena carga:

$$P_{ab} = \frac{P_u}{\eta} = \frac{15000}{0{,}88} = 17045{,}45 \text{ W}$$

La intensidad absorbida:

$$I_{L3} = \frac{P_{ab}}{\sqrt{3} V_L \cos\varphi_3} = \frac{17045{,}45}{\sqrt{3}\cdot 400\cdot 0{,}86} = 28{,}61 \text{ A}; \quad \cos\varphi_3 = 0{,}86; \quad \varphi_3 = 30{,}68°;$$

$$\boldsymbol{I}_{L3} = \boldsymbol{I}_{R3} = 28{,}61\angle -30{,}68° \text{ A}$$

d) La intensidad de línea total. $\boldsymbol{I}_L = \boldsymbol{I}_R = \boldsymbol{I}_{L1} + \boldsymbol{I}_{L2} + \boldsymbol{I}_{L3} = 44{,}93\angle -31{,}17° \text{ A}$

e) El factor de potencia total: cosφ=cos 31,17°=0,856, inductivo.

La potencia activa total consumida por la instalación.

$$P = \sqrt{3} V_L I_L \cos\varphi = \sqrt{3}\cdot 400\cdot 44{,}93\cdot 0{,}856 = 26646 \text{ W} = 26{,}6 \text{ kW}$$

También por el principio de separación de potencias:

$$P = P_1 + P_2 + P_3 = 3\cdot 100\cdot 2{,}3^2\cdot 10^{-3} + 8 + 17{,}045 = 26{,}6 \text{ kW}$$

Problema P.1-4.

a) La intensidad por fase de alumbrado:

$$I_1 = \frac{P_1}{V_1 \cos\varphi_1} = \frac{1200}{230\cdot 0{,}86} = 6{,}07 \text{ A}; \quad \cos\varphi_1 = 0{,}86; \quad \varphi_1 = 30{,}68°;$$

$$\boldsymbol{I}_1 = \boldsymbol{I}_{R1} = 6{,}07\angle -30{,}68° \text{ A}$$

b) La intensidad de línea de fuerza:

$$I_{L2} = \frac{P_2}{\sqrt{3} V_L \cos\varphi_2} = \frac{20000}{\sqrt{3}\cdot 400\cdot 0{,}8} = 36{,}08 \text{ A}; \quad \cos\varphi_2 = 0{,}8; \quad \varphi_2 = 36{,}87°;$$

$$\boldsymbol{I}_{L2} = \boldsymbol{I}_{R2} = 36{,}08\angle -36{,}87° \text{ A}$$

c) La potencia activa total: $P = 3P_1 + P_2 = 3\cdot 1{,}2 + 20 = 23{,}6 \text{ kW}$

La intensidad total y el factor de potencia total:

$$\boldsymbol{I}_L = \boldsymbol{I}_R = \boldsymbol{I}_{R1} + \boldsymbol{I}_{R2} = 42{,}12\angle -35{,}99° \text{ A}; \cos\varphi = 0{,}809$$

Problema P.1-5.

Considerando la tensión $\boldsymbol{V}_R$ como origen de fases: $\boldsymbol{V}_R$=230∠0° V; $\boldsymbol{V}_S$=230∠-120° V y $\boldsymbol{V}_T$=230∠120° V

La intensidad en la fase S del primer receptor: $I_{S1} = \sqrt{3}\, I_{f1} = \sqrt{3}\,\frac{400}{100} = 6{,}93 \text{ A}$

$$\boldsymbol{I}_{S1} = 6{,}93\angle -120° \text{ A}$$

© Ediciones Paraninfo

Para calcular las intensidades se convierte el receptor en estrella en otro receptor equivalente en triángulo.

La impedancia compleja Z_{RS} de una rama del triángulo se calcula por la fórmula:

$$Z_{RS} = Z_R + Z_S + \frac{Z_R \cdot Z_S}{Z_T} = 10+10+\frac{100}{10\,j} = 20-10\,j = 22{,}36\angle -26{,}57°\ \Omega$$

De forma análoga se calcula Z_{ST}

$$Z_{ST} = Z_S + Z_T + \frac{Z_S \cdot Z_T}{Z_R} = 10 + 10\,j + \frac{100\,j}{10} = 10+20\,j = 22{,}36\angle 63{,}43°\ \Omega$$

Las tensiones compuestas.

$$V_{RS} = 400\angle 30°\ V$$

$$V_{ST} = 400\angle -90°\ V$$

Las intensidades por rama del triángulo.

$$I_{RS} = \frac{V_{RS}}{Z_{RS}} = \frac{400\angle 30°}{22{,}36\angle -26{,}57°} = 17{,}89\angle 56{,}57°\ A$$

$$I_{ST} = \frac{V_{ST}}{Z_{ST}} = \frac{400\angle -90°}{22{,}36\angle 63{,}43°} = 17{,}89\angle -153{,}43°\ A$$

La intensidad de línea S del segundo receptor

$$I_{S2} = I_{ST} - I_{RS} = 17{,}89\angle -153{,}43° - 17{,}89\angle 56{,}57° = 34{,}56\ \angle -138{,}43°\ A$$

La intensidad total en la fase S:

$$I_S = I_{S1} + I_{S2} = 6{,}93\angle -120° + 34{,}56\angle -138{,}43° = 41{,}2\angle -135{,}38°\ A$$

Problema P.1-6.

a) Considerando la tensión V_R como origen de fases: V_R=230∠0° V; V_S=230∠-120° V y V_T=230∠120° V

La intensidad en la fase R del primer receptor: $Z_{f1} = 20+10\,j = 22{,}36\angle 26{,}57°\,\Omega$

$$I_{R1} = \sqrt{3}\, I_{f1} = \sqrt{3}\,\frac{400}{22{,}36} = 30{,}98\ A$$

$$I_{R1} = 30{,}98\angle -26{,}56°\ A$$

b) La intensidad en la fase R del segundo receptor: $Z_{R2} = 40+30\,j = 50\angle 36{,}87°\,\Omega$

$$I_{R2} = \frac{V_R}{Z_{R2}} = \frac{230\angle 0}{50\angle 36{,}87} = 4{,}6\angle -36{,}87°\ A$$

c) La intensidad total en la fase R:

$$I_R = I_{R1} + I_{R2} = 30{,}98\angle -26{,}56° + 4{,}6\angle -36{,}87° = 35{,}52\angle -27{,}89°\ A$$

Problema P.1-7.

Considerando la tensión V_R como origen de fases. V_R=230∠0° V , V_S=230∠-120° V, V_T=230∠120° V, V_{TR}=400∠150° V y V_{RT} es opuesta a V_{TR}; V_{RT}=400∠-30° V

La intensidad en la fase R del primer receptor:

$$I_{R1} = \frac{V_{RT}}{Z_1} = \frac{400\angle -30°}{100\angle 0°} = 4\angle -30°\ A$$

© Ediciones Paraninfo

La potencia absorbida por el motor a plena carga: $P_{ab} = \frac{P_u}{\eta} = \frac{7{,}5 \cdot 736}{0{,}88} = 6273\ \text{W}$

La intensidad en la fase R del motor:

$$I_{L2} = I_{R2} = \frac{P_{ab}}{\sqrt{3} V_L \cos\varphi_2} = \frac{6273}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0{,}866} = 10{,}45\ \text{A};\ \cos\varphi_2 = 0{,}866;\ \varphi_2 = 30°;$$

$$\boldsymbol{I}_{L2} = \boldsymbol{I}_{R2} = 10{,}45 \angle -30°\ \text{A}$$

La intensidad total en la fase R:

$$\boldsymbol{I}_R = \boldsymbol{I}_{R1} + \boldsymbol{I}_{R2} = 4 \angle -30° + 10{,}45 \angle -30° = 14{,}45 \angle -30°\ \text{A}$$

Problema P.1-8.

Considerando la tensión simple para la fase R como horizontal y origen de fase, las tensiones $\mathbf{V_R}$=230∠0° V y $\mathbf{V_{RS}}$=400∠30° V

La intensidad en el primer receptor: $\boldsymbol{I}_{R1} = \frac{\boldsymbol{V}_R}{\boldsymbol{Z}_1} = \frac{230 \angle 0°}{20 \angle 45°} = 11{,}5 \angle -45°\ \text{A}$

La intensidad en el segundo receptor: $\boldsymbol{I}_{R2} = \boldsymbol{I}_{RS} = \frac{\boldsymbol{V}_{RS}}{\boldsymbol{Z}_2} = \frac{400 \angle 30°}{100 \angle 30°} = 4 \angle 0°\ \text{A}$

La intensidad total en el conductor de la fase R:

$$\boldsymbol{I}_R = \boldsymbol{I}_{R1} + \boldsymbol{I}_{R2} = 11{,}5 \angle 45° + 4 \angle 0° = 14{,}6 \angle 33{,}83°\ \text{A}$$

Capítulo 2: CÁLCULO ELÉCTRICO DE LÍNEAS

Problema P.2-1.

a) La intensidad de consumo.

$$P = \sqrt{3} V_L I_L \cos\varphi;\quad I_L = \frac{P}{\sqrt{3} V_L \cos\varphi} = \frac{34\,000}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0{,}8} = 61{,}34\ \text{A}$$

b) Según el REBT, instrucción 19, (tabla 2.10 del libro) la sección necesaria es 25 mm^2, que admite para la canalización bajo tubo empotrada en paredes térmicamente aislantes 77 A, mayor que 61,34 A

Problema P.2-2.

La caída de tensión: $u = \frac{1 \cdot 400}{100} = 4\ \text{V}$

La sección de los conductores: $s = \frac{\sqrt{3}\, L\, I_L \cos\varphi}{c\, u} = \frac{\sqrt{3} \cdot 60 \cdot 45 \cdot 0{,}86}{56 \cdot 4} = 18\ \text{mm}^2$

La sección comercial más próxima por exceso es 25 mm^2, que según la instrucción ITC-BT-19 admite una intensidad de 77 A (tabla 2.10 del libro), mayor que 45 A.

Problema P.2-3.

La caída de tensión en la línea: $u = \frac{4 \cdot 400}{100} = 16\ \text{V}$

© Ediciones Paraninfo

La sección del conductor: $s = \dfrac{\Sigma(L\,P)}{c\,u\,V}$

La suma de momentos: ΣLP

$200 \cdot 10\,00 = 2\,000\,000$

$400 \cdot 10\,000 = 4\,000\,000$

$500 \cdot 10\,000 = 5\,000\,000$ m·W

$700 \cdot 5000 = 3\,500\,000$

$14\,500\,000$

La sección: $s = \dfrac{\Sigma(L\,P)}{c\,u\,V} = \dfrac{14\,500\,000}{35 \cdot 16 \cdot 400} = 64\ \text{mm}^2$

La intensidad que circula por el tramo más desfavorable AB, que soporta la potencia total.

$$I_L = \frac{P}{\sqrt{3}\,V_L \cos\varphi} = \frac{35\,000}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0{,}9} = 56\ \text{A}$$

La sección comercial inmediatamente superior es de 95 mm^2, que según el REBT instrucción ITC-BT-06, admite una intensidad, con cable expuesto al sol, de 185 A (tabla 2.2 del libro) mayor que 56 A, por lo que la sección de 95 mm^2 es válida.

Problema P.2-4.

La caída de tensión en el tramo AB

Considerando en el punto B toda la carga conectada a este punto fuera del tramo: 9+9+5=23 kW.

La caída de tensión: $u_{AB} = \dfrac{L\,P_B}{c\,s_1\,V_L} = \dfrac{40 \cdot 23\,000}{56 \cdot 25 \cdot 400} = 1{,}64\ \text{V}$

En tanto por cien: $u_{AB}\% = \dfrac{1{,}64 \cdot 100}{400} = 0{,}41\%$

La caída de tensión en el tramo BC: $u_{BC} = \dfrac{L\,P_C}{c\,s_2\,V_L} = \dfrac{20 \cdot 9\,000}{56 \cdot 10 \cdot 400} = 0{,}8\ \text{V}$

En tanto por cien: $u_{BC}\% = \dfrac{0{,}8 \cdot 100}{400} = 0{,}2\%$

La caída de tensión en el tramo BD: $u_{BD} = \dfrac{L\,P_D}{c\,s_3\,V_L} = \dfrac{30 \cdot 5\,000}{56 \cdot 6 \cdot 400} = 1{,}116\ \text{V}$

En tanto por cien: $u_{BD}\% = \dfrac{1{,}116 \cdot 100}{400} = 0{,}279\% \approx 0{,}28\%$

Problema P.2-5.

La suma de momentos:

$\Sigma(LP)$

© Ediciones Paraninfo

$$20 \cdot 10\,000 = 200\,000$$
$$60 \cdot 12\,000 = 720\,000$$
$$100 \cdot 10\,000 = 1\,000\,000 \quad \text{m} \cdot \text{W}$$
$$150 \cdot 5\,000 = \underline{750\,000}$$
$$2\,670\,000$$

La sección: $s = \dfrac{\Sigma(L\,P)}{c\,u\,V_L}$

La caída de tensión: $u = \dfrac{\Sigma(L\,P)}{c\,s\,V_L} = \dfrac{2\,670\,000}{56 \cdot 25 \cdot 400} = 4{,}77\ \text{V}$

En tanto por cien: $u\% = \dfrac{u \cdot 100}{V_L} = \dfrac{4{,}77 \cdot 100}{400} = 1{,}19\%$

Problema P.2-6.

La caída de tensión en el tramo AB: $u_1 = \dfrac{1 \cdot 400}{100} = 4\ \text{V}$

Considerando en el punto B toda la carga conectada a este punto fuera del tramo: 10+10+8=28 kW.

La sección: $s_1 = \dfrac{\Sigma(\text{L P})_1}{\text{c u}_1 \text{V}_\text{L}} = \dfrac{40 \cdot 8\,000 + 60 \cdot 28\,000}{56 \cdot 4 \cdot 400} = 22{,}32\ \text{mm}^2$

Según la instrucción ITC-BT-19 (norma UNE 20460-5-523: 2004) la sección normalizada inmediatamente superior es de 25 mm^2, que admite, a la temperatura ambiente de 40°C, la intensidad de 88 A (tabla 2.10 del libro).

La intensidad que circula por el tramo AB es la intensidad total

$$I_{L1} = \frac{P_1}{\sqrt{3} \cdot V_L \cdot \cos\varphi} = \frac{(8+10+10+8).10^3}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0{,}9} = 58\ \text{A}$$

Esta intensidad es menor que la permitida por el conductor de 25 mm^2, por lo que se elige para el tramo AB esta sección.

La caída de tensión en el tramo BC: $u_2 = \dfrac{1 \cdot 400}{100} = 4\ \text{V}$

La sección: $s_2 = \dfrac{\Sigma(L\,P)_2}{c\,u_2\,V_L} = \dfrac{40 \cdot 10\,000}{56 \cdot 4 \cdot 400} = 4{,}46\ \text{mm}^2$

Según el REBT instrucción ITC-BT-19, la sección normalizada inmediatamente superior es de 6 mm^2 que admite una intensidad de 37 A (tabla 2.10 del libro).

La intensidad que circula por el tramo BC es la intensidad total de la derivación.

$$I_{L2} = \frac{P_2}{\sqrt{3} \cdot V_L \cdot \cos\varphi} = \frac{10\,000}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0{,}9} = 16\ \text{A}$$

Esta intensidad es menor que la permitida por el conductor de 6 mm^2 por lo que se elige para el tramo BC esta sección.

La caída de tensión en el tramo BD: $u_3 = \dfrac{1{,}5 \cdot 400}{100} = 6\ \text{V}$

© Ediciones Paraninfo

La sección: $s_3 = \dfrac{\Sigma(L\,P)_3}{c\,u_3\,V_L} = \dfrac{40{\cdot}10\,000 + 70{\cdot}8\,000}{56{\cdot}6{\cdot}400} = 7{,}14\ \text{mm}^2$

Según el REBT instrucción ITC-BT-19, la sección normalizada inmediatamente superior es de 10 mm^2 que admite una intensidad de 52 A (tabla 2.10 del libro).

La intensidad total por el tramo BD. $I_{L3} = \dfrac{P_3}{\sqrt{3}\cdot V_L \cdot \cos\varphi} = \dfrac{(8+10).10^3}{\sqrt{3}{\cdot}400{\cdot}0{,}9} = 29\ \text{A}$

Esta intensidad es menor que la permitida por el conductor de 10 mm^2 por lo que se elige para el tramo BD esta sección.

Problema P.2-7.

La intensidad activa de línea que suministra cada punto de la red:
I_A=20·0,8=16 A; I_B=20·0,8=16 A; I_C=30·0,8=24 A;

$$I_E = \frac{6000}{\sqrt{3}\cdot 400\cdot 0{,}8}0{,}8 = 8{,}66\,\text{A}$$

Se calcula la carga que soporta cada extremo en función de la intensidad que consumen los receptores. La intensidad activa en el sentido AE:

$$I_{A'} = \frac{\Sigma(L\,I\cos\varphi)}{L} = \frac{20{\cdot}16 + 60{\cdot}16 + 80{\cdot}24 + 110{\cdot}8{,}66}{160} = 26\,\text{A}$$

La intensidad activa en el sentido AB:

$$I_A = \Sigma I \text{ - } I_{A'} = (16+16+24+8{,}66) - 26 = 38{,}66\,\text{A}$$

El punto de mínima tensión es D, que recibirá en el sentido AB una intensidad activa de 6,66 A y en el sentido AE una intensidad activa de 17,34 A.

Se calcula la sección de una de las líneas abiertas, considerando en ella toda la caída de tensión. Esta sección es la de toda la línea.

Considerando el tramo ABCD:

La caída de tensión en el tramo: $u = \dfrac{1{\cdot}400}{100} = 4\,\text{V}$

La sección: $s = \dfrac{\sqrt{3}\,\Sigma(L\,I_L\cos\varphi)}{c\,u} = \dfrac{\sqrt{3}\,(20{\cdot}16 + 60{\cdot}16 + 80{\cdot}6{,}66)}{35{\cdot}4} = 22{,}4\ \text{mm}^2$

Según la instrucción ITC-BT-07 la sección normalizada inmediatamente superior es de 25 mm^2, que admite una intensidad de 82 A (tabla 2.3 del libro).

La intensidad de línea en el tramo AB: $38{,}66 = I_{LA}\cos\varphi$; $I_{LA} = \dfrac{38{,}66}{0{,}8} = 47{,}5\,\text{A}$

Esta intensidad es menor que la permitida por el conductor de 25 mm^2 por lo que esta sección es válida.

Problema P.2-8.

La caída de tensión en la línea: $u = \dfrac{2\,\Sigma(L\,P)}{c\,s\,V} = \dfrac{2(20\cdot 10\,000 + 50\cdot 5000)}{56\cdot 16\cdot 220} = 4{,}56\,\text{V}$

En tanto por cien: $u\% = \dfrac{4{,}56{\cdot}100}{220} = 2{,}1\%$

© Ediciones Paraninfo

Problema P.2-9.

Para líneas de sección uniforme y varias cargas la caída de tensión se halla tomando momentos respecto al origen.

$$u = \sqrt{3}\,\Sigma(R\,L\,I_L \cos\varphi) + \sqrt{3}\,\Sigma(X\,L\,I_L\,sen\,\varphi)$$

Considerando constantes R, X y φ:

$$u = \sqrt{3}\,R\,\cos\varphi\;\Sigma(LI_L) + \sqrt{3}\,X\;sen\,\varphi\;\Sigma(LI_L)$$

$$u = \sqrt{3}\cdot 0,4\cdot 0,86\,(2\cdot 8+5\cdot 4) + \sqrt{3}\cdot 0,1\cdot 0,51\,(2\cdot 8+5\cdot 4) = 24,63\ \text{V}$$

La caída de tensión porcentual: $u\% = \dfrac{u\cdot 100}{V_L} = \dfrac{24,63\cdot 100}{20\,000} = 0,25\,\%$

Problema P.2-10.

La tangente del ángulo de desfase entre la tensión e intensidad de:

$$\cos\varphi = 0,9; \qquad \varphi = 25,84°; \qquad \text{tg}\,\varphi = 0,484$$

La potencia máxima de transporte:

$$P = \frac{10\,V_L^{\,2}}{(R + X\,tg\varphi)\,L}\,\text{u}\% = \frac{10\cdot 10^2\cdot 1}{(0,5 + 0,12\cdot 0,484)\,0,6} = 11945\ \text{kW}$$

Problema P.2-11.

La pérdida en tanto por ciento de la potencia de transporte: $P_p\% = \dfrac{R}{10V_L^{\,2}\cos^2\varphi}\,L\,P$

La longitud máxima: $L = \dfrac{P_p\%10V_L^2\cos^2\varphi}{RP} = \dfrac{1\cdot 10\cdot 10^2\cdot 0,8^2}{0,4\cdot 4000} = 1,6\,\text{km}$

Problema P.2-12.

La intensidad de cortocircuito: $I_{cc} = \dfrac{S_{cc}}{\sqrt{3}\,V_L} = \dfrac{450\,000\,000}{\sqrt{3}\cdot 20\,000} = 12990\ \text{A}$

La sección del conductor: $s = \dfrac{I_{cc}\sqrt{t}}{K} = \dfrac{12990\cdot\sqrt{0,2}}{143} = 40,6\,\text{mm}^2$

Capítulo 3: LÍNEAS AÉREAS

Problema P.3-1.

a) La separación media entre los conductores: $D = \sqrt[3]{D_{12}D_{23}D_{31}} = \sqrt[3]{2\cdot 2\cdot 4} = 2,52$ m

El coeficiente de autoinducción, siendo el diámetro aparente del cable 9,45 mm (tabla 3.1 del libro):

$$L_k = (0,53 + 4,6\,\log\frac{D}{r})\cdot 10^{-4} = (0,53 + 4,6\log\frac{2,52}{0,00945/2})\cdot 10^{-4} = 0,001307\ \text{H/km}$$

La reactancia de la línea por conductor en Ω/km:

$$X = 2\pi f L_k = 2\cdot 3,14\cdot 50\cdot 0,001307 = 0,4104\ \Omega/\text{km}$$

© Ediciones Paraninfo

b) La impedancia de la línea por conductor en Ω/km, siendo la resistencia eléctrica del cable 0,6129 Ω/km (tabla 3.1 del libro):

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{0,6129^2 + 0,4104^2} = 0,738 \ \Omega/\text{km}$$

La impedancia total: $Z_T = Z \cdot L = 0,738 \cdot 1,2 = 0,885\,\Omega$

La intensidad de línea: $I_L = \dfrac{S}{\sqrt{3} V_L} = \dfrac{630\,000}{\sqrt{3} \cdot 20\,000} = 18,19$ A

c) La caída de tensión:

$$u = \sqrt{3}\, I_L\, L\, (R \cos\varphi + X\, sen\, \varphi) = \sqrt{3} \cdot 18,19 \cdot 1,2 \cdot (0,6129 \cdot 0,8 + 0,493 \cdot 0,6) = 27,85 \text{ V}$$

En tanto por cien: $u\% = \dfrac{27,85 \cdot 100}{20\,000} = 0,14\%$

d) La potencia perdida: $P_p = \dfrac{R\, L\, P^2}{V_L^{\,2} \cos^2 \varphi} = \dfrac{0,6129 \cdot 1,2 \cdot (630 \cdot 0,8)^2}{20^2 \cdot 0,8^2} = 730$ W

e) La densidad de corriente en el conductor: $\delta = \dfrac{I_L}{s} = \dfrac{18,19}{54,6} = 0,33\,\text{A/mm}^2$

Problema P.3-2.

a) De la fórmula de la flecha se obtiene la tensión horizontal:

$$f = \frac{pa^2}{8T}; \qquad T = \frac{pa^2}{8f} = \frac{0,189 \cdot 80^2}{8 \cdot 1} = 151,2 \text{ daN}$$

b) Considerando la mitad de la parábola que forma el cable, el peso:

$$P = p\frac{a}{2} = 0,189 \cdot 40 = 7,56 \text{ daN}$$

La tensión en un extremo: $T_D = \sqrt{T^2 + P^2} = \sqrt{151,2^2 + 7,56^2} = 151,4$ daN

c) La longitud del conductor: $l = a + \dfrac{8f^2}{3a} = 80 + \dfrac{8 \cdot 1^2}{3 \cdot 80} = 80,03$ m

Problema P.3-3.

a) La sobrecarga debida a la presión del viento en sentido horizontal:

$$P_v = p_v \cdot d = 60 \cdot 0,00945 = 0,567 \text{ daN/m}$$

La carga del conductor con la sobrecarga debida al viento:

$$P_T = \sqrt{P_v^{\,2} + P^2} = \sqrt{0,567^2 + 0,1855^2} = 0,5966 \text{ daN/m}$$

b) La sobrecarga debida al hielo: $P_h = k\sqrt{d} = 0,18 \cdot \sqrt{9,45} = 0,553$ daN/m

La carga del conductor con la sobrecarga debida al hielo:

$$P_T = P_h + P = 0,1855 + 0,553 = 0,7385 \text{ daN/m}$$

c) Para el cálculo de la flecha se halla la tensión a 50°C a que está sometido el conductor por la ecuación del cambio de condiciones.

El vano de regulación:

$$a_r = \text{vano medio} + \frac{2}{3}(\text{vano máximo - vano medio}) = 70 + \frac{2}{3}(100 - 70) = 90 \text{ m}$$

© Ediciones Paraninfo

La ecuación del cambio de condiciones: $T_2^2(T_2+A)=B$

El valor del coeficiente A:

$$A=\frac{sEa^2p_1^2}{24T_1^2}-T_1-\alpha sE(\Theta_1-\Theta_2)$$

$$A=\frac{54,6\cdot7900\cdot90^2\cdot0,7385^2}{24\cdot415^2}-415-19,1\cdot10^{-6}\cdot54,6\cdot7900\cdot(-15-50)=581,5$$

El valor del coeficiente B: $B=\frac{sEa^2p_2^2}{24}=\frac{54,6\cdot7900\cdot90^2\cdot0,1855^2}{24}=500,9\cdot10^4$

La ecuación del cambio de condiciones toma la forma $T_2^2(T_2+581,5)=500,9\cdot10^4$

Esta ecuación se resuelve por tanteos, siendo la solución con suficiente aproximación T_2=86,6 daN.

d) La flecha con esta tensión en el vano de regulación: $f_2=\frac{p_2a^2}{8T}=\frac{0,1855\cdot90^2}{8\cdot86,6}=2,17$ m

La flecha con esta tensión en el vano máximo: $f_2=\frac{p_2a^2}{8T}=\frac{0,1855\cdot100^2}{8\cdot86,6}=2,68$ m

Problema P.3-4.

a) El eolovano: $a_e=\frac{1}{2}(a_1+a_2)=\frac{120+90}{2}=105$ m

La fuerza del viento sobre los conductores: $F_v=p_va_ed=60\cdot9,45\cdot10^{-3}\cdot105=59,54$ daN

La altura del apoyo sobre el terreno: $H=11-1,5=9,5$ m

La altura de los puntos de amarre de las cadenas de aisladores que soportan los conductores:

$$h_1=H+1,15=9,5+1,15=10,65 \text{ m}$$

$$h_2=H+1,55=9,5+1,55=11,05 \text{ m}$$

b) El esfuerzo en punta en sentido transversal:

$$F_T=\frac{F_v(2h_1+h_2)}{H}=\frac{59,54\cdot(2\cdot10,65+11,05)}{9,5}=202,75 \text{ daN}$$

c) El tense máximo: $T_{máx}=\frac{1640}{3,2}=513$ daN

e) El esfuerzo en punta en sentido longitudinal:

$$F_L=\frac{8}{100}\frac{T_{máx}(2h_1+h_2)}{H}=0,08\cdot\frac{513\cdot(2\cdot10,65+11,05)}{9,5}=140 \text{ daN}$$

Problema P.3-5.

El tense máximo: $T_{máx}=\frac{990}{3}=330$ daN

El esfuerzo debido a las tensiones de los conductores:

© Ediciones Paraninfo

$$F = 2T_{máx}\cos\frac{\alpha}{2} = 2{\cdot}330{\cdot}\cos\frac{110°}{2} = 378,6 \text{ daN}$$

El eolovano: $a_e = \frac{1}{2}(a_1 + a_2) = \frac{100+70}{2} = 85$ m

El esfuerzo debido a la acción del viento sobre los conductores:

$$F_v = p_v a_e d\, sen\frac{\alpha}{2} = 60{\cdot}85{\cdot}7,14{\cdot}10^{-3}{\cdot}\,\text{sen}\,55° = 29,83 \text{ daN}$$

La altura del apoyo sobre el terreno: $H = 12 - 2,2 = 9,8$ m

La altura de los puntos de amarre de las cadenas de aisladores que soportan los conductores:

$$h = H + 1 = 10,8 \text{ m}$$

El esfuerzo en punta en sentido transversal:

$$F_T = \frac{(2\,T_{máx}\cos\frac{\alpha}{2} + p_v a_e d\, sen\frac{\alpha}{2})\,3h}{H} = \frac{(378,6+29,83){\cdot}3{\cdot}10,8}{9,8} = 1350 \text{ daN}$$

Problema P.3-6.

El tense máximo: $T_{máx} = \frac{1640}{3} = 546,67$ daN

El esfuerzo en punta en sentido longitudinal:

$$F_L = \frac{50}{100}\frac{T_{máx}\,3h}{H} = 0,5{\cdot}\frac{546,67{\cdot}3{\cdot}H}{H} = 820 \text{ daN}$$

Problema P.3-7.

Se calcula cada tramo de forma independiente, teniendo en cuenta la carga que soporta.

La caída de tensión se puede calcular también directamente en tanto por cien, con la longitud en km y la potencia en kW, según la fórmula, deducida en el epígrafe 2.9:

$$u\% = \frac{10^8}{c\,V_L{}^2}\cdot\frac{LP}{s} = \frac{10^8}{35{\cdot}400^2}\cdot\frac{LP}{s} = 17,9{\cdot}\frac{LP}{s}$$

Para el tramo AB, con toda la potencia de la instalación:

P=20,7+13,8+20,7+6,9=62,1 kW

La caída de tensión parcial en el tramo: $u_{AB}\% = 17,9{\cdot}\frac{LP}{s} = 17,9{\cdot}\frac{62,1{\cdot}0,1}{95} = 1,17\%$

Para el tramo BF

La caída de tensión parcial en el tramo: $u_{BF}\% = 17,9{\cdot}\frac{LP}{s} = 17,9\frac{13,8{\cdot}0,3}{25} = 2,96\%$

Para el tramo BE

La caída de tensión parcial en el tramo: $u_{BE}\% = 17,9{\cdot}\frac{LP}{s} = 17,9{\cdot}\frac{20,7{\cdot}0,2}{25} = 2,96\%$

Para el tramo BC

La caída de tensión parcial en el tramo:

© Ediciones Paraninfo

$$u_{BC}\% = 17,9 \cdot \frac{LP}{s} = 17,9 \cdot \frac{(20,7+6,9)\cdot 0,3}{50} = 2,96\%$$

Para el tramo CD

La caída de tensión parcial en el tramo: $u_{CD}\% = 17,9 \cdot \frac{LP}{s} = 17,9 \frac{6,9 \cdot 0,2}{25} = 0,99\%$

La caída de tensión más desfavorable es del origen A al punto D:

$$u_{AD} = u_{AB} + u_{BC} + u_{CD} = 5,12\%$$

Problema P.3-8.

La sobrecarga por hielo: $P_h = k\sqrt{d}$ (daN/m)

d: Diámetro del haz de conductores (mm).

k: Constante, de valor 0,06 en zona B, (altitud desde 500 a 1000 m).

$$P_h = k\sqrt{d} = 0,06\sqrt{2,5 \cdot 12,3} = 0,3327 \text{ daN/m}$$

El peso con sobrecarga de hielo $P_T = P_h + P = 0,3327 + 0,810 = 1,14$ daN/m

Problema P.3-9.

La fuerza resultante: $F = 2T_{máx} \cos\frac{\alpha}{2} = 2 \cdot 400 \cdot \cos 60° = 400$ daN

Problema P.3-10.

a) La altura del poste sobre el terreno: $H = 13 - 1,8 = 11,2$ m

El momento de vuelco: $M_v = F(H + \frac{2}{3}h_e) = 6,3 \cdot (11,2 + \frac{2}{3} \cdot 1,8) = 78,1$ m·kN

b) El momento estabilizador del terreno y bloque de hormigón:

$$M_0 = 1,39K_T l h_e^4 + 8,8 l^3 h_e = 1,39 \cdot 12 \cdot 1 \cdot 1,8^4 + 8,8 \cdot 1^3 \cdot 1,8 = 190,9 \text{ m·kN}$$

El momento estabilizador de las cargas verticales: $M_b = 0,4 p_c l = 0,4 \cdot 1 \cdot 23 = 9,2$ m·kN

El momento estabilizador total: $M_e = M_0 + M_b = 190,9 + 9,2 = 200$ m·kN

c) El coeficiente de seguridad al vuelco: $\frac{M_0 + M_b}{M_v} = \frac{200}{78,1} = 2,56 > 1,5$

Capítulo 4: LÍNEAS SUBTERRÁNEAS

Problema P.4-1.

a) La intensidad de cortocircuito:

$$I_{cc} = \frac{S_{cc}}{\sqrt{3}\ V_L} = \frac{400 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 20 \cdot 10^3} = 11547 \text{ A} = 11,547 \text{ kA}$$

La sección necesaria para soportar el cortocircuito:

$$s = \frac{I_{cc}\sqrt{t}}{K} = \frac{11547 \cdot \sqrt{0,2}}{94} = 55 \text{ mm}^2$$

La sección del conductor es de 150 mm^2, mayor que 55 mm^2

© Ediciones Paraninfo

d) La intensidad de línea: $I_L = \dfrac{S}{\sqrt{3}V_L} = \dfrac{1000 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 20 \cdot 10^3} = 28,87\ \text{A}$

La caída de tensión de línea:

$$u = \sqrt{3}\, I_{L1}\, L\, (R \cos \varphi + X \operatorname{sen} \varphi) = \sqrt{3} \cdot 28,87 \cdot 1,5\, (0,21 \cdot 0,9 + 0,11 \cdot 0,436) = 17,77\ \text{V}$$

Problema P.4-2.

a) La intensidad de cortocircuito: $I_{cc} = \dfrac{S_{cc}}{\sqrt{3}\ V_L} = \dfrac{450 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 20 \cdot 10^3} = 12\ 990\ \text{A} = 12,99\ \text{kA}$

La sección necesaria para soportar el cortocircuito:

$$s = \frac{I_{cc}\ \sqrt{t}}{K} = \frac{12\,990 \cdot \sqrt{0,2}}{94} = 61,8\ \text{mm}^2$$

b) Intensidad de línea a plena carga en el primario: $I_{L1} = \dfrac{S_n}{\sqrt{3}\ V_L} = \dfrac{630 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 20 \cdot 10^3} = 18,18\ \text{A}$

La caída de tensión de línea:

$$u = \sqrt{3}\ I_{L1}\, L\, (R \cos \varphi + X \operatorname{sen} \varphi) = \sqrt{3} \cdot 18,18 \cdot 0,4\, (0,56 \cdot 0,8 + 0,13 \cdot 0,6) = 6,63\ \text{V}$$

Problema P.4-3.

La caída de tensión en la línea: $u = \dfrac{2 \cdot 400}{100} = 8\ \text{V}$

La sección necesaria: $s = \dfrac{L\,P}{c\,u\,V_L} = \dfrac{75 \cdot 44\,000}{35 \cdot 8 \cdot 400} = 29,46\ \text{mm}^2$

La sección comercial más próxima por exceso es de 35 mm^2, que según el REBT, instrucción 19, (norma UNE 20460-5-523: 2004) admite para la canalización indicada 90 A (tabla 2.8 del libro).

La intensidad absorbida por el receptor:

$$P = \sqrt{3}\, V_L\, I_L \cos \varphi; \quad I_L = \frac{P}{\sqrt{3}\, V_L \cos \varphi} = \frac{44\,000}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0,8} = 79,4\ \text{A}$$

Esta intensidad es menor que la admisible por el conductor, por lo que la sección de 35 mm^2 es válida

Problema P.4-4.

Se calcula la carga que soporta cada extremo en función de la potencia que consumen los receptores.

$$P_{A'} = \frac{\Sigma(L\,P)}{L} = \frac{100 \cdot 18\,000 + 150 \cdot 32\,000 + 200 \cdot 20\,000 + 300 \cdot 20\,000}{340} = 48824\ \text{W} = 48,824\ \text{kW}$$

$$P_A = \Sigma P - P_{A'} = 90 - 48,824 = 41,176\ \text{kW}$$

El punto de mínima tensión es C, que recibirá en el sentido de A a C una potencia de 23.176 kW y en el sentido de A' a C una potencia de 8,824 kW.

© Ediciones Paraninfo

Considerando uno de los tramos abiertos en que queda dividida la línea teniendo en cuenta en ella toda la caída de tensión. Si se escoge el tramo ABC.

La sección: $s = \dfrac{\Sigma(L\,P)}{c\,u\,V_L} = \dfrac{100 \cdot 18000 + 150 \cdot 23{,}176}{35 \cdot 8 \cdot 400} = 47{,}11\,\text{mm}^2$

La sección comercial más próxima por exceso es de 50 mm^2, que según el REBT, instrucción 07, admite para la canalización indicada 115 A (tabla 2.3 del libro).

La intensidad que circula por el tramo más cargado, que es el A´B.

$$I_L = \frac{P_A}{\sqrt{3}\,V_L \cos\varphi} = \frac{48\,824}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0{,}9} = 78{,}3\,\text{A}$$

Esta intensidad es menor que la admisible por el conductor, por lo que la sección de 50 mm^2 es válida.

Problema P.4-5.

La caída de tensión en el tramo AB

Considerando en el punto B toda la carga conectada a este punto fuera del tramo 40+30+15=85 kW.

La caída de tensión: $u_{AB} = \dfrac{L\,P_B}{c\,s_1\,V_L} = \dfrac{80 \cdot 85\,000}{35 \cdot 95 \cdot 400} = 5{,}11\,\text{V}$

En tanto por cien: $u_{AB}\% = \dfrac{5{,}11 \cdot 100}{400} = 1{,}28\%$

La caída de tensión en el tramo BC: $u_{BC} = \dfrac{L\,P_C}{c\,s_2\,V_L} = \dfrac{100 \cdot 30\,000}{35 \cdot 50 \cdot 400} = 4{,}29\,\text{V}$

En tanto por cien: $u_{BC}\% = \dfrac{4{,}29 \cdot 100}{400} = 1{,}07\%$

La caída de tensión en el tramo BD: $u_{BD} = \dfrac{L\,P_D}{c\,s_3\,V_L} = \dfrac{80 \cdot 15\,000}{35 \cdot 25 \cdot 400} = 3{,}43\,\text{V}$

En tanto por cien: $u_{BD}\% = \dfrac{3{,}43 \cdot 100}{400} = 0{,}86\%$

Capítulo 5: APARAMENTA Y PROTECCIÓN

Problema P.5-1.

a) La intensidad admisible según ITC-BT-19 (tabla 2.10 del libro) es 44 A.

b) La intensidad de corriente por la línea:

$$I_L = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot V_L \cdot \cos\varphi} = \frac{10\ 000}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0{,}86} = 16{,}78\ \text{A}$$

El calibre del magnetotérmico debe estar comprendido entre 16,78 y 44 A. Se escoge entre los calibres 20, 25, 32 y 40 A

© Ediciones Paraninfo

Problema P.5-2.

a) La intensidad máxima permitida en el conductor según la norma UNE 211435:2007 (tabla 2.3 del libro) es 175 A.

b) La intensidad que circula por la línea: $I_L = \dfrac{P}{\sqrt{3}\cdot V_L \cdot \cos\varphi} = \dfrac{60\,000}{\sqrt{3}\cdot 400\cdot 0,86} = 96,2 \text{ A}$

c) La regulación del relé térmico debe estar comprendida entre 96,2 A y 175 A. Es válida la regulación a $0,7I_n = 0,7\cdot 160 = 112$ A.

Problema P.5-3.

a) La intensidad de cortocircuito: $I_{cc1} = \dfrac{S_{cc}}{\sqrt{3}\ V_L} = \dfrac{420\cdot 10^6}{\sqrt{3}\cdot 20\,000} = 12124 \text{ A}$

b) La reactancia de la línea de distribución: $X_1 = \dfrac{V_L^{\,2}}{S_{cc}} = \dfrac{20\,000^2}{420\cdot 10^6} = 0,952\ \Omega$

Según la norma UNE EN 60909, la impedancia de la línea se incrementa un 10%, porque considera que la tensión de la línea no se mantiene en el cortocircuito; entonces, despreciando la resistencia.

$$X_1 = 1,1\frac{V_L^{\,2}}{S_{cc}} = 1,1\cdot 0,952 = 1,047\ \Omega$$

En el libro se considera la tensión constante para escoger la reactancia más desfavorable para el cortocircuito, el valor más pequeño, 0,952 Ω

c) La resistencia de la línea de acometida en M.T. $R_2 = 0,3\cdot 0,05 = 0,015\ \Omega$

La reactancia: $X_2 = 0,1\cdot 0,2 = 0,005\ \Omega$

La resistencia total de cortocircuito: $R_{cc} = R_2 = 0,015\ \Omega$

La reactancia total de cortocircuito: $X_{cc} = X_1 + X_2 = 0,957\ \Omega$

La intensidad de cortocircuito: $I_{cc} = \dfrac{\dfrac{20\,000}{\sqrt{3}}}{\sqrt{R_{cc}^{\,2} + X_{cc}^{\,2}}} = \dfrac{20\,000}{\sqrt{3}\cdot\sqrt{0,015^2 + 0,957^2}} = 12\,064 \text{ A}$

Problema P.5-4.

a) La intensidad de cortocircuito en bornes del secundario:

$$I_{cc1} = \frac{\dfrac{V_L}{\sqrt{3}}}{Z_{cc1}} = \frac{\dfrac{400}{\sqrt{3}}}{\sqrt{R_{cc}^{\,2} + X_{cc}^{\,2}}} = \frac{\dfrac{400}{\sqrt{3}}}{\sqrt{0,003^2 + 0,007^2}} = 30324 \text{ A}$$

b) La resistencia total de cortocircuito: $R_{cc} = R_1 + R_2 = 0,022\ \Omega$

La reactancia total de cortocircuito: $X_{cc} = X_1 + X_2 = 0,011\ \Omega$

La intensidad de cortocircuito: $I_{cc2} = \dfrac{\dfrac{400}{\sqrt{3}}}{\sqrt{R_{cc2}^{\,2} + X_{cc2}^{\,2}}} = \dfrac{230}{\sqrt{0,022^2 + 0,011^2}} = 9389 \text{ A}$

© Ediciones Paraninfo

Problema P.5-5.

a)La intensidad de cortocircuito: $I_{cc1} = \dfrac{230}{\sqrt{R_{cc2}{}^2 + X_{cc2}{}^2}} = \dfrac{230}{\sqrt{0,04^2 + 0,02^2}} = 5143 \text{ A}$

b) La resistencia total de cortocircuito $R_{cc} = R_1 + R_2 = 0,091\ \Omega$

La reactancia total de cortocircuito: $X_{cc} = X_1 = 0,02\ \Omega$

La intensidad de cortocircuito: $I_{cc2} = \dfrac{230}{\sqrt{R_{cc2}{}^2 + X_{cc2}{}^2}} = \dfrac{230}{\sqrt{0,091^2 + 0,02^2}} = 2469 \text{ A}$

Según la Guía Técnica de Aplicación del REBT, si solamente se conoce la resistencia de las líneas hasta el punto de alimentación, se puede calcular la intensidad de cortocircuito considerando el 80% de la tensión en el cortocircuito.

$$I_{cc} = \frac{0,8\ V_f}{R_L}$$

En este caso: $I_{cc2} = \dfrac{0,8 \cdot 230}{0,091} = 2\ 022 \text{ A}$

c) Según la ITC-BT-19 (tabla 2.10 del libro) la intensidad admisible es de 95 A

d) La intensidad que circula: $I_L = \dfrac{P}{\sqrt{3} \cdot V_L \cdot \cos\varphi} = \dfrac{24\,000}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0,9} = 43,3 \text{ A}$

e) El interruptor debe cumplir las condiciones:

Para protección de sobrecargas $43,3 \leq I_n < 95$ A

El poder de corte del interruptor PdC>5143 A.

Se puede escoger un interruptor de intensidad nominal entre 50 y 80 A y poder de corte mayor o igual a 6 kA.

Problema P.5-6.

La resistencia de tierra: $R = \dfrac{2\rho_t}{L} = \dfrac{2 \cdot 60}{8} = 15\ \Omega$

Problema P.5-7.

a) La intensidad de corriente por la línea: $I_L = \dfrac{P}{\sqrt{3} \cdot V_L \cdot \cos\varphi} = \dfrac{22\,000}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0,8} = 39,7 \text{ A}$

b) La intensidad nominal del diferencial debe ser superior a la que circula, como 63 A.

c) La sensibilidad del diferencial debe ser inferior a la intensidad de defecto a tierra en local seco:

$$I_T = \frac{V}{R_T} = \frac{50}{110} = 0,4545 \text{ A}$$

Se puede escoger un interruptor diferencial de sensibilidad 300 mA.

© Ediciones Paraninfo

Capítulo 6: CENTROS DE TRANSFORMACIÓN

Problema P.6-1.

a) La intensidad nominal en el primario. $I_{1n} = \dfrac{S_n}{\sqrt{3}\,V_{L1}} = \dfrac{630\,000}{\sqrt{3}\cdot 20\,000} = 18{,}19\ \text{A}$

b) La intensidad de cortocircuito en el primario:

$$I_{cc1} = \frac{S_{cc}}{\sqrt{3}\cdot V_{L1}} = \frac{300\cdot 10^6}{\sqrt{3}\cdot 20\cdot 10^3} = 8\,660\ \text{A} = 8{,}66\ \text{kA}$$

c) La intensidad de choque: $I_{s1} = 2{,}55\cdot I_{cc1} = 2{,}55\cdot 8{,}66 = 22\ \text{kA}$

d) La intensidad de cortocircuito en el secundario, considerando solamente la impedancia interna del transformador se puede calcular a partir de la intensidad nominal del secundario..

$$I_{cc2} = \frac{I_{2n}}{u_{cc}};\quad I_{2n} = \frac{S_n}{\sqrt{3}\,V_{L2}} = \frac{630\,000}{\sqrt{3}\cdot 400} = 909{,}3\ \text{A};\quad I_{cc2} = \frac{909{,}3}{0{,}04} = 22\,733\ \text{A}$$

f) Fuerza sobre la pletina: $F = 2{,}04\cdot I^2_s\cdot 10^{-8}\dfrac{L_b}{D_b} = 2{,}04\cdot 10^{-8}\cdot 22\,000^2\cdot\dfrac{1{,}2}{0{,}25} = 47{,}4\ \text{daN}$

g) El momento flector, considerando las barras apoyadas en los dos extremos:

$$M_f = \frac{F\cdot L_b}{8} = \frac{47{,}4\cdot 120}{8} = 711\ \text{daN}\cdot\text{cm}$$

El momento resistente o módulo de flexión de la pletina:

$$M_r = \frac{bh^2}{6} = \frac{4\cdot 1^2}{6} = 0{,}667\ \text{cm}^3$$

El coeficiente de trabajo: $\sigma = \dfrac{M_f}{M_r} = \dfrac{711}{0{,}667} = 1\,066\ \text{daN/cm}^2$

Problema P.6-2.

a) La intensidad de cortocircuito en el primario:

$$I_{cc1} = \frac{S_{cc}}{\sqrt{3}\cdot V_{L1}} = \frac{450\cdot 10^6}{\sqrt{3}\cdot 20\cdot 10^3} = 12990\ \text{A} = 13\ \text{kA}$$

b) La impedancia de cortocircuito del transformador referida al secundario:

$$Z_{cc} = \frac{V_{L2}^2}{S_n}\frac{u_{cc}}{100} = \frac{400^2}{1\,600\cdot 10^3}\frac{6}{100} = 0{,}006\ \Omega$$

La caída de tensión en la resistencia interna del transformador:

$$u_R = \frac{P_{Cu}}{S_n}100 = \frac{17}{1\,600}100 = 0{,}0106\%$$

La resistencia del transformador referida al secundario:

$$R_{cc} = \frac{V_{L2}^2}{S_n}\frac{u_R}{100} = \frac{400^2}{1\,600\cdot 10^3}\frac{0{,}0106}{100} = 0{,}00106\ \Omega$$

La reactancia del transformador referida al secundario:

$$X_{cc} = \sqrt{Z_{cc}^2 - R_{cc}^2} = \sqrt{0{,}006^2 - 0{,}00106^2} = 0{,}0056\ \Omega$$

c) La impedancia de la línea de alimentación en M.T. referida al secundario:

© Ediciones Paraninfo

$$Z_{ccL} = X_{ccL} = \frac{V_{L2}^{\ 2}}{S_{cc}} = \frac{400^2}{450 \cdot 10^6} = 0,000356\ \Omega$$

Según la norma UNE EN 60909, la impedancia de la línea se incrementa un 10%, porque considera que la tensión de la línea no se mantiene en el cortocircuito; entonces, despreciando la resistencia.

$$X_{ccL} = 1,1\frac{V_L^{\ 2}}{S_{cc}} = 1,1 \cdot 0,000356 = 0,0003916\ \Omega$$

En el libro se considera la tensión constante para escoger la reactancia más desfavorable para el cortocircuito, el valor más pequeño, en este caso 0,000356 Ω

La intensidad de cortocircuito en bornes del secundario, teniendo en cuenta la reactancia anterior:

$$I_{cc2} = \frac{\frac{400}{\sqrt{3}}}{\sqrt{0,00106^2 + (0,0059 + 0,000356)^2}} = 36\,396\ \text{A}$$

Problema P.6-3.

a) El eolovano: $a_e = \frac{1}{2}(a) = \frac{74}{2} = 37$ m

La fuerza del viento sobre los tres conductores de diámetro 0,00945 m:

$$F_v = 3 \cdot p_v \cdot a_e \cdot d = 3 \cdot 60 \cdot 37 \cdot 9,45 \cdot 10^{-3} = 62,94\ \text{daN}$$

La fuerza del viento sobre el transformador, considerando una presión del viento de 100kp/m^2 a una velocidad del mismo de 120 km/h (ITC-LAT-07):

$$F_{tra} = S_{tra} \cdot 100 = 1,1 \cdot 100 = 110\ \text{daN}$$

La altura del apoyo sobre el terreno: $H = 11 - 2 = 9$ m

La fuerza en la punta del apoyo que produce el mismo momento que la debida al viento sobre el transformador:

$$F_{t'ra} = \frac{110 \cdot 7}{9} = 85,55\ \text{daN}$$

El esfuerzo transversal total en la punta del apoyo: $F_T = 85,55 + 62,94 = 148,49$ daN

b) El esfuerzo longitudinal en punta: $F_L = 3T_{máx} = 3 \cdot 556 = 1668$ daN

La fuerza resultante: $F_R = \sqrt{F_T^{\ 2} + F_L^{\ 2}} = \sqrt{148,5^2 + 1668^2} = 1674,6$ daN

Problema P.6-4.

a) El caudal de aire necesario: $Q = \frac{P_p}{1,16\,\Delta\theta_a} = \frac{7,7}{1,16 \cdot 12} = 0,553\ \text{m}^3/\text{s}$

b) La velocidad de salida del aire: $v_s = 4,6\frac{\sqrt{H}}{\Delta\theta_a} = 4,6\frac{\sqrt{1,8}}{12} = 0,514$ m/s

c) La sección neta mínima de la rejilla: $S_r = \frac{Q}{v_s} = \frac{0,553}{0,514} = 1,08\ \text{m}^2$

© Ediciones Paraninfo

Problema P.6-5.

a) La resistencia de puesta a tierra: $R_T = \rho \cdot K_r = 120 \cdot 0,077 = 9,24\ \Omega$

b) La capacidad: $C = 0,006\,L_a + 0,25\,L_b = 0,006 \cdot 110 + 0,25 \cdot 15 = 4,41\ \mu F$

La reactancia capacitiva de puesta a tierra: $X_c = \dfrac{1}{3C\omega} = \dfrac{1 \cdot 10^2}{3 \cdot 4,41 \cdot 2\pi \cdot 50} = 240,6\ \Omega$

La intensidad máxima de defecto a tierra:

$$I_d = \frac{V_L}{\sqrt{3}\sqrt{R_T^{\,2} + X_c^{\,2}}} = \frac{20 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{9,24^2 + 240,6^2}} = 48\ A$$

c) Tensión de paso máxima: $V_{p\,máx} = K_p \cdot \rho \cdot I_d = 0,0124 \cdot 120 \cdot 48 = 71,42\ V$

Tensión de contacto máxima: $V_{c\,máx} = K_c \cdot I_d \cdot \rho = 0,0347 \cdot 48 \cdot 120 = 200\ V$

d) La tensión de paso admisible se calcula según la instrucción MIE-RAT 13. Para el cálculo K=72 y n=1:

$$V_p = \frac{10K}{t^n}\left(1 + \frac{6\rho}{1000}\right) = \frac{10 \cdot 72}{0,4}\left(1 + \frac{6 \cdot 120}{1000}\right) = 3096\ V$$

La tensión de contacto admisible: $V_c = \dfrac{K}{t^n}\left(1 + \dfrac{1,5\rho}{1\,000}\right) = \dfrac{72}{0,4}\left(1 + \dfrac{1,5 \cdot 120}{1000}\right) = 212,4\ V$

e) Tensión de defecto: $V_d = R_T \cdot I_d = 9,24 \cdot 48 = 443,5\ V$

Problema P.6-6.

a) La resistencia de puesta a tierra: $R_T = \rho \cdot K_r = 250 \cdot 0,073 = 18,25\ \Omega$

b) Tensión de paso máxima: $V_{p\,máx} = K_p \cdot \rho \cdot I_d = 0,0087 \cdot 250 \cdot 300 = 652,5\ V$

c) Tensión de paso exterior admisible:

$$V_p = \frac{10K}{t^n}\left(1 + \frac{6\rho}{1000}\right) = \frac{10 \cdot 72}{0,8}\left(1 + \frac{6 \cdot 250}{1000}\right) = 2250\ V$$

d) Tensión de paso admisible en el acceso.

$$V_{p(acc)} = \frac{10K}{t^n}\left(1 + \frac{3\rho + 3\rho'}{1000}\right) = \frac{10 \cdot 72}{0,8}\left(1 + \frac{3 \cdot 250 + 3 \cdot 3\,000}{1000}\right) = 9675\ V$$

e) Tensión de defecto: $V_d = R_T \cdot I_d = 18,25 \cdot 300 = 5475\ V$

Problema P.6-7.

La resistencia de puesta a tierra: $R_T = \rho \cdot K_r = 200 \cdot 0,11 = 22\ \Omega$

Capítulo 7: TARIFACIÓN ELÉCTRICA

Problema P.7-1.

a) El coeficiente de facturación del contador de energía. activa.

$$C_F = \frac{m_I}{m_C} C_M = \frac{100/5}{200/5} 10 = 5$$

© Ediciones Paraninfo

a) El coeficiente de facturación del contador de energía reactiva.

$$C_F = \frac{m_I}{m_C} C_M = \frac{100/5}{100/5} 10 = 10$$

Problema P.7-2.

La potencia máxima: $P_{máx}$=35kW > 1,05·P_c=1,05·33=34,65 kW

La potencia de facturación: P_f=$P_{máx}$ + 2($P_{máx}$ - 1,05·P_c)=35+2(35-34,65)=35,7 kW

Problema P.7-3.

La potencia del maxímetro punta: $P_{máx}$=105 kW = 1,05·P_c=1,05·100=105 kW.

La potencia de facturación: P_{f1}=$P_{máx}$=105 kW

La potencia del maxímetro llano.

$P_{máx}$=148 kW; 0,85·P_c=0,85·150 <148<1,05·P_c=1,05·150.

La potencia de facturación: P_{f2}=148 kW

La potencia del maxímetro valle: $P_{máx}$=225kW > 1,05·P_c=1,05·200=210 kW

La potencia de facturación: P_{f3}=$P_{máx}$ + 2($P_{máx}$ - 1,05·P_c)=225+2(225-210)=255 kW

La potencia de facturación total: P_f=105+0,5(148-105)+0,2(255-148)=147,9 kW.

Problema P.7-4.

a) T_p=4,4·1,642355·1=7,23 euros.

b) T_e=65·0,135145+185·0,059614=8,78+11,03=19,81 euros.

c) La suma de los dos términos de la facturación T_p+T_e=27,04 euros.

El impuesto sobre la electricidad $\text{IE} = \frac{4,864}{100} \cdot 1,051130 \cdot 27,04 = 1,38$ euros

El impuesto sobre el valor añadido $\text{IVA} = \frac{16}{100} \cdot (27,04 + 1,38) = 4,55$ euros

Facturación total=T_p+T_e+IE+IVA=27,04+1,38+4,55 =32,97 euros.

Problema P.7-5.

a) La energía activa consumida W_a=3460+6984=10 444 kW

El factor de potencia medio.

$$\cos \varphi = \frac{W_a}{\sqrt{W_a^2 + W_r^2}} = \frac{10\,444}{\sqrt{10\,444^2 + 4\,750^2}} = 0,91$$

b) El valor porcentual de recargo por complemento por energía reactiva:

$$K_r\% = 0\%$$

Problema P.7-6.

a) T_p=31,18·1,77·1=55,19 euros.

b) T_e=875·0,143055+1147·0,115580+2120·0,078481

T_e =125,17+132,57+166,38=424,12 euros.

c) La suma de los dos términos de la facturación T_p+T_e=479,31 euros.

La energía activa total: W_a= 875+1147+2120=4142 kWh.

El factor de potencia medio

© Ediciones Paraninfo

$$\cos\varphi = \frac{W_a}{\sqrt{W_a^2 + W_r^2}} = \frac{4142}{\sqrt{4142^2 + 1975^2}} = 0{,}90$$

El valor porcentual de recargo por complemento por energía reactiva: $K_r\%=0\%$

d) El impuesto sobre la electricidad

$$IE = \frac{4{,}864}{100} \cdot 1{,}051130 \cdot 479{,}31 = 24{,}51 \text{ euros}$$

El impuesto sobre el valor añadido

$$IVA = \frac{16}{100} \cdot (479{,}31 + 24{,}51) = 80{,}61 \text{ euros}$$

Facturación total= 479,31+24,51+80,61=584,43 euros.

Problema P.7-7.

a) La potencia de facturación en el primer período es: P_{f1}= 0,85·90=76,5 kW.
La potencia de facturación en el segundo período es: P_{f2}=0,85·90=76,5 kW.
La potencia de facturación en el tercer período P_{f3}=0,85·120=102 kW.
Término de potencia

$$Tp = \frac{76{,}5 \cdot 15{,}090975 + 76{,}5 \cdot 9{,}306199 + 102 \cdot 2{,}134018}{12} = 173{,}67 \text{euros}$$

b) El término de energía: T_e=(4450+14546+10512)·0,10745=3170,63 euros.

c) La facturación por energía reactiva es aplicable al primero y segundo período.
Factor de potencia medio en el primer período

$$\cos\varphi_1 = \frac{W_a}{\sqrt{W_a^2 + W_r^2}} = \frac{4\,450}{\sqrt{4\,450^2 + 2\,490^2}} = 0{,}87$$

Factor de potencia medio en el segundo período .

$$\cos\varphi = \frac{W_a}{\sqrt{W_a^2 + W_r^2}} = \frac{14\,546}{\sqrt{14\,546^2 + 7\,974^2}} = 0{,}87$$

1La facturación de energía reactiva
(2490-0,33·4450)·0,013091+(7974-0,33·14546)·0,013091=13,37+41,55=54,92 euros.

d) El impuesto sobre la electricidad

$$IE = \frac{4{,}864}{100} \cdot 1{,}051130 \cdot (173{,}67 + 3170{,}63 + 54{,}92) = 173{,}79 \text{ euros}$$

El impuesto sobre el valor añadido

$$IVA = \frac{16}{100} \cdot (173{,}67 + 3170{,}63 + 54{,}92 + 173{,}79) = 0{,}16 \cdot 3573{,}01 = 571{,}68 \text{ euros}$$

Facturación total= 3573,01+571,68=4144,69 euros.

Problema P.7-8.

a) El factor de potencia: $\cos\varphi = \frac{P}{\sqrt{3} V_L I_L} = \frac{9654}{380 \cdot 16{,}3} = 0{,}807$

a) La potencia reactiva de capacidad:

© Ediciones Paraninfo

$$Q_C = P(\text{tg } \varphi_1 - \text{tg } \varphi_2)$$

$$\cos \varphi_1 = 0{,}807;\ \varphi_1 = 36{,}2°;\ \text{tg } \varphi_1 = 0{,}732$$

$$\cos \varphi_2 = 0{,}96;\ \varphi_2 = 16{,}26°;\ \text{tg } \varphi_2 = 0{,}292$$

$$Q_C = 8{,}654 \cdot (0{,}732 - 0{,}292) = 3{,}808 \text{ kVAr}$$

c) Partiendo de la potencia reactiva de capacidad, la capacidad de cada rama de la batería de condensadores:

$$Q_C = 3 X_C I_C^2;\ I_C = \frac{V}{X_C};\ Q_C = 3 \frac{V^2}{X_C} = 3 \cdot 2\pi f C V^2;\ C = \frac{Q_C}{3 \cdot 2\pi f V^2}$$

$$C = \frac{3\,808}{3 \cdot 2\pi \cdot 50 \cdot 380^2} = 2{,}8 \cdot 10^{-5} \text{ F} = 28\ \mu\text{F}$$

Problema P.7-9.

a) La potencia media: $\frac{32\,395}{352} = 92$ kW

b) Factor de potencia medio: $\cos \varphi = \frac{W_a}{\sqrt{W_a^2 + W_r^2}} = \frac{32\,395}{\sqrt{32\,395^2 + 34\,982^2}} = 0{,}679$

c) La potencia reactiva de capacidad:

$$Q_C = P(\text{tg } \varphi_1 - \text{tg } \varphi_2)$$

$$\cos \varphi_1 = 0{,}679;\ \varphi_1 = 42{,}23°;\ \text{tg } \varphi_1 = 1{,}081$$

$$\cos \varphi_2 = 0{,}97;\ \varphi_2 = 14{,}07°;\ \text{tg } \varphi_2 = 0{,}251$$

$$Q_C = 92 \cdot (1{,}081 - 0{,}251) = 76{,}4 \text{ kVAr}$$

Problema P.7-10.

a) La potencia absorbida por el motor: $P_{ab} = \frac{P_u}{\eta} = \frac{22\,000}{0{,}9} = 24\,440$ W

b) La potencia reactiva de capacidad:

$$Q_C = P(\text{tg } \varphi_1 - \text{tg } \varphi_2)$$

$$\cos \varphi_1 = 0{,}87;\ \varphi_1 = 29{,}54°;\ \text{tg } \varphi_1 = 0{,}567$$

$$\cos \varphi_2 = 0{,}96;\ \varphi_2 = 16{,}26°;\ \text{tg } \varphi_2 = 0{,}292$$

$$Q_C = 24{,}444 \cdot (0{,}567 - 0{,}292) = 6{,}721 \text{ kVAr}$$

c) Partiendo de la potencia reactiva de capacidad, la capacidad de cada rama en triángulo de la batería de condensadores:

$$Q_C = 3 X_C I_C^2;\ I_C = \frac{V}{X_C};\ Q_C = 3 \frac{V^2}{X_C} = 3 \cdot 2\pi f C V^2;\ C = \frac{Q_C}{3 \cdot 2\pi f V^2}$$

$$C = \frac{6\,721}{3 \cdot 2\pi \cdot 50 \cdot 380^2} = 49{,}385 \cdot 10^{-5} \text{ F} = 49{,}385\ \mu\text{F}$$

d) La intensidad de línea a plena carga antes de conectar la batería:

© Ediciones Paraninfo

$$I_{L1} = \frac{P_{ab}}{\sqrt{3}\ V_L \cos \varphi_1} = \frac{24\,444}{\sqrt{3}\cdot 380\cdot 0{,}87} = 42{,}688 \text{ A}$$

e) La intensidad de línea a plena carga después de conectar la batería:

$$I_{L1} = \frac{P_{ab}}{\sqrt{3}\ V_L \cos \varphi_1} = \frac{24\,444}{\sqrt{3}\cdot 380\cdot 0{,}96} = 38{,}686 \text{ A}$$

Problema P.7-11.

a) La potencia activa: P=162·56=9072 W.

b) La potencia reactiva de capacidad:

$$Q_C = P(\text{tg } \varphi_1 - \text{tg } \varphi_2)$$

$$\cos \varphi_1 = 0{,}42;\ \varphi_1 = 65{,}17°;\ \text{tg } \varphi_1 = 2{,}161$$

$$\cos \varphi_2 = 0{,}98;\ \varphi_2 = 11{,}48°;\ \text{tg } \varphi_2 = 0{,}203$$

$$Q_C = 9{,}072\cdot(2{,}161 - 0{,}203) = 17{,}762 \text{ kVAr}$$

Problema P.7-12.

La potencia activa que consumen los cuatro motores a plena carga:

$$P_{ab1} = \frac{P_{u1}}{\eta_1} = \frac{4\cdot 11}{0{,}87} = 50{,}57 \text{ kW}$$

La potencia activa que consumen los ocho motores a plena carga:

$$P_{ab2} = \frac{P_{u2}}{\eta_2} = \frac{8\cdot 3}{0{,}8} = 30 \text{ kW}$$

La potencia activa total: P=50,57+30=80,57 kW

La potencia reactiva que consumen los cuatro motores a plena carga:

$$Q_1 = P_{ab1} \text{tg } \varphi_1 = 50{,}57\cdot 0{,}646 = 32{,}66 \text{ kVAr}$$

La potencia reactiva que consumen los ocho motores a plena carga:

$$Q_2 = P_{ab1} \text{tg } \varphi_2 = 30\cdot 0{,}698 = 20{,}94 \text{ kVAr}$$

La potencia reactiva total: Q=32,66+20,94=53,6 kVAr.

b) El factor de potencia del conjunto de la instalación:

$$\cos \varphi = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} = \frac{80{,}57}{\sqrt{80{,}57^2 + 53{,}6^2}} = 0{,}83259$$

c) La potencia reactiva de capacidad:

$$Q_C = P(\text{tg } \varphi_1 - \text{tg } \varphi_2)$$

$$\cos \varphi_1 = 0{,}83259;\ \varphi_1 = 33{,}63°;\ \text{tg } \varphi_1 = 0{,}665$$

$$\cos \varphi_2 = 0{,}98;\ \varphi_2 = 11{,}48°;\ \text{tg } \varphi_2 = 0{,}203$$

$$Q_C = 80{,}57\cdot(0{,}665 - 0{,}203) = 37{,}22 \text{ kVAr}$$

© Ediciones Paraninfo

Capítulo 8: INSTALACIONES DE ENLACE E INTERIORES

Problema P.8-1.

a) La carga total del conjunto de viviendas se calcula según el REBT, instrucción 10, (ITC-BT-10).

Por la superficie de las viviendas se establece el grado de electrificación, que en este caso corresponde a electrificación básica, con una potencia por vivienda de 5 750 W.

Para obtener la potencia correspondiente al conjunto de viviendas se utilizan factores de simultaneidad. En este caso, para 12 viviendas el coeficiente es 9,9 según la instrucción ITC-BT-10, (tabla 8.5 del libro).

La potencia media de las viviendas: $P_{vm} = \dfrac{12 \cdot 5\,750}{12} = 5\,750 \text{ W}$

La potencia del conjunto de viviendas: $P_v = 5\,750 \cdot 9,9 = 56\,925 \text{ W}$

La carga correspondiente a locales comerciales, según el REBT, instrucción 10 es de 100 W/m^2 con un mínimo de 3450 W.

$$P_c = 100 \cdot 80 = 8\,000 \text{ W}$$

La potencia a instalar en el garaje es P_g=4 000 W

La potencia de alumbrado en los locales para servicios comunes es P_c=3 000 W

La potencia a considerar en el motor del ascensor, según el REBT, instrucción, 47, para un solo motor, será la calculada a partir de la intensidad nominal aumentada el 125%; pero en la misma instrucción, se indica que para aparatos elevadores, a efectos de cálculo de intensidad de arranque, se considerará la de régimen multiplicada por 1,3.

Aplicando el coeficiente 1,3: $P_m = \sqrt{3} \cdot 400 \cdot 1,3 \cdot 11,3 \cdot 0,83 = 8\,447 \text{ W}$

La previsión de cargas del edificio será la suma de todas las potencias:

$$P = P_v + P_c + P_g + P_s + P_m = 80\,372 \text{ W}$$

b) La caída de tensión máxima en la línea general de alimentación, según el REBT, instrucción 014, es de 0,5% para contadores totalmente concentrados.

$$u = \frac{0,5 \cdot 400}{100} = 2 \text{ V}$$

La sección de la línea general: $s = \dfrac{L\,P}{c\,u\,V_L} = \dfrac{20 \cdot 80\,372}{56 \cdot 2 \cdot 400} = 35,88 \text{ mm}^2$

La sección comercial más próxima por exceso es 50 mm^2, que según la ITC-BT-19, norma UNE 20460-5-523: 2004, (tabla 2.10 del libro) admite para la canalización indicada 145 A.

En el caso de considerar para la línea general las más extremas condiciones de servicio (90°C), la conductividad del cobre será 56/1,28=43,75 m/Ωmm^2, y la sección 35,88·1,28=45,93 mm^2, que corresponde a la sección comercial de 50 mm^2.

La intensidad total del edificio, considerando un factor de potencia global de 0,9:

$$I_L = \frac{P}{\sqrt{3}\,V_L \cos\varphi} = \frac{80\,372}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0,9} = 128,89 \text{ A}$$

Esta intensidad es menor que la permitida por el conductor de 50 mm^2, por lo que la línea general de alimentación tendrá tres conductores de sección 50 mm^2 para fases y un conductor de sección mínima 25 mm^2 para neutro (3x50+1x25). La sección del neutro, salvo justificación

© Ediciones Paraninfo

por cálculo debe ser igual a la del conductor de fase. El tubo tendrá, como mínimo, de diámetro exterior 140 mm según la instrucción ITC-BT-14 (tabla 8.1 del libro).

c) La caída de tensión: $u = \frac{1 \cdot 230}{100} = 2,3\ \text{V}$

La sección de la derivación individual al garaje: $s = \frac{2\,L\,P}{c\,u\,V_L} = \frac{2 \cdot 30 \cdot 4\,000}{56 \cdot 2,3 \cdot 230} = 8,1\ \text{mm}^2$

La sección comercial más próxima por exceso es de 10 mm^2, que según el REBT, instrucción 19, (tabla 2.10 del libro), admite una intensidad de 50 A. En el caso de considerar para la línea las más extremas condiciones de servicio (70°C, para aislamiento termoplástico), la conductividad del cobre será 56/1,2=46,67 $\text{m}/\Omega\text{mm}^2$, y la sección 8,1·1,2=9,72 mm^2, que corresponde a la sección comercial de 10 mm^2.

La intensidad que circula por la derivación con un factor de potencia unidad.

$$I = \frac{P}{V \cos \varphi} = \frac{4\,000}{230 \cdot 1} = 17\ \text{A}$$

Esta intensidad es menor que la admitida en ese conductor, por lo que la sección es válida. La derivación será con fase y neutro de sección 10 mm^2, y un conductor de protección, con sección 10 mm^2

d) La caída de tensión máxima en las derivaciones individuales a las viviendas, para contadores totalmente concentrados, será de. 1% (ITC-BT-15).

$$u = \frac{1 \cdot 230}{100} = 2,3\ \text{V}$$

La sección de la derivación individual a una vivienda, con potencia de 5 750 W.

$$s = \frac{2\,L\,P}{c\,u\,V_L} = \frac{2 \cdot 15 \cdot 5\,750}{56 \cdot 2,3 \cdot 230} = 5,82\ \text{mm}^2$$

La sección comercial más próxima por exceso es de 6 mm^2, que según el REBT, instrucción 19, (tabla 2.10 del libro), admite una intensidad de 36 A.

La intensidad que circula por la derivación con un factor de potencia unidad.

$$I = \frac{P}{V \cos \varphi} = \frac{5\,750}{230 \cdot 1} = 25\ \text{A}$$

Esta intensidad es menor que la admitida en ese conductor, por lo que la sección es válida. La derivación será con fase y neutro de sección 6 mm^2, y un conductor de protección, con sección 6 mm^2, además del conductor de mando de 1,5 mm^2, y tubo de diámetro exterior mínimo 32 mm (ITC-BT-15).

La sección del conductor de protección se escoge en función de la sección de los conductores de fase, según la instrucción ITC-BT-19 (tabla 8.10 del libro).

En el caso de considerar para la línea las más extremas condiciones de servicio (70°C, para aislamiento termoplástico), la conductividad del cobre será 56/1,2=46,67 $\text{m}/\Omega\text{mm}^2$, y la sección 5,8·1,2=6,96 mm^2, que corresponde a la sección comercial de 10 mm^2.

Problema P.8-2.

A) La previsión de cargas de alumbrado se calcula, según la instrucción 44 del REBT, teniendo en cuenta el coeficiente 1,8 para lámparas de descarga.

Potencia total de alumbrado: P_a=6·2·58·1,8+20·36·1,8=2 548,8 W.

© Ediciones Paraninfo

La previsión de cargas para fuerza, según la instrucción 47 del REBT se calcula para la instalación de varios motores, teniendo en cuenta que la carga nominal del mayor debe incrementarse en un 125%.

$$P_m = \sqrt{3}\cdot 400\cdot 5\cdot 1,25\cdot 0,82 + \sqrt{3}\cdot 400\cdot 3,6\cdot 0,81 = 5\,571\,\text{W}$$

La previsión de carga del local: $P = P_a + P_m = 2\,548,8 + 5\,571 = 8\,119,8\,\text{W}$

b) La caída de tensión en la derivación individual al local: $u = \dfrac{1\cdot 400}{100} = 4\,\text{V}$

La sección de los conductores: $s = \dfrac{LP}{cuV_L} = \dfrac{10\cdot 8\,119,8}{56\cdot 4\cdot 400} = 0,91\,\text{mm}^2$

La sección mínima permitida en una derivación individual (ITC-BT-15) es de 6 mm^2, que según el REBT, instrucción 19, (tabla 2.10 del libro) admite la intensidad de 32 A.

La intensidad que circula por el conductor, considerando como factor de potencia global de la instalación el más pequeño (0,81) para calcular el caso más desfavorable.

$$I = \frac{P}{\sqrt{3}\,V_L \cos\varphi} = \frac{8\,119,8}{\sqrt{3}\cdot 4\,000,81} = 14,47\,\text{A}$$

Esta intensidad es menor a la admitida en la sección de 10 mm^2, por lo que la derivación estará formada por tres conductores de sección 6 mm^2 para fases y otro conductor de sección 6 mm^2 para neutro, además del conductor de protección (4x6+T.T.).

Problema P.8-3.

a) La previsión de cargas de alumbrado se calcula, según la instrucción 44 del REBT, teniendo en cuenta el coeficiente 1,8 para lámparas de descarga.

$$P_a = 8\cdot 125\cdot 1,8 + 6\cdot 58\cdot 1,8 = 1\,800 + 626,4 = 2\,426,4\,\text{W}$$

La previsión de cargas para fuerza, según la instrucción 47 del REBT se calcula para la instalación de varios motores, teniendo en cuenta que la carga nominal del mayor debe incrementarse en un 125%.

$$P_m = \sqrt{3}\cdot 400\cdot 12\cdot 1,25\cdot 0,83 + 2\cdot\sqrt{3}\cdot 400\cdot 5\cdot 0,82 = 14\,306,73\,\text{W}$$

La potencia de fuerza, será la potencia de los motores más la de las tomas de corriente:

$$P_f = 106,73 + 300 = 1\,06,73\,\text{W}$$

La potencia total: $P = P_f + P_a = 19\,733,13\,\text{W}$

b) La caída de tensión en la línea de alimentación: $u = \dfrac{0,5\cdot 400}{100} = 2\,\text{V}$

La sección de los conductores: $s = \dfrac{LP}{cuV_L} = \dfrac{30\cdot 19\,733,13}{56\cdot 2\cdot 400} = 13,21\,\text{mm}^2$

La sección comercial más próxima por exceso es de 16 mm^2, que según el REBT instrucción 19, norma UNE 20460-5-523: 2004, (tabla 2.10 del libro), admite 73 A.

En el caso de considerar para la línea general las más extremas condiciones de servicio (90°C, para aislamiento termoestable), la conductividad del cobre será 56/1,28=43,75 m/Ωmm^2, y la sección 13,2·1,28=16,9 mm^2, que corresponde a la sección comercial de 25 mm^2.

La intensidad que circula por el conductor, considerando como factor de potencia global de la instalación el más pequeño (0,82) para el caso más desfavorable.

© Ediciones Paraninfo

$$I = \frac{P}{\sqrt{3}\,V_L \cos\varphi} = \frac{19\,733{,}13}{\sqrt{3}\cdot 400\cdot 0{,}82} = 34{,}73\ \text{A} \approx 35\ \text{A}$$

Esta intensidad es menor que la admitida, por lo que la línea de alimentación estará formada por tres conductores de fase con sección 16 mm^2 y el conductor neutro con sección mínima 10 mm^2 (3x16+1x10 o 4x16).

La intensidad que circula es mucho menor que la máxima admisible, por lo que nunca se alcanzará en funcionamiento permanente la temperatura de 90°C. La tabla 2.10 de intensidades admisibles (extracto de la tabla A.52-1 bis, de la norma UNE 20460) está calculada para una temperatura ambiente de 40°C y para una temperatura máxima de servicio de 90°C con aislamiento termoestable y 70°C con termoplástico. Según la Guía Técnica de Aplicación del REBT, la temperatura que puede alcanzar el conductor, según la intensidad que circula es:

$$T = T_o + (T_{máx} - T_o)(I / I_{máx})^2 = 40 + (90 - 40)\cdot(35/73)^2 = 51{,}45°\text{C} \approx 52°\text{C}$$

La resistencia del conductor a 52°C, con un coeficiente de elevación de resistencia con la temperatura para el cobre de a=0,004:

$$R_{50} = R_{20}(1 + 0{,}004(52 - 20) = 1{,}128\cdot R_{20} \approx 1{,}13\cdot R_{20}$$

La resistividad del conductor quedará dividida por 1,13 (56/1,13=49,56) y la sección quedará multiplicada por 1,13 (13,21·1,13=14,9 mm^2), que corresponde a una sección comercial de 16 mm^2.

c) En la derivación al cuadro de motores la caída de tensión: $u = \frac{1\cdot 400}{100} = 4\ \text{V}$

La sección de los conductores: $s = \frac{L\,P}{c\,u\,V_L} = \frac{30\cdot 14\,306{,}73}{56\cdot 6\cdot 400} = 4{,}79\ \text{mm}^2$

La sección comercial más próxima por exceso es de 10 mm^2, que según el REBT, instrucción 19, (tabla 2.10 del libro) admite 44 A.

En el caso de considerar para la línea las más extremas condiciones de servicio (70°C, para aislamiento termoplástico), la conductividad del cobre será 56/1,2=46,67 m/Ωmm^2, y la sección 4,79·1,2=5,75 mm^2, que corresponde a la sección comercial de 6 mm^2.

La intensidad que circula por el conductor, considerando como factor de potencia global de los motores el más pequeño (0,82) para el caso más desfavorable.

$$I = \frac{P}{\sqrt{3}\,V_L \cos\varphi} = \frac{14\,306{,}73}{\sqrt{3}\cdot 400\cdot 0{,}82} = 25{,}18\ \text{A}$$

Esta intensidad es menor que la admitida para la sección de 6 mm^2, por lo que se escoge esta sección mínima. La derivación estará formada por cuatro conductores, de sección 6 m^2 para las tres fases y el neutro, además del conductor de protección (4x6+T.T.). Si no se justifica la ausencia de desequilibrios de carga en la derivación, la sección del neutro será igual a la de fase (ITC-BT-19).

e) La derivación al cuadro de alumbrado general se hace trifásica con neutro con objeto de repartir la carga de alumbrado entre las tres fases.

La caída de tensión en la derivación al cuadro de alumbrado: $u = \frac{1\cdot 400}{100} = 4\ \text{V}$

La sección de la derivación: $s = \frac{L\,P}{c\,u\,V_L} = \frac{25\cdot 1\,800}{56\cdot 4\cdot 400} = 0{,}5\ \text{mm}^2$

© Ediciones Paraninfo

La sección comercial más próxima por exceso es de 1,5 mm^2, que según la instrucción ITC-BT-19, norma UNE 20460, admite una intensidad de 13,5 A (tabla 2.10 del libro).

La intensidad que circula por la derivación con un factor de potencia unidad:

$$I = \frac{P}{\sqrt{3}\, V_L \cos\varphi} = \frac{1800}{\sqrt{3}\cdot 400\cdot 1} = 2{,}6\ \text{A}$$

Esta intensidad sería si la carga fuese equilibrada. Realmente al ser 8 lámparas, una fase estaría más cargada con 3 lámparas, con una potencia de 125·3·1,8=675 W; y con una intensidad a factor de potencia unidad:

$$I = \frac{P}{V \cos\varphi} = \frac{675}{230\cdot 1} = 2{,}93\ \text{A}$$

Esta intensidad es menor que la admitida en ese conductor, por lo que la sección mínima es válida. La derivación será tres fases y neutro de sección mínima 1,5 mm^2, y un conductor de protección o de toma de tierra (4x1,5+T.T.).

Problema P.8-4.

a) La intensidad nominal en el primario: $I_{1n} = \frac{S_n}{\sqrt{3}\, V_{L1}} = \frac{50\,000}{\sqrt{3}\cdot 20\,000} = 1{,}44\ \text{A}$

La intensidad nominal en el secundario: $I_{1n} = \frac{S_n}{\sqrt{3}\, V_{L1}} = \frac{50\,000}{\sqrt{3}\cdot 400} = 72{,}17\ \text{A}$

b) La intensidad de cortocircuito en el primario.

$$I_{cc1} = \frac{S_{cc}}{\sqrt{3}\cdot V_{L1}} = \frac{350\cdot 10^6}{\sqrt{3}\cdot 20\cdot 10^3} = 10103{,}6\ \text{A} = 10{,}1\ \text{kA}$$

c) La intensidad de cortocircuito en el secundario, considerando solamente la impedancia interna del transformador se puede calcular a partir de la intensidad nominal del secundario.

$$I_{cc2} = \frac{72{,}2}{0{,}04} = 1805\ \text{A} = 1{,}8\ \text{kA}$$

d) La caída de tensión:

$$u = \sqrt{3}\ I_L\ L\ (R\cos\varphi + X \operatorname{sen}\varphi) = \sqrt{3}\cdot 1{,}44\cdot 0{,}4\cdot(1{,}075\cdot 0{,}8 + 0{,}418\cdot 0{,}6) = 1{,}11\ \text{V}$$

Problema P.8-5.

La resistencia de tierra del conductor en anillo: $R_c = \frac{2\rho_t}{L_c} = \frac{2\cdot 500}{45} = 22{,}22\ \Omega$

La resistencia de las picas:

$$\frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_c} + \frac{1}{R_{Tp}}; \quad R_{Tp} = \frac{1}{\frac{1}{R_T} - \frac{1}{R_c}} = \frac{1}{\frac{1}{10} - \frac{1}{22{,}22}} = 18{,}18\ \Omega 1$$

El número de picas: $n = \frac{R_p}{R_{Tp}} = \frac{\frac{500}{2}}{18{,}18} = 13{,}55 \simeq 14$ picas

© Ediciones Paraninfo

Capítulo 9: ILUMINACIÓN

Problema P.9-1.

El flujo luminoso: $\Phi = ES = 50 \cdot 300 = 10\,000$ lm

Problema P.9-2.

La intensidad de iluminación: $E = \frac{I}{h^2}\cos^3\alpha$; $\quad I = \frac{E h^2}{\cos^3\alpha}$

$$\cos\alpha = \frac{h}{d} = \frac{8}{\sqrt{9^2+8^2}} = 0,6644;\ I = \frac{20 \cdot 8^2}{0,6644^3} = 4365 \text{ cd}$$

Problema P.9-3.

a) En la vertical de la luminaria: $E = \frac{I}{h^2} = \frac{100 \cdot 20}{10^2} = 20$ lx

b) En un punto situado a 12 m de la vertical de la luminaria: $E = \frac{I}{h^2}\cos^3\alpha$

$$\cos\alpha = \frac{h}{d} = \frac{10}{\sqrt{10^2+12^2}} = 0,6402;\ E = \frac{I}{h^2}\cos^3\alpha = \frac{2000}{10^2}0,6402^3 = 5,25 \text{ lx}$$

Problema P.9-4.

Se multiplica la iluminación por los miles de lúmenes de la lámpara y se divide por el cuadrado de la altura en metros.

$$E = \frac{20}{12^2} \cdot \frac{45\,000}{1\,000} = 6,25 \text{ lx}$$

Problema P.9-5.

a) La superficie del local: S=18·9=162 m^2.

El flujo luminoso total: $\Phi_t = 8 \cdot 2 \cdot 3\,000 = 48\,000$ lm

b) El flujo luminoso útil: $\Phi_u = \Phi_t \cdot \eta = 48\,000 \cdot 0,5 = 24\,000$ lm

c) La iluminación media: $E = \frac{\Phi_u}{S} = \frac{24\,000}{18 \cdot 9} = 148$ lx

Problema P.9-6.

a) La altura de las luminarias sobre el plano de trabajo: h=5-0,8=4,2 m

El índice del local: $K = \frac{a \cdot b}{h \cdot (a+b)} = \frac{40 \cdot 20}{4,2 \cdot (40+20)} = 3,17$

b) El rendimiento del local η_R=1,05; utilizando la tabla 9.10.del libro.

c) El flujo luminoso total: $\Phi_t = 23\,000 \cdot n$

El flujo luminoso útil: $\Phi_u = \Phi_t\, \eta_R \eta_L f_c$

La iluminación o iluminancia del local:

© Ediciones Paraninfo

$$E = \frac{\Phi_u}{S} = \frac{23000 \cdot n \cdot 1,05 \cdot 0,8 \cdot 0,8}{40 \cdot 20} = 300;\ n = 16,8$$

Problema P.9-7.

El flujo útil de cada foco: $\Phi_u = \Phi_t\ \eta = \Phi_L \cdot 0,4$

La iluminación: $E = \frac{\Phi_u}{S} = \frac{\Phi_L \cdot 0,4}{10 \cdot 34} = 20;\ \Phi_L = 17000$ lm

Problema P.9-8.

El flujo útil de cada foco: $\Phi_u = \Phi_t\ \eta\ f_c = 23500 \cdot 0,43 \cdot 0,75 = 7578,75$ lm

La superficie iluminada por cada foco:

$$S = \frac{17}{2} D = \frac{\Phi_u}{E};\ \frac{17}{2} D = \frac{7578,75}{30} = 252.625 \text{ m}^2$$

La distancia entre focos: $D = \frac{252,625}{8,5} = 29,7$ m

Problema P.9-9.

a) La potencia a considerar en cada luminaria (ITC-BT-09), es: 250·1,8=450 W

La caída de tensión en la línea: $u = \frac{2,5 \cdot 230}{100} = 5,75$ V

Conectando las lámparas sucesivamente a las tres fases, la fase más cargada es la R. Para el cálculo de la sección, se considera como una línea monofásica sin tener en cuenta el neutro.

$$s = \frac{\Sigma(L\,P)}{c\,u\,V} = \frac{100 \cdot 450 + 205 \cdot 450 + 310 \cdot 450 + 415 \cdot 450 + 520 \cdot 450 + 625 \cdot 450}{56 \cdot 5,75 \cdot 230} = 13,21 \text{ mm}^2$$

La sección más próxima por exceso es de 16 mm^2, que admite bajo tubo según norma UNE 20460 (tabla 2.8 del libro) una intensidad de 75 A.

La intensidad que circula por el tramo más desfavorable con un factor de potencia unidad.

$$I = \frac{P}{V \cos\varphi} = \frac{450 \cdot 6}{230 \cdot 1} = 11,73 \text{ A}$$

Mucho menor que la intensidad permitida por el conductor, por lo que es válida la sección de 16 mm^2

b) Considerando el circuito de la fase S como monofásico, con el neutro de igual sección que la fase:

$$s = \frac{2\Sigma(L\,P)}{c\,u\,V} = 2 \cdot 13,21 = 26,42 \text{ mm}^2$$

La sección a utilizar para fases y neutro es de 35 mm^2

Problema P.9-10.

La iluminación media: $E = \frac{\Phi_u}{S} = \frac{\Phi_t \eta f_c}{S} = \frac{2 \cdot 24000 \cdot 0,65 \cdot 0,75}{320} = 73,125$ lx

© Ediciones Paraninfo

BIBLIOGRAFÍA

AENOR, *Manual de cables para baja tensión*, AENOR, Madrid 1993.

ARIZMENDI, L. J., *Cálculo y normativa básica de las instalaciones en los edificios*, tomo III, Eunsa, Barañain (Navarra), 2004.

BACIGALUPE. F., *Líneas aéreas de media y baja tensión. Cálculo mecánico*, Paraninfo, Madrid, 1999.

BENSON, F. A., *Problemas de circuitos eléctricos con soluciones*, Paraninfo, Madrid, 1972.

BOIX O., RULL, J., *Instal-lacions Eléctriques*, Ediciones UPC, Barcelona, 1996.

CARMONA F., D., *Manual de instalaciones eléctricas*, @becedario, Badajoz, 2004.

CHECA, L. M., *Líneas de Transporte de Energía*, Marcombo, Barcelona,1973.

CONTE, G., *Impianti elettrici*, Hoepli, Milán, 1992.

CORTÉS, M., *Proyecto de Centros de Transformación en Edificios y Fábricas*, Groupe Schneider, Barcelona, 1996.

EVDOQUIMOV, F. E., *Electricidad básica*, Gustavo Gili, Barcelona, 1975.

FOUILLÉ, A., *Problemas resueltos de Electrotecnia*, Montesó, Barcelona, 1972.

FRAILE M., J., *Introducción a las instalaciones eléctricas*, Servicio de Publicaciones de Colegio de Ingenieros de Caminos, Madrid, 1993.

GUERRERO, A., *Instalaciones eléctricas en las edificaciones*, McGraw Hill, Madrid, 1995.

GRUPO DE FORMACIÓN DE EMPRESAS ELÉCTRICAS, *Equipos de Medida para Baja Tensión*, Paraninfo, Madrid, 1995.

GUTHMAN ,O. Y OTROS, *Manual de las instalaciones de distribución de energía eléctrica*, Urmo-Brown Boveri, Bilbao, 1983.

HERING, P., *Canalizaciones, Material de Alta y Baja Tensión y Centrales*, Editorial Labor, Barcelona, 1968.

IDAE, *Cuadernos de Eficiencia Energética en Iluminación*, IDAE-CEI, Madrid, 1996.

LAGUNAS, A., *Nuevo Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión. Teoría y cuestiones resueltas*, Paraninfo, Madrid, 2002

LLORENTE, M., *Cables Eléctricos Aislados*, Paraninfo, Madrid, 1994.

LLORENTE, M., *Comentarios al nuevo reglamento electrotécnico de baja tensión*, Profepro, Madrid, 2002.

NAVARRO, J. Y OTROS, *Instalaciones Eléctricas de Alta Tensión. Sistemas de maniobra, medida y protección*, Paraninfo, Madrid, 1998

© Ediciones Paraninfo

MCT, *Guía técnica de aplicación del REBT*, Paraninfo, Madrid, 2005.

MCT, *Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión*, Paraninfo, Madrid, 2002.

MIE, *Reglamento sobre Centrales Eléctricas, Subestaciones y Centros de Transformación*, Centro de publicaciones del MIE, Madrid, 1990.

MIE, *Reglamento de Líneas Eléctricas de Alta Tensión*, Paraninfo, Madrid, 2008.

MINISTERIO DE LA VIVIENDA, *Instalaciones de Electricidad. NTE-IE*, Paraninfo, Madrid, 1996.

MORENO MOHINO, J. Y OTROS, *Reglamento de Líneas de Alta Tensión y sus fundamentos técnicos*, Paranifo, Madrid, 2008.

MORENO, J., *Cálculo de Líneas Aéreas de Alta Tensión*, Moreno Clemente, Málaga, 1997.

RAS, E., *Transformadores de potencia, de medida y de protección*, Marcombo, Barcelona, 1975.

RE, V., *Iluminación externa*, Marcombo, Barcelona, 1979.

RE, V., *Iluminación interna*, Marcombo, Barcelona, 1979.

RIERA, M. Y OTROS, *Tecnología eléctrica*, Servicio de Publicaciones UPV, Valencia, 1996.

SIEMENS, *Manual de Baja Tensión*, Marcombo, Barcelona, 2000.

TABOADA, J. A., *Manual OSRAM*, OSRAM, Madrid, 1975.

TOLEDANO, J.C., ORTIZ, J.M., *Tarifas eléctricas*, MacGraw Hill, Madrid, 1993.

TOLEDANO, J.C., MARTÍNEZ, J.J., *Puesta a tierra en edificios y en instalaciones eléctricas*, Paraninfo, Madrid, 1977.

TORRES, J.L., *Choques Eléctricos en Baja Tensión. Riesgos y Proteciónes*, AENOR, Madrid, 1999.

UNESA, *Método de Cálculo y Proyecto de Instalaciones de Puesta a Tierra para Centros de Transformación Conectados a Redes de Tercera Categoría*, UNESA, Madrid, 1989.

ZOPPETTI, G., *Redes eléctricas*, Gustavo Gili, Barcelona, 1972.

© Ediciones Paraninfo

INSTALACIONES ELÉCTRICAS EN MEDIA Y BAJA TENSIÓN

Este libro está dirigido a los estudiantes de electricidad, tanto en ciclos formativos como en la iniciación de ingeniería de las instalaciones eléctricas.

El objetivo del libro es facilitar la comprensión de las Instalaciones Electrotécnicas: líneas aéreas y subterráneas de media y baja tensión, centros de transformación, instalaciones de enlace e interiores, tarificación de energía e iluminación; y también la aplicación de estos contenidos de forma razonada.

Cada capítulo está constituido por:

- Teoría
- Problemas de aplicación (unos totalmente resueltos y otros propuestos al alumno con las soluciones indicadas).
- Problemas de recapitulación con sus resultados.

Completan el libro cuatro apéndices: corriente alterna, transformadores, proyecto técnico, símbolos eléctricos y soluciones a problemas de recapitulación.

El contenido de esta edición se ha adaptado a:

- Alta tensión: Reglamento sobre condiciones técnicas y garantías de seguridad en líneas eléctricas de alta tensión y sus instrucciones técnicas complementarias. (Real Decreto 223/2008).
- Instalaciones interiores: norma UNE 20460-5-523:2004, sobre intensidades admisibles.
- Líneas de distribución: norma UNE 211435:2007, sobre intensidades admisibles.
- Tarifación eléctrica: tarifas eléctricas actuales (Orden ITC/3801/2008).

Sus contenidos serán también de utilidad para el profesional en diseño y ejecución de instalaciones eléctricas.

Con el fin de completar el libro, se plantea mediante el acceso a la página Web de la editorial **www.paraninfo.es**, una colección de pruebas objetivas sobre cada capítulo, que ponen de manifiesto los aspectos más relevantes de la materia. Estos 350 test, con una respuesta correcta entre cuatro presentadas (con corrección automática del sistema), están escogidos siguiendo el orden de las cuestiones planteadas en cada capítulo. Las respuestas incorrectas presentan errores muy significativos o errores típicos que cometen los alumnos.

ISBN 10: 84-283-3190-1
ISBN 13: 978-84-283-3190-6
9 788428 331906

Paraninfo
www.paraninfo.es