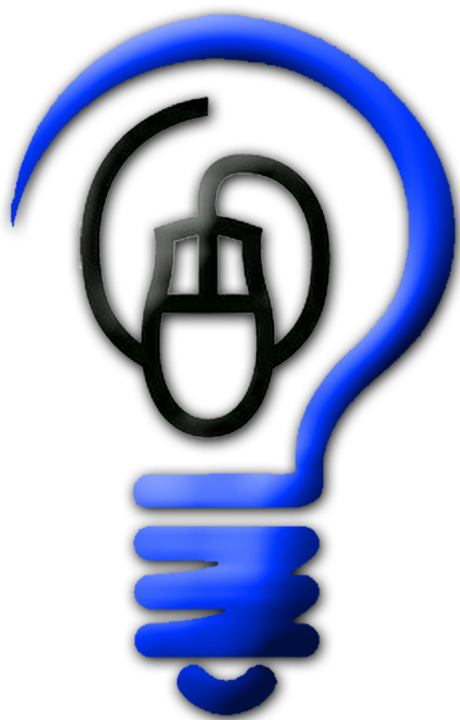


APRENDE TÚ SOLO ELECTRICIDAD



WWW.AUTODIDACTA.INFO

Índice

| | |
|---|----|
| Introducción | 15 |
| Seguridad y trabajo práctico | 17 |
| 1. Corriente eléctrica | 21 |
| 1.1. Corriente significa flujo | 21 |
| 1.2. ¿Un flujo de qué? Carga eléctrica | 21 |
| 1.3. ¿Qué cantidad fluye? Culombios por segundo | 22 |
| 1.4. ¿Qué es un amperio?..... | 23 |
| 1.5. Magnitud de las corrientes eléctricas | 23 |
| 1.6. Velocidad a la que se mueven los electrones | 24 |
| 1.7. Dirección del flujo de electrones y la corriente eléctrica . | 24 |
| 1.8. Amperímetros..... | 25 |
| 1.9. Corriente continua y corriente alterna | 25 |
| 1.10. Resumen | 27 |
| 2. Circuitos sencillos | 28 |
| 2.1. Circulación de corriente en un circuito cerrado..... | 28 |
| 2.2. Dirección del flujo | 29 |
| 2.3. Magnitud de la corriente que circula por un circuito . | 29 |
| 2.4. Corrientes y uniones en los circuitos. Ley de Kirchhoff . | 31 |
| 2.5. Conexión en serie | 32 |
| 2.6. Conexión en paralelo..... | 33 |
| 2.7. Trabajo práctico con circuitos sencillos..... | 34 |
| 2.8. Conexiones en serie y en paralelo mezcladas | 35 |
| 2.9. Diagramas de circuitos y símbolos | 36 |

8 Índice

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 2.10. | La corriente en conexiones en serie y en paralelo | 37 |
| 2.11. | Resumen | 38 |
| 3. | Voltaje | 39 |
| 3.1. | «Fuerza» eléctrica | 39 |
| 3.2. | «Nivel» eléctrico | 39 |
| 3.3. | Fuerza electromotriz, diferencia de potencial y voltaje .. | 40 |
| 3.4. | Voltios: +, - | 41 |
| 3.5. | Potencial cero | 42 |
| 3.6. | Puesta a tierra | 42 |
| 3.7. | Magnitud de los voltajes eléctricos | 43 |
| 3.8. | Voltímetro | 43 |
| 3.9. | Voltaje o diferencia de potencial en disposiciones en serie y en paralelo | 44 |
| 3.10. | Resumen | 45 |
| 4. | La ley de Ohm y la resistencia | 46 |
| 4.1. | Idea de lo que es una ley en la ciencia | 46 |
| 4.2. | La ley de Ohm. Corriente eléctrica y diferencia de potencial | 47 |
| 4.3. | Gráficas de corriente y tensión | 49 |
| 4.4. | Limitaciones de la ley de Ohm | 49 |
| 4.5. | La idea de resistencia | 50 |
| 4.6. | Resistencia eléctrica. El ohmio | 50 |
| 4.7. | Resistencia de algunos aparatos y elementos | 51 |
| 4.8. | Cálculo de la resistencia | 52 |
| 4.9. | Resistencias | 53 |
| 4.10. | Valores preferidos de resistencias | 54 |
| 4.11. | Código de colores para las resistencias | 55 |
| 4.12. | Resistencia y la ley de Ohm | 56 |
| 4.13. | Resistencia y temperatura | 58 |
| 4.14. | Resistencias en serie | 59 |
| 4.15. | Resistencias en paralelo | 60 |
| 4.16. | Redes de resistencias | 62 |
| 4.17. | Resistencia en los circuitos de corriente alterna (c.a.) .. | 65 |
| 4.18. | Resumen | 65 |
| 5. | Generación de electricidad | 66 |
| 5.1. | Pilas primarias | 66 |
| 5.2. | Pilas secundarias (acumuladores) | 67 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| 5.3. | Otras formas de generar electricidad..... | 68 |
| 5.4. | Fuerza electromotriz (f.e.m.) | 69 |
| 5.5. | Resistencia interna | 71 |
| 5.6. | Diferencia de potencial entre terminales y f.e.m. La ley de Ohm en circuitos completos..... | 72 |
| 5.7. | Pilas en serie y en paralelo | 74 |
| 5.8. | Resumen | 75 |
| 6. | Medición de la electricidad | 76 |
| 6.1. | Amperímetros y voltímetros | 76 |
| 6.2. | Resistencia de los amperímetros y de los voltímetros .. | 77 |
| 6.3. | Galvanómetro..... | 79 |
| 6.4. | Conversión en amperímetro | 80 |
| 6.5. | Conversión en voltímetro..... | 81 |
| 6.6. | Ohmímetro..... | 82 |
| 6.7. | Multímetros..... | 83 |
| 6.8. | Osciloscopio | 85 |
| 6.9. | Preparación del osciloscopio..... | 86 |
| 6.10. | Efectos que producen las entradas de corriente continua y de corriente alterna | 87 |
| 6.11. | El control de la base de tiempos..... | 89 |
| 6.12. | El osciloscopio como voltímetro..... | 90 |
| 6.13. | Otros usos del osciloscopio | 91 |
| 6.14. | Resumen..... | 91 |
| 7. | Electromagnetismo | 92 |
| | Ideas básicas sobre magnetismo..... | 92 |
| 7.1. | Polos y campos magnéticos | 92 |
| 7.2. | Combinación de campos | 95 |
| 7.3. | Materiales magnéticos..... | 95 |
| | Campos y corrientes..... | 97 |
| 7.4. | Campos magnéticos generados por corrientes eléctricas .. | 97 |
| 7.5. | Corriente circular y solenoide | 97 |
| 7.6. | Electroimanes | 100 |
| 7.7. | Tipos de electroimanes | 101 |
| 7.8. | Resumen..... | 103 |
| 8. | Energía y potencia eléctricas | 104 |
| 8.1. | Energía y potencia | 104 |
| 8.2. | Amperios, voltios, ohmios y vatios | 106 |

10 Índice

| | | |
|------------|---|------------|
| 8.3. | Cálculo de potencia..... | 106 |
| 8.4. | Facturación de la electricidad..... | 109 |
| 8.5. | Consumo de algunos equipos típicos..... | 110 |
| 8.6. | Resumen..... | 111 |
| 9. | Motores eléctricos..... | 112 |
| 9.1. | Movimiento utilizando el electromagnetismo..... | 112 |
| 9.2. | Fuerzas entre corrientes eléctricas. El amperio..... | 115 |
| 9.3. | El efecto Hall..... | 116 |
| 9.4. | Motor de corriente continua..... | 116 |
| 9.5. | Algunos detalles de diseño de motores de corriente continua reales..... | 118 |
| 9.6. | Motores de corriente alterna..... | 121 |
| 9.7. | Diseño de un galvanómetro..... | 122 |
| 9.8. | Sensibilidad de un galvanómetro..... | 124 |
| 9.9. | Altavoz de bobina móvil..... | 126 |
| 9.10. | Resumen..... | 126 |
| 10. | Inducción electromagnética..... | 128 |
| 10.1. | El efecto «opuesto» al que se da en los motores..... | 128 |
| 10.2. | Experimentos básicos. Ley de Faraday..... | 128 |
| 10.3. | Otros experimentos sobre inducción electromagnética..... | 130 |
| 10.4. | La bobina inducida..... | 130 |
| 10.5. | La dirección de la f.e.m. inducida. Ley de Lenz..... | 133 |
| 10.6. | Transformadores..... | 136 |
| 10.7. | Transformadores elevadores y transformadores reductores..... | 138 |
| 10.8. | La importancia de los transformadores..... | 139 |
| 10.9. | Potencia en los transformadores..... | 139 |
| 10.10. | Corrientes de Foucault..... | 141 |
| 10.11. | Aplicaciones de las corrientes de Foucault..... | 142 |
| 10.12. | Autoinducción..... | 145 |
| 10.13. | Fuerza contraelectromotriz (f.c.e.m.) en los motores de corriente continua..... | 147 |
| 10.14. | Resumen..... | 148 |
| 11. | Generación de corriente alterna y de corriente continua..... | 150 |
| 11.1. | Planteamiento del problema..... | 150 |
| 11.2. | Generadores y dinamos..... | 151 |

| | | |
|------------|--|------------|
| 11.3. | Generadores comerciales | 152 |
| 11.4. | La dinamo de bicicleta | 153 |
| 11.5. | Generadores de las centrales eléctricas..... | 155 |
| 11.6. | Resumen | 157 |
| 12. | Conversión de corriente alterna a corriente continua . | 158 |
| 12.1. | Planteamiento del problema..... | 158 |
| 12.2. | Rectificación de media onda..... | 158 |
| 12.3. | Rectificación de media onda con condensador..... | 161 |
| 12.4. | Rectificación de doble onda | 161 |
| 12.5. | Rectificación de doble onda con condensador | 162 |
| 12.6. | Eliminación del rizado | 163 |
| 12.7. | Adaptadores en lugar de pilas..... | 164 |
| 12.8. | Resumen | 164 |
| 13. | Distribución y utilización de la electricidad..... | 166 |
| 13.1. | Distribución de energía eléctrica..... | 166 |
| 13.2. | ¿Por qué se utiliza tensión alterna en vez de utilizar tensión continua?..... | 167 |
| 13.3. | Electricidad en el hogar..... | 169 |
| 13.4. | Fusibles..... | 172 |
| 13.5. | Interruptores automáticos | 173 |
| 13.6. | Tamaño del fusible..... | 174 |
| 13.7. | Tensión alterna trifásica..... | 175 |
| 13.8. | Precauciones. Enchufes, puestas a tierra, sobrecargas, prevención de descargas eléctricas y mantenimiento... | 176 |
| 13.9. | Resumen | 180 |
| 14. | Electricidad estática..... | 181 |
| 14.1. | Carga positiva y negativa | 181 |
| 14.2. | Cargas por fricción..... | 183 |
| 14.3. | Campo eléctrico..... | 184 |
| 14.4. | Potencial eléctrico..... | 184 |
| 14.5. | Capacidad | 185 |
| 14.6. | Inducción electrostática..... | 185 |
| 14.7. | Electroscopios y electrómetros..... | 188 |
| 14.8. | Efectos electrostáticos básicos | 189 |
| 14.9. | Distribución de carga en los conductores..... | 189 |

12 Índice

| | | |
|------------|--|------------|
| 14.10. | Efectos producidos por las cargas eléctricas en objetos puntiagudos..... | 191 |
| 14.11. | Generador de Van de Graaff..... | 191 |
| 14.12. | El pararrayos..... | 193 |
| 14.13. | Electricidad estática y corriente eléctrica..... | 193 |
| 14.14. | Resumen..... | 195 |
| 15. | Capacidad..... | 197 |
| 15.1. | Condensadores..... | 197 |
| 15.2. | Condensadores en serie y en paralelo..... | 198 |
| 15.3. | Carga y descarga de los condensadores..... | 199 |
| 15.4. | Carga y descarga a través de una resistencia. Constante de tiempo..... | 201 |
| 15.5. | El condensador ante corrientes continuas..... | 203 |
| 15.6. | El condensador ante corrientes alternas..... | 204 |
| 15.7. | Energía almacenada en un condensador..... | 206 |
| 15.8. | Aplicaciones de los condensadores..... | 207 |
| 15.9. | Resumen..... | 208 |
| 16. | Inductancia..... | 209 |
| 16.1. | Autoinducción. Bobina o «choke»..... | 209 |
| 16.2. | El efecto «choke»..... | 210 |
| 16.3. | El henrio..... | 210 |
| 16.4. | Constante de tiempo en los circuitos inductivos..... | 211 |
| 16.5. | Comutación repetitiva para conectar y desconectar.. | 213 |
| 16.6. | Bobinas de inducción en circuitos de corriente alterna. | 213 |
| 16.7. | Energía almacenada en una bobina..... | 215 |
| 16.8. | Aplicaciones de las bobinas de inducción..... | 215 |
| 16.9. | Resumen..... | 215 |
| 17. | Circuitos de corriente alterna (c.a.)..... | 217 |
| 17.1. | Algunos términos básicos..... | 217 |
| 17.2. | Frecuencia y período..... | 218 |
| 17.3. | Fase y diferencia de fase..... | 218 |
| 17.4. | Retraso y adelanto..... | 220 |
| 17.5. | Desfase con diferentes frecuencias..... | 221 |
| 17.6. | Valor de la corriente alterna. Valores eficaces..... | 221 |
| 17.7. | Resistencia en corriente alterna..... | 223 |

| | | |
|------------|--|------------|
| 17.8. | Condensadores en corriente alterna. Reactancia..... | 223 |
| 17.9. | Resistencias y condensadores. Impedancia | 224 |
| 17.10. | Bobinas en circuitos de alterna. Reactancia..... | 225 |
| 17.11. | Resistencias y bobinas..... | 226 |
| 17.12. | Condensadores y bobinas. Resonancia | 227 |
| 17.13. | Circuito bobina-condensador | 229 |
| 17.14. | Osciladores..... | 230 |
| 17.15. | Resumen | 231 |
| 18. | Comunicación con electricidad | 233 |
| 18.1. | Elementos de la comunicación..... | 233 |
| 18.2. | Algunas aplicaciones prácticas | 234 |
| 18.3. | Micrófonos..... | 235 |
| 18.4. | Altavoces | 238 |
| 18.5. | Transmisión por cable..... | 238 |
| 18.6. | Transmisión sin cable | 239 |
| 18.7. | Modulación de ondas de radio..... | 240 |
| 18.8. | Resumen | 242 |
| 19. | Electrónica básica | 243 |
| 19.1. | El crecimiento de una industria | 243 |
| 19.2. | Semiconductores: tipo- <i>n</i> y tipo- <i>p</i> | 244 |
| 19.3. | La unión <i>pn</i> | 244 |
| 19.4. | El diodo | 245 |
| 19.5. | Otros diodos..... | 246 |
| 19.6. | El transistor | 247 |
| 19.7. | El transistor de unión..... | 247 |
| 19.8. | El efecto transistor | 248 |
| 19.9. | El transistor de efecto de campo (FET) | 249 |
| 19.10. | El transistor como interruptor..... | 250 |
| 19.11. | Interruptores controlados por luz..... | 251 |
| 19.12. | Los transistores y las puertas lógicas. El sistema binario. | 252 |
| 19.13. | Aplicaciones de las puertas lógicas | 257 |
| 19.14. | El transistor como amplificador | 257 |
| 19.15. | Amplificador sencillo con transistor (frecuencia de audio) | 258 |
| 19.16. | Amplificadores estabilizados y de dos etapas | 259 |
| 19.17. | Circuitos integrados..... | 259 |
| 19.18. | Otros componentes semiconductores..... | 261 |
| 19.19. | Códigos de los diodos y de los transistores..... | 263 |
| 19.20. | Resumen | 264 |

| | |
|--|-----|
| 20. Conducción a través de líquidos y de gases | 265 |
| 20.1. Líquidos que conducen | 265 |
| 20.2. Electrólisis | 266 |
| 20.3. Electrochapado y purificación | 267 |
| 20.4. El mecanismo de la conducción eléctrica en los líquidos. | 268 |
| 20.5. Conducción eléctrica en los gases | 269 |
| 20.6. Chispas | 271 |
| 20.7. Resumen | 271 |
| | |
| Glosario de términos técnicos | 273 |
| | |
| Fórmulas clave y relaciones | 279 |
| | |
| Índice de materias | 283 |

Introducción

A veces se piensa que la electricidad constituye uno de los temas más difíciles de la ciencia, desde que se trata en el colegio de forma elemental hasta estudios avanzados en la universidad. El propósito de este libro es intentar acercar y hacer más comprensible este tema a los lectores que no quieran sentirse incómodos cuando tengan que tratar con asuntos eléctricos. Las áreas cubiertas abarcan desde ideas básicas sobre la corriente y la tensión hasta aspectos de electrónica y de distribución de energía eléctrica. Las explicaciones se dan a un nivel apropiado para unos primeros exámenes, aunque ocasionalmente están por encima de este nivel y otras veces por debajo.

Es inevitable tener que utilizar las matemáticas, pero no se necesitan grandes conocimientos para enfrentarse a la mayoría de los cálculos y de las fórmulas que aparecen en este libro. Los lectores que deseen tratar algún tema con más detalle encontrarán muchos libros de texto clásicos que profundizan en estos temas. Los conocimientos adquiridos aquí proporcionarán una base esencial para realizar después estudios más avanzados, así como unos conocimientos generales para los que no estudien más sobre el tema.

El libro utiliza el Sistema Internacional de Unidades (SI) casi exclusivamente. En las tablas siguientes se contienen las magnitudes, unidades y abreviaturas, así como los múltiplos y submúltiplos que más se presentan en situaciones prácticas. En el texto se resaltan claramente las ecuaciones, las leyes y las relaciones que son importantes. Los signos y los símbolos convencionales siguen casi completamente los que aparecen en la norma British Standard 3939.

| Magnitud | Unidad | Abreviatura |
|-------------------------|-------------------|------------------|
| Longitud | metro | m |
| Área | metro cuadrado | m ² |
| Volumen | metro cúbico | m ³ |
| Masa | kilogramo | kg |
| Tiempo | segundo, hora | s, h |
| Velocidad | metro por segundo | ms ⁻¹ |
| Fuerza | newton | N |
| Corriente | amperio | A |
| Diferencia de potencial | voltio | V |
| Resistencia | ohmio | Ω |
| Energía o trabajo | julio | J |
| | kilovatio hora | kWh |
| Potencia | vatio | W |
| Carga | culombio | C |
| Capacidad | faradio | F |
| Inductancia | henrio | H |
| Frecuencia | hertzio | Hz |

| Prefijo | Abreviatura | Valor | Ejemplo |
|---------|-------------|----------------------------|--|
| mega | M | millón | 1 MΩ = 1.000.000 ohmios |
| kilo | k | mil | 1 kW = 1.000 vatios |
| centi | c | centésima | 1 cm = $\frac{1}{100}$ metros |
| mili | m | milésima | 1 mA = 1/1.000 amperios |
| micro | μ | millonésima | 1 μC = $\frac{1}{1.000.000}$ culombios |
| pico | p | millonésima de millonésima | 1 pF = $\frac{1}{1.000.000.000.000}$ faradio |

Seguridad y trabajo práctico

La mayor parte de los riesgos asociados al manejo de aparatos o instalaciones eléctricas puede evitarse tomando precauciones lógicas. Las tomas de red son las más peligrosas debido a que la alta tensión (voltaje) y la corriente que son capaces de producir pueden ser mortales en circunstancias adecuadas. Las tensiones bajas, sin embargo, como las utilizadas en las pilas de las radios de transistores y de los juguetes, no presentan ningún riesgo. Lo peor que podría ocurrir con estos aparatos sería un cortocircuito en las pilas, lo cual haría que éstas se descargasen rápidamente, o una mala conexión que podría dañar a algún componente, pero nunca a una persona.

Las dos causas principales de peligro con las tomas de red de 220 V son las descargas eléctricas y las sobrecargas. Las descargas eléctricas se notan cuando una corriente pasa a través del cuerpo proveniente de una fuente de más de unos 60 V, que es capaz de producir una corriente de más de 0,5 A. La sensibilidad a las descargas eléctricas y la tolerancia a las mismas es muy diferente entre distintas personas, por lo cual es sensato manejar los enchufes, los interruptores y los aparatos con mucho cuidado. Las sobrecargas pueden ocurrir por un uso arbitrario de adaptadores, que puede ocasionar un paso de corriente por los cables de la casa de valor más alto que el establecido como seguro. En esta situación los cables se sobrecalientan y puede producirse un incendio.

Se deben tener las siguientes precauciones con la electricidad:

SE DEBE HACER:

- Antes de desarmar o examinar un equipo o aparato, hay que asegurarse de que está desconectado de la red eléctrica.
- Calzar zapatos con suela aislante.
- Llamar a alguien cualificado si se tiene alguna duda.
- Comprobar que las conexiones estén suficientemente apretadas y que no haya trozos de cable sueltos.
- Utilizar el código de colores en el cableado de clavijas y enchufes.
- Utilizar fusibles del tamaño correcto para cada aparato y circuito.

NO SE DEBE HACER:

- Quitar las tapas de protección de equipos que todavía están conectados a la red eléctrica.
- Taladrar las paredes justo por encima o por debajo de los interruptores de la luz o de los enchufes.
- Utilizar adaptadores sin comprobar la corriente total que se necesita.
- Utilizar circuitos de iluminación para conectar aparatos de calefacción o motores.
- Utilizar cable doble en dispositivos que necesitan una puesta a tierra.

(Los principios en que se basan estos puntos se tratan en varias partes del libro, particularmente en la parte de seguridad en el hogar del capítulo 13.)

El trabajo práctico es, a veces, la mejor forma de desarrollar la perspicacia real en un tema como la electricidad. Para quien desee intentar alguno de los experimentos y ejercicios descritos en este libro, se sugiere la siguiente lista de objetos, que son relativamente fáciles de obtener. Otros objetos se pueden improvisar sin mucha dificultad.

Pilas secas de 1,5 V
Pila seca de 4,5 V

Polímetro normal
Imanes

| | |
|--|------------------------|
| Portapilas | Limaduras de hierro |
| Portalámparas pequeños | Brújula |
| Bombillas de 1,25 V y de 4,5 V | Barras de hierro dulce |
| Clips de cocodrilo | Selección de: diodos |
| Cable para hacer conexiones (simple o recubierto de plástico) | resistencias |
| Pelacables | transistores |
| Interruptores de baja tensión | Termistor |
| Resistencia variable de 0-10 Ω | Selección de fusibles |

Para realizar trabajos más serios, especialmente en electrónica, hay distintos tipos de placas de prueba en las que se pueden montar circuitos más permanentes. Hay tiendas especializadas que anuncian todos estos productos, junto con muchos otros componentes de equipos eléctricos y electrónicos.

1

Corriente eléctrica

1.1. Corriente significa flujo

Muchas ramas de la ciencia suelen estar llenas de palabras especiales, una especie de jerga que a veces facilita la comprensión exacta de lo que ocurre. Hay algunas en electricidad que aparecerán más tarde, pero para denominar la idea básica de una corriente eléctrica utilizamos la palabra de forma similar al lenguaje ordinario. La gente habla de una corriente de aire, de la corriente de las mareas, de la corriente de un río o incluso de una corriente de opinión cuando entiende que el aire, la marea, el río o la opinión pública se está moviendo o fluyendo en una dirección determinada. Una corriente eléctrica supone lo mismo —un flujo de alguna clase— y es razonable suponer que el flujo de electricidad es similar de alguna forma al flujo de aire o de agua, como de hecho es.

1.2. ¿Un flujo de qué? Carga eléctrica

Es fácil comprender qué es una corriente de aire o de agua, puesto que se pueden sentir directamente colocándose ante el viento o introduciendo una mano en un río, y sus efectos se pueden observar a través del movimiento de las nubes o el de un barco. En estos casos, realmente se está moviendo el aire o el agua, con efectos claros que todo el mundo puede ver. Una corriente de opinión es algo más difícil de comprender porque no hay nada visible que se mueva o fluya. Sin embargo, la propagación de una idea o de una moda por todo

un país es suficientemente real y sus efectos se pueden percibir muy claramente.

En el caso de la corriente eléctrica no es posible ver lo que fluye en ese momento, sólo apreciamos los efectos del flujo. Incluso un relámpago es la consecuencia de un flujo de electricidad muy brusco, no es el flujo en sí. Una corriente eléctrica es un flujo de *carga* eléctrica, transportada por minúsculas partículas llamadas electrones o iones; esta carga puede ser negativa o positiva. Por tanto, se puede describir una corriente eléctrica como un flujo de *electrones* o de *iones*. Como regla, se puede decir que son los electrones los que se mueven cuando la electricidad fluye a través de materiales sólidos, pero son los iones los que se mueven cuando fluye a través de líquidos o gases.

1.3. ¿Qué cantidad fluye? Culombios por segundo

Las cargas transportadas por los electrones y los iones son muy pequeñas, así como las partículas mismas. Un electrón tiene una masa de 10^{-30} kg aproximadamente, mientras que un ion es mucho más grande. Un ion puede tener la misma carga que un electrón o, como mucho, el doble o el triple.

La carga se mide en *culombios*. Un electrón lleva sólo una pequeñísima parte ($1,6 \times 10^{-19}$) de un culombio. De hecho, unos 6×10^{18} (seis millones de millones de millones) tienen conjuntamente la carga de un culombio. Cuando las cargas se mueven de un lugar a otro, o sea, cuando se provoca el movimiento de electrones o de iones, el *flujo* de electricidad se mide en culombios por segundo en lugar de electrones o iones por segundo.

Esta medida de la corriente eléctrica en culombios por segundo se corresponde exactamente con las formas de describir otras corrientes. Por ejemplo, un río fluye a un determinado número de metros cúbicos por segundo, el tráfico que hay en una autopista se mueve a una velocidad de tantos miles de vehículos por hora, o el agua se bombea por una tubería a una velocidad de tantos millones de metros cúbicos por día. Por tanto, la corriente eléctrica, como otros flujos, se mide por la velocidad a la que se mueve la magnitud básica, volumen de líquido, vehículos o, en este caso, electrones con su carga. La unidad básica de un culombio por segundo implica unos 10^{18} electrones por segundo.

1.4. ¿Qué es un amperio?

La unidad en la que se mide la corriente eléctrica recibe el nombre de *amperio*, que es exactamente lo mismo que un coulombio por segundo, o sea, un nombre más corto para la misma cosa.

1 amperio = 1 coulombio por segundo

1 amperio equivale a un flujo de 10^{18} electrones por segundo

La unidad se abrevia, además, a veces como amp o simplemente como A. Así, una corriente de 5 A significa cinco amperios, o cinco culombios por segundo. Los nombres provienen de los de André Marie Ampère (1775-1836), que trabajó en las relaciones entre la electricidad y el magnetismo, y Charles Augustin Coulomb (1736-1806), que investigó sobre las fuerzas entre cargas (véase también el apartado 9.2).

1.5. Magnitud de las corrientes eléctricas

Para ayudar a hacerse una idea de la magnitud de un amperio es conveniente conocer la magnitud de corrientes de uso cotidiano. Puesto que el amperio es una unidad bastante grande para muchos propósitos, se utiliza un submúltiplo suyo, el miliamperio (mA, la milésima parte de un amperio). Incluso a veces se necesita una unidad todavía más pequeña, el microamperio (μ A, millonésima parte de un amperio).

En el cuadro se recogen algunos aparatos de uso cotidiano y las corrientes típicas que necesitan para funcionar.

| | | | |
|------------------------|-------|--------------------|-------|
| Máquina de afeitar | 30 mA | Grabador de vídeo | 1,0 A |
| Radio de transistores | 0,2 A | Frigorífico | 1,5 A |
| Linterna | 0,3 A | Taladradora | 2,0 A |
| Bombilla de 100 vatios | 0,4 A | Ordenador personal | 3,0 A |
| Tren de juguete | 0,5 A | Plancha | 3,0 A |
| Equipo de música | 0,6 A | Tostador | 6,3 A |
| Televisión | 0,8 A | Calentador de agua | 12 A |

1.6. Velocidad a la que se mueven los electrones

Aunque una corriente de 1 A implica el paso de unos 10^{18} electrones en un segundo, y aunque los efectos de la corriente se pueden ver casi instantáneamente, la velocidad a la que se mueven los electrones por un cable es sorprendentemente baja. La velocidad depende de la magnitud de la corriente, así como del diámetro y del material del cable: si tenemos 1 A pasando por un hilo de cobre de 1 mm de diámetro, resulta que la velocidad de los electrones es sólo de 1/10 mm por segundo aproximadamente. Cuanto más grande es la corriente, más grande es la velocidad, pero incluso en dispositivos con grandes corrientes se sigue tratando sorprendentemente de un movimiento lento.

1.7. Dirección del flujo de electrones y la corriente eléctrica

En todos los diagramas de circuitos, como los que aparecerán en capítulos posteriores y que se encuentran en ciertos aparatos eléctricos (tales como las radios de transistores) y en los manuales de motores de coche, se supone siempre que la corriente va de positivo a negativo, de (+) a (-). De hecho, ahora se cree que los electrones se mueven en sentido opuesto, de (-) a (+). Cuando los científicos estaban desarrollando las primeras ideas sobre la electricidad, no se había descubierto el electrón y ya se habían dado los nombres de positivo y negativo a las dos clases de carga. Más tarde se descubrió que el electrón tenía carga negativa.

Cuando circula una corriente, son los electrones que hay en el terminal negativo los que se mueven a través de los cables hacia el terminal positivo de la fuente de alimentación, esto es, de (-) a (+). Desafortunadamente, antes de que se supiera esto se tenía por costumbre describir las corrientes eléctricas circulando de (+) a (-), siguiendo el sentido que se denomina «por convenio». En la práctica, la diferencia no afecta mucho al estudio y comprensión de la electricidad, pero se debe ser consciente del histórico accidente que ha dado lugar a una descripción errónea. (Sólo en algunas aplicaciones de dispositivos electrónicos se debe considerar el sentido real en vez del sentido por convenio.)

1.8. Amperímetros

Cualquier aparato que mida la magnitud de una corriente eléctrica se denomina *amperímetro*. Hay varias formas de construir estos aparatos, que se considerarán más tarde (Caps. 6 y 9), pero el tipo más común indica la corriente, es decir, la velocidad del flujo de carga eléctrica, por medio de la lectura constante de una aguja en una simple escala marcada en amperios o miliamperios. El amperímetro se coloca de forma que la corriente a medir pase a través del mismo (Fig. 1.1).

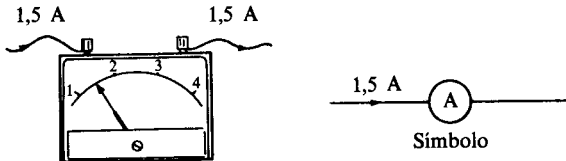


Figura 1.1.—Un amperímetro mide la corriente que pasa a través de él.

Un amperímetro bien diseñado indicará la corriente claramente y con exactitud. En muchos circuitos este instrumento forma parte permanentemente de la instalación, siendo siempre capaz de dar una indicación visual de la corriente, como, por ejemplo, el cargador de baterías. A veces, sin embargo, es necesario introducir temporalmente un amperímetro en un circuito, para ver qué corriente está pasando, como cuando se comprueba una radio de transistores, por ejemplo. En este caso, es importante que el amperímetro mida la corriente que estaba pasando antes de que él fuera conectado en el circuito, por lo que el amperímetro no debe provocar un cambio en la magnitud de la corriente, cosa que se consigue por el propio diseño interno del mismo. Estamos hablando de un amperímetro que mida la corriente que pasa a través de un cable o de un componente.

1.9. Corriente continua y corriente alterna

Se ha introducido la idea de corriente eléctrica como un flujo de carga transportada por electrones que se mueven en una dirección determinada. Un diagrama de tiempo de una corriente de este tipo

es como el de la figura 1.2, siempre en la misma dirección y normalmente constante en su magnitud.

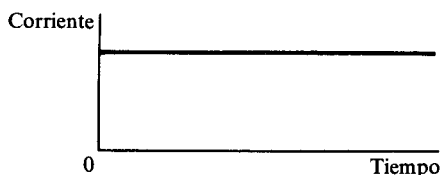


Figura 1.2.—Diagrama de tiempo de una corriente continua.

Decimos que se trata de una *corriente continua*, a veces abreviado como c.c. (*d.c.* en inglés). Todos los aparatos que funcionan con batería utilizan corriente continua y se usarán en muchas partes de este libro para desarrollar las propiedades principales de la electricidad, en parte porque es fácil imaginarse lo que ocurre.

Hay otra forma importante en que puede fluir la electricidad, llamada *corriente alterna* o c.a. (*a.c.* en inglés). En lugar de circular siempre en la misma dirección, una corriente alterna circula primero en un sentido y después en el otro, cambiando constantemente de sentido. En la figura 1.3 se representan los diagramas de tiempo de varios ejemplos diferentes de corrientes alternas.

La forma del gráfico corriente-tiempo depende de cómo se ge-

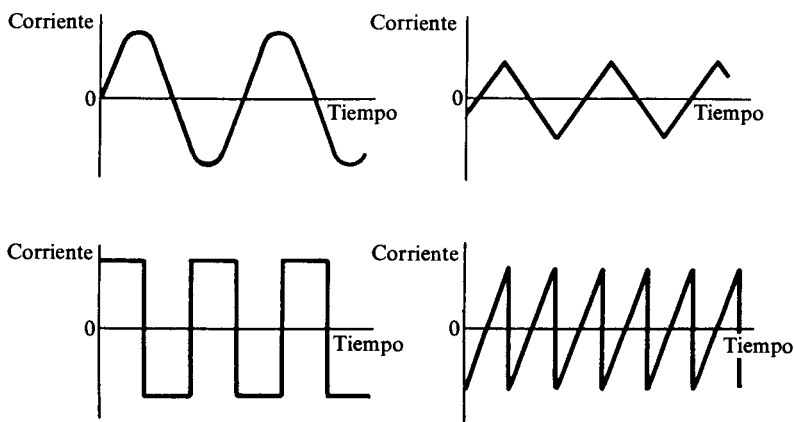


Figura 1.3.—Diagramas de tiempo de varias corrientes alternas.

nera la corriente alterna. La corriente alterna que varía suavemente en el primer ejemplo es la más común, y se utiliza en la red eléctrica que da suministro a las casas, oficinas y fábricas. Los alternadores de los coches y las dinamos de las bicicletas también producen corrientes alternas. Veremos algunas propiedades y usos de la corriente alterna que difieren de los de la corriente continua, pero muchos de los elementos de la electricidad se aplican a ambas de igual forma.

Utilizando la analogía del flujo de agua, introducida al principio del capítulo, el movimiento del agua a través del sistema de calefacción central es un buen ejemplo de corriente continua, mientras que el flujo y reflujos a gran escala de las mareas constituye una corriente alterna que fluctúa casi dos veces al día.

1.10. Resumen

- Una corriente eléctrica es un flujo de carga transportada por electrones o iones.
- La carga se mide en culombios y la corriente en amperios.
- Un amperio es un culombio por segundo.
- Se dice que la corriente va de (+) a (–) en un circuito.
- La magnitud de una corriente se mide con un amperímetro, el cual puede convertirse en parte del circuito por el que circula la corriente.
- La corriente continua circula siempre en la misma dirección.
- La corriente alterna circula alternativamente en ambas direcciones.

2

Circuitos sencillos

2.1. Circulación de corriente en un circuito cerrado

Los circuitos eléctricos, al igual que los circuitos de agua de calefacción central, constan en su forma más simple de tres partes principales: *a*) un circuito cerrado a través del cual pasa la corriente; *b*) un dispositivo que es capaz de mover las cargas (o el agua) por todo el circuito, y *c*) un lugar donde la corriente realiza el trabajo útil aprovechable por nosotros. En un circuito eléctrico, las cargas (los electrones) fluyen a través de un circuito cerrado de cables, movidas de una cierta forma por una pila (por ejemplo, una pila de linterna), provocando que se ilumine una bombilla o que funcione un motor. En un circuito de calefacción central el agua caliente fluye a través de un circuito cerrado de tuberías, movida a lo largo del mismo por una bomba, y calienta un radiador para que a su vez caliente el aire que hay alrededor del mismo (Fig. 2.1).

Es importante tener en cuenta que debe haber un circuito cerrado de cables o de tuberías de agua para mantener el flujo en todo momento. Sólo cuando están conectados ambos cables entre la lámpara y la pila, luce la lámpara; con un solo cable no funciona, puesto que es el flujo de electrones que pasa por la lámpara el que provoca que se caliente el filamento. Ocurre de forma similar con el radiador, se necesita un flujo de agua caliente para mantener el radiador más caliente que el aire circundante. (De todas formas, hay una dificultad si se lleva la analogía demasiado lejos, y es que en el circuito de agua debe haber también un calentador o una caldera,

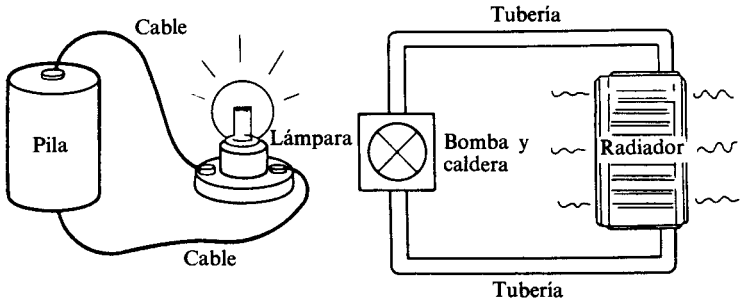


Figura 2.1.—Circuitos eléctrico y de agua.

además de los componentes representados para calentar el agua.) Si por cualquier razón se rompiera el circuito cerrado, por desconectar un cable o por apagar la bomba, por ejemplo, el flujo cesaría, provocando que la lámpara se apagara y que el radiador se enfriara.

2.2. Dirección del flujo

Como se explicó en el capítulo anterior (Ap. 1.7), representamos las corrientes eléctricas circulando desde el terminal (+) de la pila pasando por los cables y aparatos hasta llegar al terminal (-), incluso aunque sabemos que los electrones (los elementos que se mueven realmente por el circuito) se mueven en sentido contrario. En los diagramas de circuitos se suelen representar las corrientes de arriba hacia abajo, pasando por los aparatos en los cuales se transfiere energía: lámparas, motores, bobinas, calentadores, etc. (Figura 2.2).

2.3. Magnitud de la corriente que circula por un circuito

Una corriente eléctrica es un flujo de carga y la magnitud de la corriente indica la velocidad de ese flujo. Un experimento sencillo utilizando dos amperímetros (o el mismo amperímetro en dos sitios

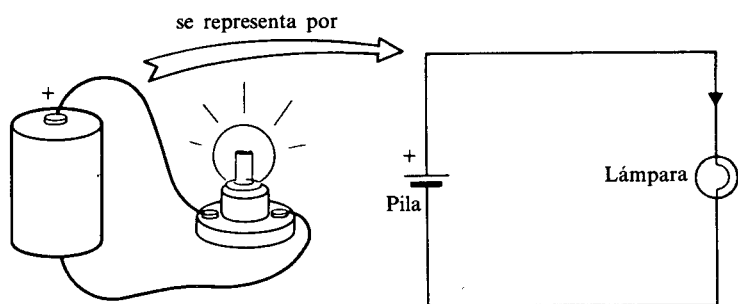


Figura 2.2.—La dirección de la corriente se indica de (+) a (-).

diferentes) mostrará el valor de la corriente que entra y de la que sale de la lámpara (Fig. 2.3).

Podemos sorprendernos al comprobar que los amperímetros marcan la misma corriente tanto en la entrada como en la salida de la lámpara. Es un error común creer que la corriente se consume en la lámpara, entrando más cantidad de la que sale, pero si se tiene en cuenta la idea de «velocidad del flujo» se deduce que no es posible que desaparezca la corriente, a menos que se «salga» de alguna forma de la lámpara. (Piénsese en el flujo de agua a través de un radiador.)

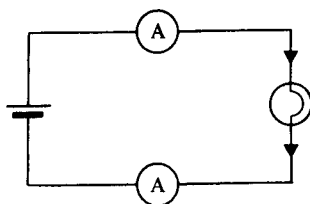


Figura 2.3.—Medición de la corriente en diferentes puntos.

Lo que ocurre dentro de la lámpara es que la energía eléctrica generada por la pila se transforma en energía térmica y luminosa, como se transfiere en un radiador la energía de la caldera al aire de la habitación.

La corriente es la misma en todos los sitios en un circuito sencillo (Fig. 2.4), independientemente del lugar en que se mida y de cuántos

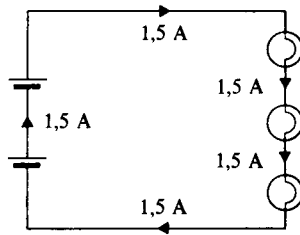


Figura 2.4.—La corriente es la misma en todas partes en un circuito cerrado.

componentes haya, incluso dentro de la pila, si se pudiera colocar dentro un amperímetro para medirla. De nuevo, el circuito de agua, donde el flujo de agua circula por la bomba y por los demás sitios, ofrece una comparación buena.

2.4. Corrientes y uniones en los circuitos. Ley de Kirchhoff

Hay muy pocos circuitos en los aparatos eléctricos que sean simples circuitos cerrados, por lo que necesitamos saber qué ocurre con la corriente allí donde hay uniones. De nuevo, la idea básica de velocidad de flujo proporciona la respuesta sin dificultad. Supongamos que a una unión llegan seis culombios por segundo; deben salir de la unión el mismo número de culombios por segundo, pues de otra forma habría un exceso de electrones acumulándose en la unión o habría una desaparición misteriosa de ellos (Fig. 2.5). (Un resultado similar ocurriría con el flujo de agua, por supuesto suponiendo que no hay «escapes».)

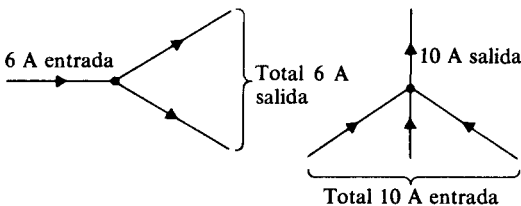


Figura 2.5.—Corrientes en una unión (nudo).

Generalizando más allá de los dos casos sencillos que se representan en la figura 2.5, podemos decir que se cumple lo mismo en el caso de nudos más complejos (Fig. 2.6).

La relación existente entre las corrientes eléctricas en los nudos o uniones se resume por la ley de Kirchhoff, la cual establece que:

La corriente total que entra en un nudo de una red eléctrica es igual a la corriente total que sale del nudo.

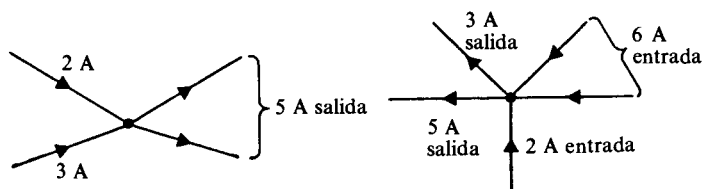


Figura 2.6.—En un nudo la corriente que entra es igual a la que sale.

En los dos ejemplos de la figura 2.6 hay muchas posibilidades distintas, cumpliendo todas la ley de Kirchhoff: las dos corrientes pueden ser, en principio, de 4 A y 1 A, o de 2,5 A y 2,5 A, o de 0 A y 5 A, o incluso de 6 A saliendo y 1 A entrando en el nudo. El lector puede pensar en muchos casos similares para el segundo ejemplo.

2.5. Conexión en serie

El circuito cerrado sencillo de la figura 2.2 tiene la misma corriente en todas las partes del circuito. Se trata de una disposición sencilla en la que no hay nudos ni ramas, cada parte se conecta con la otra en cadena. Un circuito en el que sucede esto se denomina *circuito serie* (o en serie) (Fig. 2.7).

La palabra serie se aplica al circuito entero, pero también se emplea para denominar la forma en que están conectadas las lámparas o las pilas unas a otras. Por tanto, las lámparas están conectadas «en serie» en el primer circuito, y las pilas en el segundo. Además, en cada circuito las pilas y las lámparas están también

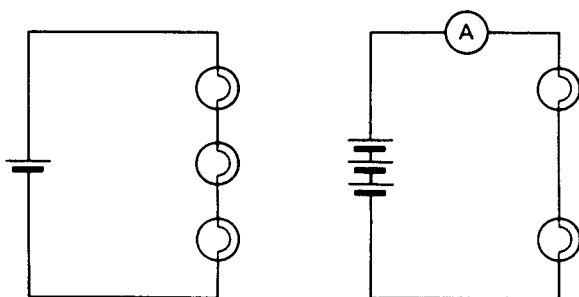


Figura 2.7.—Ejemplos de circuitos serie.

en serie. Cualquier conexión en cadena de componentes por los que pase la misma corriente se denomina *conexión en serie*, o se dice que los componentes están conectados en serie.

Una característica de los circuitos serie, como es el caso de las luces del árbol de Navidad, es que como la corriente pasa a través de cada bombilla, el fallo en una de ellas provoca que se apaguen todas, porque el circuito «se rompe».

2.6. Conexión en paralelo

Cuando los elementos de un circuito están dispuestos de forma que la corriente se distribuye entre dos o más caminos alternativos, y después vuelve a circular por uno solo, se dice que están conectados en *paralelo* el uno con el otro. Una característica de esta disposición es que las ramas en paralelo comparten la corriente total que llega a un nudo y después vuelve a tener su valor original a partir de un segundo nudo (Fig. 2.8).

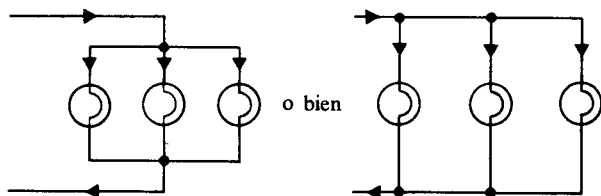


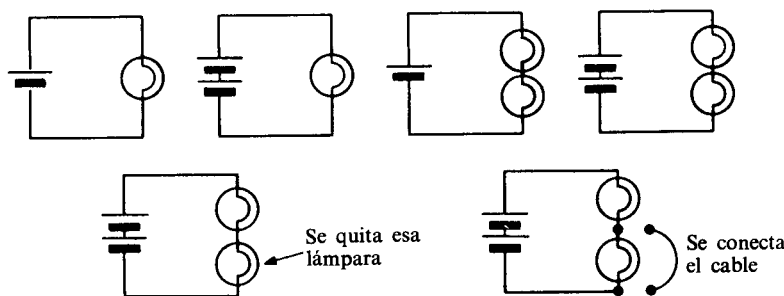
Figura 2.8.—Conexiones en paralelo.

Las luces traseras de los coches son un ejemplo de conexión en paralelo, así como el sistema de conexión de enchufes de las casas y de las bombillas de las arañas. En esta forma de interconexión de lámparas, el fallo en una de ellas no provoca que se apaguen todas.

2.7. Trabajo práctico con circuitos sencillos

Se pueden investigar las propiedades de los circuitos serie y paralelo con unas cuantas pilas, lámparas y cables construyendo circuitos como los que se representan en la figura 2.9. Realizando esto, el lector podrá hacerse una idea sobre los factores que hacen crecer

Serie



Paralelo

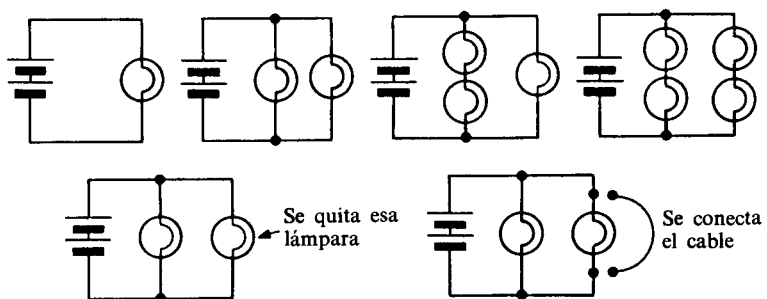


Figura 2.9.—Circuitos serie y paralelo.

y decrecer las corrientes, utilizando el brillo de las lámparas como indicación de la magnitud de la corriente.

2.8. Conexiones en serie y en paralelo mezcladas

La mayoría de los circuitos en las aplicaciones prácticas son una mezcla de conexiones en serie y en paralelo, y pueden incluso contener más de una fuente de alimentación de electricidad. En circuitos complicados es más normal utilizar las palabras «serie» y «paralelo» para grupos de componentes que para el circuito completo. Por ejemplo, en la figura 2.10, la pila y el interruptor principal están en serie, mientras que las ramas que contienen lámpara e interruptor están en paralelo unas con otras.

El diagrama del circuito de un amplificador con transistor sencillo ilustra mejor cómo se pueden combinar conexiones en serie y en paralelo (Fig. 2.11).

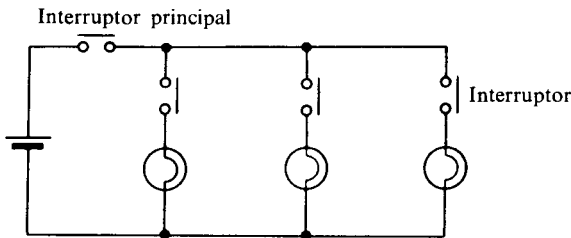


Figura 2.10.—Conexiones en serie y en paralelo mezcladas.

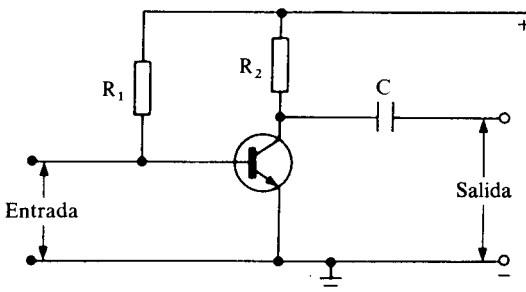



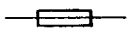


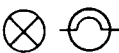

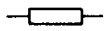



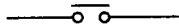



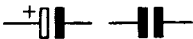
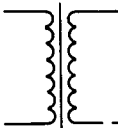





Figura 2.11.—Conexiones en serie y en paralelo en un circuito amplificador.

2.9. Diagramas de circuitos y símbolos

La relación siguiente contiene la mayoría de los símbolos para diagramas (o esquemas) de circuitos que se utilizan en este libro:

| | | | |
|---|------------------------|---|--------------------------------|
|  | Cable |  | Batería |
|  | Nudo (unión de cables) |  | Fusible |
|  | Pila |  | Tierra |
|  | Lámpara |  | Diodo |
|  | Resistencia |  | Transistores de unión |
|  | Resistencia variable | | |
|  | Galvanómetro |  | |
|  | Amperímetro |  | Interruptores |
|  | Voltímetro |  | Condensador |
|  | Transformador |  | Condensador variable |
| | |  | Fuente de alimentación de c.a. |
| | |  | Bobina o choke |

Los símbolos se pueden representar en casi todas las posiciones y orientaciones.

Ya ha aparecido anteriormente el esquema de circuito más simple —un único circuito cerrado sin ramas ni nudos— y también hemos visto algunos de los símbolos más comunes —pila, lámpara, cable—. Aparecerán muchos más a lo largo del libro como representación rápida de muchos circuitos prácticos. Raras veces los diagramas informarán de la posición exacta de los componentes materialmente, pero muestran la relación entre los componentes de

forma clara. El funcionamiento de los circuitos se comprende mejor mirando los diagramas que viendo el aspecto de los aparatos que contienen los circuitos. El diseño de un circuito se comienza generalmente por los diagramas y después se desarrolla la implantación práctica.

2.10. La corriente en conexiones en serie y en paralelo

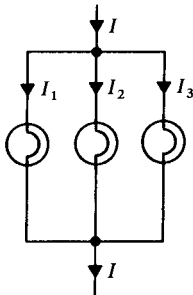
De todo lo que se ha dicho hasta ahora se deducen directamente las dos conclusiones siguientes, que serán muy útiles al considerar otros circuitos que hay en el libro más adelante:

Serie



En una disposición en serie la corriente que circula a través de cada componente es la misma.

Paralelo



En una disposición en paralelo la corriente total que entra es igual a la suma de las corrientes que circulan por cada rama:

$$I = I_1 + I_2 + I_3$$

Obsérvese que en los diagramas de circuitos se utiliza la letra I como símbolo de la corriente eléctrica, mientras que la letra A indica un amperímetro o la unidad de corriente, el amperio.

2.11. Resumen

- La corriente eléctrica circula por circuitos cerrados formados por materiales conductores.
- El valor de la corriente es el mismo en todos los puntos de un circuito elemental.
- En un nudo de un circuito eléctrico la corriente total que entra es la misma que la que sale.
- En una conexión en serie circula la misma corriente por todos los componentes.
- En una conexión en paralelo pueden circular distintas corrientes por los distintos componentes.
- Se utilizan símbolos estándares para representar los componentes en los diagramas de circuitos.

3

Voltaje

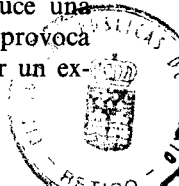
3.1. «Fuerza» eléctrica

Hemos comparado el flujo de cargas eléctricas al movimiento del agua a través de tuberías: en ambos casos es lógico entonces pensar en la corriente como la velocidad de ese flujo de algo en movimiento. Siguiendo con la comparación podemos ver, en el caso del agua, que sólo fluirá por el sistema de tuberías si es impulsada por una bomba. La bomba crea una fuerza que mantiene el movimiento del agua por las tuberías de forma continua. La corriente de agua o, lo que es igual, su velocidad de flujo, depende de la fuerza que causa el movimiento (con la bomba apagada no hay fuerza y la corriente es cero).

De igual forma, en el caso eléctrico el flujo de electrones (la corriente) depende de la generación de una *fuerza* eléctrica que produce el movimiento de los electrones a través de los cables y de las lámparas, así como de otros componentes de circuitos. En el caso del circuito elemental es la pila la que produce esta fuerza debido a la reacción química que tiene lugar dentro de la misma. El término que se utiliza es *fuerza electromotriz*, que describe exactamente el efecto que tiene lugar; es decir, produce el movimiento de las cargas eléctricas.

3.2. «Nivel» eléctrico

Siguiendo con la analogía del agua, una bomba produce una diferencia de presión entre su entrada y su salida, lo que provoca el movimiento del agua por una tubería que se conecte por un ex-



tremo a la entrada de la bomba y por el otro a la salida de la misma. En otras palabras, la diferencia de presión provoca el flujo de agua. (Las diferencias de presión en la atmósfera provocan de forma similar el movimiento del aire de un lugar a otro, esto es, los vientos.) De igual forma, en una barra de metal circula la energía térmica si hay una diferencia de temperatura entre sus extremos. Todas estas situaciones tienen en común que hay una diferencia de «nivel» de alguna propiedad que es capaz de poner en movimiento algo.

En electricidad se utiliza el mismo tipo de lenguaje: los terminales de una pila tienen diferentes «niveles» eléctricos, uno mayor que el otro. Cuando se conectan estos dos niveles con un material apropiado circula la carga. Los términos «nivel» y «fuerza» son útiles porque comparan el flujo de electricidad con otros tipos de flujos en un lenguaje coloquial, ilustrando la semejanza que existe entre ellos.

3.3. Fuerza electromotriz, diferencia de potencial y voltaje

La fuerza electromotriz (Ap. 5.4) se crea por medio de una pila o de cualquier fuente de energía eléctrica, como un generador o una dinamo, y se mide en *voltios* (denominación debida al científico italiano Alessandro Volta, 1745-1827). La diferencia de «nivel» eléctrico, llamada *diferencia de potencial*, entre dos puntos de un circuito también se mide en voltios. Los dos conceptos «fuerza» y «nivel» son simplemente dos formas distintas de describir el motivo por el que se mueven las cargas, por lo cual es lógico medirlos en las mismas unidades.

Cuando una f.e.m. (fuerza electromotriz) o una diferencia de potencial producen el movimiento de cargas eléctricas, que a su vez pueden hacer lucir una lámpara o mover un motor, hay claramente una transferencia de energía desde la fuente de electricidad a la lámpara o al motor. Por ejemplo, la energía química de la pila se transforma en energía térmica y luminosa en la lámpara. Como en otras ramas de la física, cuando hay una transferencia de energía de un objeto a otro, se debe realizar un trabajo para producir el efecto. El trabajo realizado es igual a la cantidad de energía transferida, midiéndose ambos en *julios*. (Para levantar una masa de 100 g

a una altura de 1 m del suelo se debe realizar un trabajo de 1 J aproximadamente, lo que quiere decir que se debe transferir un julio de energía desde el cuerpo que lo levanta al objeto.) Por tanto, la unidad de fuerza electromotriz o de diferencia de potencial, el voltio, debe relacionarse con la cantidad de trabajo que se necesita para mover los electrones (o las cargas), lo que significaría que el voltio debe estar relacionado con el julio y el culombio. Simplemente diremos que 1 V es igual a 1 J dividido por 1 C y es la unidad de medida del «nivel» eléctrico. En los capítulos 5, 8 y 14 se trata esta idea con más detalle. De igual forma, la unidad de medida de la velocidad se relaciona con la unidad de espacio (metro o kilómetro) y con la de tiempo (segundo u hora), pero en este caso no recibe un nombre especial.

3.4. Voltios: +, -

Si se acepta la idea de diferencia de «nivel» eléctrico, medida en voltios, surge el problema de considerar si la diferencia es positiva o negativa, y de qué es o dónde está el cero.* Se presenta un caso parecido con las curvas de nivel de los mapas geográficos: la diferencia de altura es fácil de ver, pero hay que analizar más detenidamente para decidir si los desniveles del terreno van hacia un lado o hacia otro, así como para saber si la altura está por encima o por debajo del nivel del mar. En muchas ocasiones, en electricidad es suficiente conocer la diferencia de potencial existente y saber cuál de los dos puntos en cuestión tiene el «nivel» más alto, no siendo tan importantes los valores absolutos de cada punto.

Se dice que el terminal positivo (+) de una pila tiene mayor *potencial* (nivel) que el negativo (-) (de hecho, los signos + y - son de gran ayuda en este caso; véase el apartado 1.7). Con este convenio la corriente eléctrica va de mayor potencial a menor potencial, lo cual encaja con que el agua fluya de mayor a menor presión y la energía térmica vaya de mayor a menor temperatura. (Por supuesto, estamos hablando de la corriente por convenio, no del flujo de electrones.) De igual forma, si comprobamos que una corriente circula entre dos puntos en un cierto sentido, podemos deducir fácilmente qué punto es el que se encuentra a mayor potencial.

3.5. Potencial cero

Hay situaciones en que es necesario referir las tensiones (o voltajes) a un nivel cero y saber si los valores que toman están por encima o por debajo de esta referencia. Hay dos formas para definir este cero arbitrario, una teórica y otra práctica. La teórica dice que este punto está muy lejos (infinitamente lejos) de cualquier objeto cargado, diciéndose entonces que se encuentra a potencial cero. Esta idea es útil para los científicos matemáticos, pero no es fácil de utilizar en la vida normal.

La forma práctica considera como cero el potencial al que se encuentra la Tierra. Esta consideración es similar a la que se hace tomando el nivel del mar como referencia arbitraria para las alturas en la tierra y las profundidades en los océanos. El gran volumen del mar hace que su nivel medio no se afecte notablemente, a pesar de que hay entradas y salidas de agua en el mismo, siendo un nivel de referencia cero aceptable para medir alturas. De forma similar, un objeto tan grande como la Tierra no tendrá cambios notables en su nivel eléctrico, a pesar de que entran y salen millones de electrones a la misma; por eso, en la práctica sirve como cero de potencial.

3.6. Puesta a tierra

Cuando tratemos la seguridad eléctrica (Cap. 13) hablaremos sobre la conexión o puesta a tierra de aparatos tales como un calentador eléctrico. Literalmente, quiere decir que se debe conectar con un cable a la tierra. Esto se debe hacer para mantener el objeto y la persona que lo maneja al mismo potencial, el potencial de tierra, que es cero, de forma que no pueda pasar ninguna corriente del aparato a la persona, produciendo una descarga eléctrica en ésta cuando maneja el aparato.

A veces es útil en los circuitos eléctricos conectar a tierra ciertos puntos para conocer sus potenciales, nulos en este caso, y poder saber de esta forma los potenciales de otros puntos. El chasis metálico donde se monta el circuito sirve muy bien para conectarlo a tierra.

3.7. Magnitud de los voltajes eléctricos

Hoy día hay mucha variedad de equipos eléctricos que dan lugar a voltajes muy diferentes, desde muy pequeños hasta muy grandes. Normalmente se utilizan muchos múltiplos y submúltiplos del voltio para evitar tener que utilizar muchos ceros en las cifras, como ocurre en otras ramas de la física (véase también el apartado 1.5):

- 1 kilovoltio (1 kV) = 1.000 voltios (1.000 V o 10^3 V)
- 1 megavoltio (1 MV) = 1.000.000 voltios (1.000.000 V o 10^6 V)
- 1 milivoltio (1 mV) = 1/1.000 voltios ($1/1.000$ V o 10^{-3} V)

Seguidamente se representa una lista de algunos aparatos eléctricos y la diferencia de potencial que generan o utilizan para funcionar:

| | | | |
|-----------------------|-------|---|------|
| Bombilla de linterna | 1,5 V | Tubo de imagen de televisión | 2 kV |
| Lámpara de coche | 12 V | Encendedor del gas piezoeléctrico | 2 kV |
| Red eléctrica | 220 V | Chispa de las bujías de los motores de los coches | 5 kV |
| Radio de transistores | 6 V | | |

3.8. Voltímetro

La forma más fácil de medir diferencias de potencial es utilizando un voltímetro, que se fabrica de forma similar a un amperímetro, pero adaptado para medir voltios en vez de amperios. En el capítulo 6 se explicará cómo funciona. La diferencia más importante que hay entre un voltímetro y un amperímetro es que aquél está diseñado de forma que tenga una resistencia grande (Cap. 5) y se conecta en los circuitos de forma diferente.

Mientras que el amperímetro se intercala directamente en el circuito, de forma que la corriente a medir pase a través del instrumento mismo (Ap. 1.8), el voltímetro se conecta entre los dos puntos cuya diferencia de potencial se quiere medir (Fig. 3.1). Por tanto, el voltímetro se puede conectar entre dos puntos del circuito sin

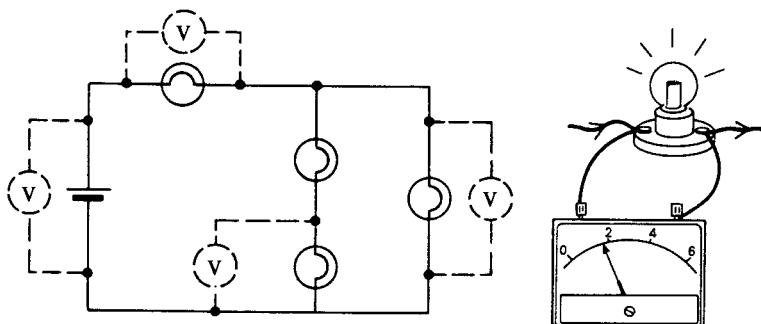


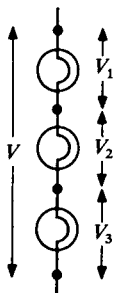
Figura 3.1.—Colocación de un voltímetro en un circuito.

tener que desconectar ninguna parte ni ningún cable e incluso, si se tiene cuidado, sin apagar el circuito. Por supuesto, hay una pequeña corriente que circula por el voltímetro, pero si se elige cuidadosamente el instrumento, esta corriente no afecta prácticamente a los voltajes a medir (Ap. 6.5).

Con un voltímetro se puede medir la diferencia de potencial que «cae» en un componente o el potencial de un punto respecto a otro.

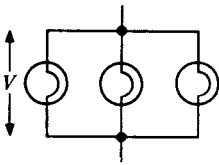
3.9. Voltaje o diferencia de potencial en disposiciones en serie y en paralelo

Si se tienen en cuenta las ideas de «nivel» eléctrico o fuerza eléctrica que llamamos voltaje o diferencia de potencial, se pueden sacar directamente dos conclusiones que pueden ser útiles al tratar otros circuitos que veremos posteriormente.



La suma de las diferencias de potencial por separado V_1 , V_2 y V_3 que caen en los componentes conectados en serie es igual a la diferencia de potencial total que cae en ellos (de igual forma que las diferencias de altura en un mapa).

$$V = V_1 + V_2 + V_3$$



La diferencia de potencial V que cae en cada componente conectado en paralelo debe ser la misma (la misma diferencia de altura medida por diferentes caminos).

3.10. Resumen

- La corriente eléctrica se origina por medio de una fuerza electromotriz (f.e.m.) o diferencia de potencial.
- Tanto la f.e.m. como la diferencia de potencial se miden en voltios.
- El potencial de la tierra se utiliza como potencial cero.
- La f.e.m. o la diferencia de potencial se miden con un voltímetro, que se conecta en paralelo con el componente en cuestión.
- En una conexión en serie las diferencias de potencial que caen en los componentes pueden ser diferentes.
- En una conexión en paralelo la diferencia de potencial que cae en cada componente es la misma.

4

La ley de Ohm y la resistencia

4.1. Idea de lo que es una ley en la ciencia

Uno de los principales objetivos de los científicos es intentar establecer relaciones entre diferentes magnitudes. Esto se lleva a cabo observando la influencia de unos objetos o materiales en otros y haciendo medidas de los cambios que se producen en alguna magnitud cuando cambia otra. Si se establece un modelo, el paso siguiente a realizar es sugerir qué clase de relaciones pueden existir y realizar experimentos para probar su validez. Por consiguiente, si hay muchos experimentos diferentes que encajan con las ideas sugeridas, la relación establecida se puede llamar *ley* y suele dársele el nombre del científico que haya trabajado en este área de la ciencia. Una ley es, por tanto, una frase que resume la descripción de un fenómeno que ocurre repetidamente, y se expresa normalmente como una relación entre dos magnitudes bajo ciertas condiciones.

Hay muchas ramas de la ciencia en las que se formulan leyes, como por ejemplo la «ley de Boyle» sobre la presión y el volumen de los gases, las «leyes de Newton» sobre los efectos que producen las fuerzas en los objetos, la «ley de Graham» sobre la relación entre la densidad y la velocidad de difusión de los gases, la «ley de Mendel» sobre herencia genética, las «leyes de Faraday», que describen los cambios químicos que se producen en los líquidos cuando son atravesados por una corriente eléctrica, etc. Además, las leyes no sólo suelen describir *cualitativamente* las relaciones (por ejemplo, que la presión de un gas aumenta cuando éste se calienta), sino que también lo hacen *cuantitativamente* (que la presión aumenta

en $1/273$ del valor que tiene a 0°C por cada grado de aumento de temperatura).

4.2. La ley de Ohm. Corriente eléctrica y diferencia de potencial

La primera ley que hemos tratado ha sido la ley de Kirchhoff (Ap. 2.3), que decía simplemente que la corriente total que entra en un nudo es igual a la que sale del mismo. La segunda ley que vamos a utilizar es la ley de Ohm, que se refiere a la corriente que pasa por un conductor, como consecuencia de aplicarle una diferencia de potencial (o voltaje).

El circuito elemental de la figura 4.1 puede servir para analizar cómo la corriente que pasa por el conductor X depende de la diferencia de potencial aplicada.

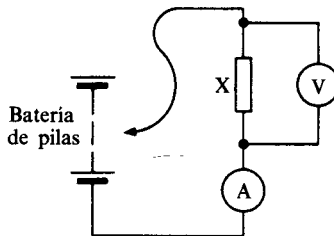


Figura 4.1.—Medición de corriente y de diferencia de potencial.

Colocamos distinto número de pilas de igual valor en serie cada vez; con el amperímetro medimos la corriente eléctrica que pasa y con el voltímetro obtenemos las diferentes medidas de voltaje o diferencia de potencial. (Recordemos lo que se mencionó en los apartados 1.8 y 3.8 sobre las características de los amperímetros y de los voltímetros. En los capítulos 6 y 9 se volverá a tratar este tema.)

Si el conductor anterior es un cable de hierro, los resultados pueden ser los siguientes:

| | | | | | | | |
|--------------------------------------|---|------|------|------|------|------|------|
| Diferencia de potencial (en voltios) | 0 | 1,5 | 3,0 | 4,5 | 6,0 | 7,5 | 9,0 |
| Corriente eléctrica (en amperios) | 0 | 0,19 | 0,38 | 0,56 | 0,85 | 0,94 | 1,05 |

En la figura 4.2 se representan estos resultados gráficamente.

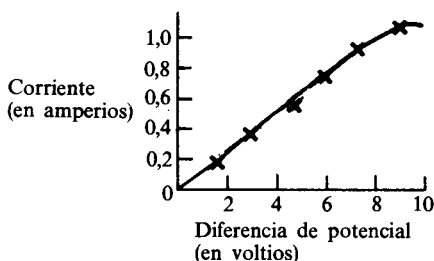


Figura 4.2.—Relación de la corriente eléctrica con la diferencia de potencial.

La característica que más salta a la vista en este gráfico es que, salvo el último punto, los demás forman una línea recta casi perfecta que pasa por (0,0), el origen de coordenadas del gráfico.

Se demuestra que con otros conductores diferentes se da un comportamiento similar, incluso en la deformación de la línea recta cuando la corriente se hace elevada. Más adelante veremos que los conductores se calientan al aumentar la corriente que pasa por ellos (Cap. 8), lo que altera sus propiedades eléctricas (Cap. 5). Se deduce, por tanto, que hay una relación simple entre la corriente y la diferencia de potencial, siempre que el conductor no se caliente. Este fenómeno se describe en la *ley de Ohm*:

La corriente que pasa por un conductor que se mantiene a temperatura constante es directamente proporcional a la diferencia de potencial que hay entre sus extremos.

Por directamente proporcional se entiende que cuando la diferencia de potencial aumenta al doble, también aumenta al doble la intensidad, y cuando la diferencia de potencial aumenta al triple, también aumenta al triple la intensidad. Esto implica una relación constante entre la corriente y la tensión, lo que da lugar a una línea recta que pasa por el origen, como la de la figura 4.2.

4.3. Gráficas de corriente y tensión

Estrictamente hablando, sólo son los materiales conductores los que se comportan de acuerdo con la gráfica de la figura 4.2, que sigue la ley de Ohm. Normalmente son conductores metálicos, entre otros, el hierro, el cobre o aleaciones de metales como el bronce. En la figura 4.3 se representan algunas gráficas típicas correspondientes a varios objetos o componentes.

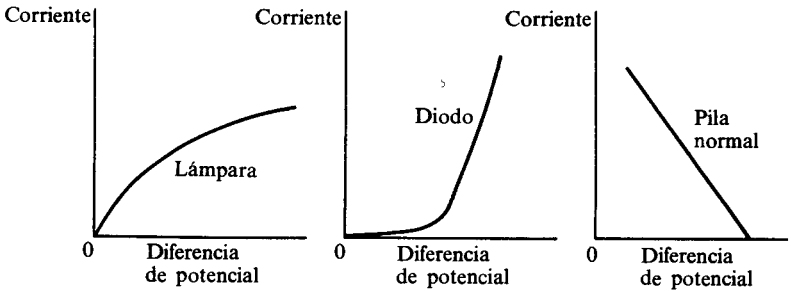


Figura 4.3.—Gráficas de conducción para varios elementos.

4.4. Limitaciones de la ley de Ohm

Hay muchos materiales que no siguen la ley de Ohm. De hecho, sólo funciona, probablemente, para los metales, y sólo bajo ciertas condiciones (temperatura constante, por ejemplo). Sin embargo, es una ley muy útil que puede describir muchas situaciones reales de manera aproximada. Hay una amplia variedad de materiales y de componentes que siguen la ley de Ohm, por lo menos en parte.

Muchas leyes de la física encuentran limitaciones al aplicarlas en la práctica, no sólo la ley de Ohm. Hay veces que la ciencia da un avance cuando se descubre que una ley que se creía cierta no se puede aplicar en ciertas situaciones o bajo condiciones diferentes de las establecidas. Por ejemplo, los materiales elásticos siguen la ley de Hooke hasta que son estirados demasiado, y un filamento de una bombilla sigue la ley de Ohm hasta que empieza a calentarse. Tales limitaciones no invalidan las leyes, sino que reflejan simplemente las circunstancias bajo las cuales fueron descubiertas

estas leyes o formuladas, y definen las condiciones bajo las cuales son válidas y dan resultados prácticos.

4.5. La idea de resistencia

De igual forma que se emplea la palabra «corriente» para describir el flujo eléctrico a través de los conductores, se emplea la palabra *resistencia* para hacer referencia a la oposición que ofrecen los componentes eléctricos al paso de corriente a través de ellos. La idea básica del movimiento de electrones en un circuito puede ser comparada con los movimientos de agua, de coches o de gente (Ap. 1.3), y es normal que las tuberías, las carreteras o los pasillos se opongan de variadas formas al movimiento. El agua pasa mejor por tuberías anchas que por las estrechas, los coches circulan mejor por autopistas que por caminos vecinales y las personas caminan mejor por las calles que por los pasillos estrechos. También se utiliza la *conductividad*, como descripción de la facilidad que tiene un material para permitir el movimiento a través de él, y así se dice que el cobre tiene una conductividad mayor que la madera o que el plástico, tanto eléctrica como térmica.

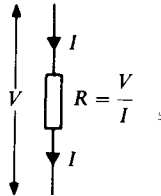
Los conductores que permiten la circulación de corriente fácilmente tienen una resistencia baja, y los que presentan una oposición fuerte al paso de corriente tienen una resistencia alta. Algunos problemas relacionados con la resistencia, utilizando los símiles anteriores, serían qué tramos de carretera se deberían ampliar, qué tamaño de tuberías sería el óptimo en un sistema de calefacción central, o qué anchura deberían tener las salidas de incendios de los edificios.

4.6. Resistencia eléctrica. El ohmio

Para todos los conductores eléctricos, la razón entre la diferencia de potencial y la corriente se denomina *resistencia*.

$$\text{Resistencia} = \frac{\text{Diferencia de potencial}}{\text{Corriente eléctrica}}$$

La letra R se utiliza para indicar la resistencia, y se mide en ohmios (el nombre proviene del científico alemán Georg Simon Ohm, 1789-1854), cuyo símbolo es Ω (omega mayúscula, la última letra del alfabeto griego). Como hemos visto ya el voltio como unidad de diferencia de potencial, y el amperio como unidad de la intensidad eléctrica, podemos establecer la relación siguiente:



$$1 \text{ ohmio} = \frac{1 \text{ voltio}}{1 \text{ amperio}} \quad \text{o bien, } 1 \text{ voltio/amperio}$$

Esta expresión quiere decir que un conductor tiene una resistencia de 1Ω si cuando se le aplica una diferencia de potencial de 1 V circula por él una corriente eléctrica de 1 A .

(Un voltio por amperio «es» un ohmio porque hemos decidido llamarlo así, es decir, no se trata de una cuestión científica complicada, simplemente se le da un nombre a esa razón, igual que se ha hecho al definir el amperio y el voltio.)

4.7. Resistencia de algunos aparatos y elementos

Como ocurre con la corriente eléctrica y con el voltaje, hay una gran variedad de magnitud de resistencias que se utiliza en la actualidad. Para representar los valores de resistencias mayores y más pequeños que el ohmio, se añaden los prefijos típicos de múltiplos y submúltiplos al símbolo Ω . Las resistencias pequeñas no se utilizan normalmente en aplicaciones domésticas, por lo cual las unidades $\text{m}\Omega$ y $\mu\Omega$ no se emplean en estos casos, pero sí son frecuentes los $\text{k}\Omega$ y $\text{M}\Omega$, especialmente en radio, televisión y otros aparatos electrónicos. En la tabla 4.1 se pueden ver algunos valores típicos.

TABLA 4.1

| | | | |
|-----------------------|---------------|-------------|-----------------------------------|
| Filamento de bombilla | 5 Ω | Lápiz | 20 Ω |
| Lámpara de 100 W | 625 Ω | Amperímetro | 0,01 Ω |
| Plancha | 80 Ω | Voltímetro | 10 k Ω |
| Calentador de agua | 19 Ω | Altavoz | 8 Ω |
| Diodo (resist. dir.) | 10 Ω | Resistencia | de casi todos |
| (resist. inv.) | 50 M Ω | (como | los valores desde |
| | | componente) | 0,1 Ω hasta 100 M Ω |

4.8. Cálculo de la resistencia

Con una relación tan simple que liga la corriente eléctrica, el voltaje y la resistencia, es fácil obtener una de las tres magnitudes si se conocen las otras dos. Teniendo en cuenta la definición básica de resistencia (Ap. 4.6), podemos escribir lo siguiente:

$$R = \frac{V}{I}, \text{ o bien, } V = I \times R, \text{ o bien, } I = \frac{V}{R}$$

y podemos utilizar cualquiera de estas expresiones dependiendo de lo que necesitemos calcular.

Por ejemplo, si $V = 100$ V e $I = 4$ A, utilizando $R = V/I$ obtenemos:

$$R = \frac{100}{4} = 25 \Omega$$

De igual forma, si tenemos $I = 3$ A y $R = 5 \Omega$, utilizando $V = I \times R$ obtenemos:

$$V = 3 \times 5 = 15 \text{ V}$$

De forma similar, si tenemos $V = 12$ V y $R = 3 \Omega$, utilizando $I = V/R$ obtenemos:

$$I = \frac{12}{3} = 4 \text{ A}$$

Hay que tener cuidado con las cantidades expresadas con múltiplos o submúltiplos de unidades (por ejemplo, kV, mA o MΩ), dado que el utilizarlos indebidamente puede dar origen a resultados erróneos.

Por ejemplo, si $V = 5 \text{ kV}$ y $R = 2 \text{ M}\Omega$, utilizando $I = V/R$ se obtiene:

$$I = \frac{5 \times 1.000}{2 \times 1.000.000} = \frac{2,5}{1.000} \text{ A} = 2,5 \text{ mA}$$

El lector puede hallar los valores que faltan en la tabla 4.2.

TABLA 4.2

| Corriente (I) | Diferencia de potencial (V) | Resistencia (R) |
|-------------------|---------------------------------|---------------------|
| 2 A | 6 V | |
| 10 A | 240 V | |
| 3 A | | 6 Ω |
| 0,1 A | | 150 ΩM |
| | 12 V | 3 ΩM |
| | 220 V | 55 Ω |
| 12 mA | 120 V | |
| 2 mA | | 100 Ω |
| | 5 kV | 100 Ω |
| 75 mA | 150 kV | |
| 100 mA | | 33 kΩ |
| | 2 kV | 0,5 MΩ |

4.9. Resistencias

Normalmente es necesario que los aparatos funcionen con unos voltajes y unas corrientes eléctricas determinados cuando se conectan a los circuitos eléctricos. Esto se consigue utilizando unos componentes llamados *resistencias*, que son elementos fabricados para dar unos valores de resistencia determinados. Una resistencia es un componente de circuito formado por un hilo metálico recubierto con un aislante, o por carbón y una capa cerámica de forma cilín-

drica, o por una fina película de óxido. En cada terminal de la resistencia hay un hilo conductor para poder conectarla en los circuitos (Fig. 4.4).

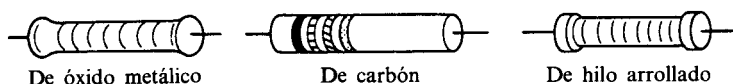




Figura 4.4.—Tipos de resistencias.

En trabajos de alta precisión se utiliza la resistencia de hilo arrollado, que es relativamente cara; la resistencia de óxido metálico es más barata pero de valores menos precisos. Las resistencias de carbón son las más utilizadas en aplicaciones que no requieren una precisión elevada.

Ya vimos en el apartado 4.2 el símbolo de la resistencia ; el símbolo de una resistencia cuyo valor se puede variar (por ejemplo, el control de volumen de una radio) es indicado así: .

4.10. Valores preferidos de resistencias

En muchas aplicaciones no es necesario que el valor de la resistencia colocada sea muy preciso, considerándose que una tolerancia de un ± 20 por 100 del valor prefijado ofrece una precisión suficientemente buena. Por tanto, los fabricantes sólo necesitan producir una cierta gama de valores, de forma que los intervalos existentes entre ellos cubran el 20 por 100 por cada lado. En la siguiente serie de valores desde 10 hasta 100 se dan todos los valores intermedios que puede haber si cada uno puede variar en un 20 por 100, de forma que no haya solapes de valores:

10 15 22 33 47 68 100

(por ejemplo, $15 + 20\% = 18$ y $22 - 20\% = 17,6$, con lo cual los valores solapan el 20 por 100 de precisión).

De forma similar, para una tolerancia del ± 10 por 100, la serie de valores necesarios entre 10 y 100 será (esta serie incluye a la anterior):

10 12 15 18 22 27 33 39 47 56 68 82 100

Estos valores se conocen como *valores preferidos* de resistencias con el 10 y el 20 por 100 de tolerancia. También es posible disponer de una serie de valores para un 5 por 100 de tolerancia.

Con múltiplos y submúltiplos de valores preferidos se puede cubrir toda la gama necesaria, por ejemplo: 330 Ω , 4,7 Ω , 2,2 M Ω .

4.11. Código de colores para las resistencias

A veces viene impreso con números el valor de la resistencia en la misma, por ejemplo, pone 6,8 k refiriéndose a 6,8 k Ω , pero lo más normal es utilizar tres o cuatro anillos de colores según el código de la tabla 4.3.

TABLA 4.3

| | | | | |
|-----------|---|----------|---|-------------------|
| Negro: | 0 | Verde: | 5 | |
| Marrón: | 1 | Azul: | 6 | Plata: $\pm 10\%$ |
| Rojo: | 2 | Violeta: | 7 | Oro: $\pm 5\%$ |
| Naranja: | 3 | Gris: | 8 | |
| Amarillo: | 4 | Blanco: | 9 | |

Se utilizan tres colores para indicar el valor de la resistencia: el primero y el segundo indican los números que componen el valor elegido de la serie preferida, el tercero indica el número de ceros que hay que añadir a los dos números anteriores. El cuarto color, plata u oro, representa la tolerancia de fabricación de la resistencia, del 10 o del 15 por 100 (Fig. 4.5). Si el cuarto anillo no aparece, la tolerancia es del 20 por 100.

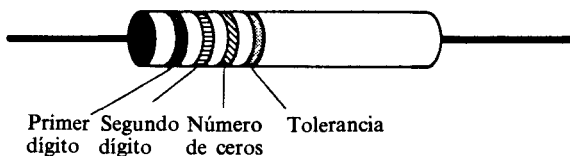


Figura 4.5.—Código de resistencias.

Por tanto, la secuencia de colores marrón, verde, rojo (1, 5, 2) y plata, quiere decir que la resistencia es de 1.500 Ω con un 10 por 100

de tolerancia, o de 1,5 k Ω . De igual forma, amarillo, violeta, naranja indica 47.000 Ω o 47 k Ω , con un 20 por 100 de tolerancia. El lector puede calcular los valores indicados por las siguientes secuencias de colores:

| | | | | |
|----------|---------|----------|-------|--|
| Azul | Gris | Marrón | Oro | |
| Naranja | Blanco | Rojo | Plata | |
| Rojo | Rojo | Verde | | |
| Marrón | Negro | Amarillo | | |
| Verde | Azul | Negro | Oro | |
| Gris | Rojo | Naranja | Plata | |
| Amarillo | Violeta | Verde | | |
| Naranja | Naranja | Naranja | | |

4.12. Resistencia y la ley de Ohm

La gráfica que relaciona la corriente I con el voltaje V aplicado a un conductor (Fig. 4.2) es una línea recta, lo cual demuestra la proporcionalidad directa que existe entre las dos magnitudes (excepto a valores muy elevados cuando el conductor se calienta). Esta línea recta corresponde a una relación entre I y V del tipo $I = gV$, o $hI = V$, donde g y h son valores fijos. En la figura 4.6 se puede ver representado un conjunto de rectas correspondientes a los valores $g = 1/2, 1, 2, 3$. Siempre existirá un valor de g correspondiente a cualquier recta que pase por el punto $(0, 0)$.

Por tanto, la ecuación $IR = V$ da lugar a una línea recta, donde el valor de R indica la inclinación que tiene (pendiente): un valor alto de R da lugar a una pendiente baja, y un valor bajo de R produce una inclinación grande. Por tanto, recordando la definición de resistencia en el apartado 4.5, está claro que la inclinación de la línea recta en la gráfica corriente-voltaje indica la resistencia del conductor.

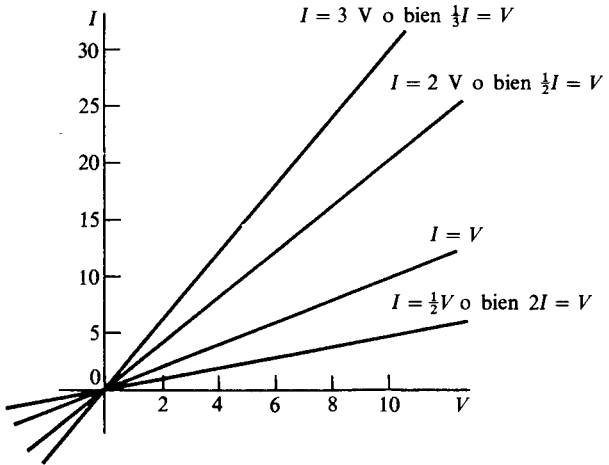


Figura 4.6.—Gráficas de $I = gV$ o de $hI = V$.

Una línea recta que pase por $(0,0)$ tiene la misma pendiente en todos sus puntos, por lo que un conductor que siga la ley de Ohm (es decir, que su gráfica $I - V$ sea una línea recta) tendrá una resistencia constante, la misma en todos sus puntos. Según esto, un trozo de cable tendrá una resistencia de, por ejemplo, 5Ω , siempre que la corriente se encuentre dentro del margen de valores donde la línea correspondiente es recta.

Sin embargo, sabemos que hay elementos que no siguen la ley de Ohm y que su gráfica $I - V$ no es una línea recta como las de la figura 4.6. ¿Cómo se puede aplicar a estos conductores la idea de resistencia eléctrica? Las dos formas que se utilizan con más frecuencia hacen referencia a la pendiente de la línea en cualquier punto de la misma, aunque no se trate de una línea recta. En ambos casos la resistencia del elemento en cuestión se refiere a uno o varios puntos determinados de la gráfica; por tanto, no es un valor constante. Consideremos, por ejemplo, la gráfica corriente-voltaje correspondiente a un filamento de bombilla (Fig. 4.7).

En el punto A , la inclinación de la curva coincide con la que tiene la línea discontinua PQ (llamada tangente a la curva en el punto A) y se puede utilizar para medir la resistencia en un intervalo de corrientes y diferencias de potencial en torno al punto A . La razón entre el voltaje representado por PR y la corriente repre-

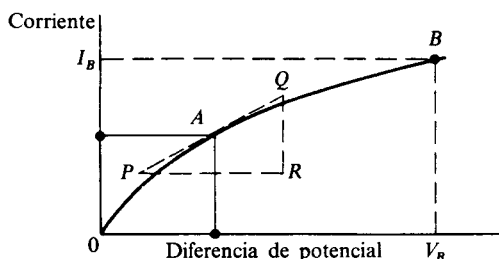


Figura 4.7.—Dos medidas de resistencia en una bombilla.

sentada por RQ da el valor de la resistencia. De igual forma, la resistencia en el punto B será igual al cociente entre la tensión y la corriente que correspondan en ese punto, es decir, V_B/I_B .

Ambas formas de utilizar el concepto de resistencia nos proporciona valores que se miden en ohmios (si V está en voltios e I está en amperios), y cada una da un valor de resistencia que tiene su utilidad. Si, por ejemplo, el conductor se va a utilizar con unos valores de corriente y de voltaje en torno al punto A , el método del gradiente sería el mejor para describir su resistencia. Pero si la bombilla va a funcionar normalmente en el punto B , el valor puntual de resistencia sería el mejor para medirla, con un valor de corriente y de voltaje determinados.

Hay que resaltar que el concepto de resistencia de un conductor como razón entre voltaje y corriente se puede utilizar aunque no siga la ley de Ohm. La ecuación $V = IR$ se puede aplicar en un intervalo de condiciones de funcionamiento, aunque la gráfica $I - V$ no sea una línea recta y no exista una proporcionalidad directa.

4.13. Resistencia y temperatura

Casi todos los conductores experimentan un cambio de resistencia cuando se calientan. El ejemplo más común es el del filamento de una bombilla, que se pone incandescente en funcionamiento normal. Su resistencia es mucho más grande a alta temperatura que cuando está frío. La mayoría de los conductores metálicos presentan este comportamiento. Cuando se enfrían a temperaturas extremadamente bajas (cerca de -273°C) es posible incluso que su resistencia

se haga virtualmente cero. Cuando ocurre esto los materiales se denominan *superconductores* y pueden conducir una corriente eléctrica sin desprender calor.

Los *semiconductores* como el silicio o el germanio, por otra parte, se comportan de forma contraria; es decir, su resistencia disminuye cuando se calientan, y en una proporción mucho más grande que en el caso de los metales. Esta propiedad se puede utilizar, por ejemplo, en alarmas de incendios electrónicas, pero también puede provocar que se destruya un diodo o un transistor: si el diodo disminuye, su resistencia puede circular más corriente, lo cual provoca un calentamiento; esto disminuye más la resistencia, pudiendo pasar más corriente todavía, con el consiguiente calentamiento adicional, y así hasta que se destruya. Este calentamiento incontrolado se debe evitar al diseñar equipos electrónicos.

4.14. Resistencias en serie

En una conexión en serie circula la misma corriente por todas las resistencias (Ap. 2.10), pero la diferencia de potencial que cae en cada una de ellas puede ser diferente (Ap. 3.9). A partir de los valores totales de corriente y de voltaje se puede calcular la resistencia efectiva o equivalente de las resistencias R_1 , R_2 y R_3 de la figura 4.8.

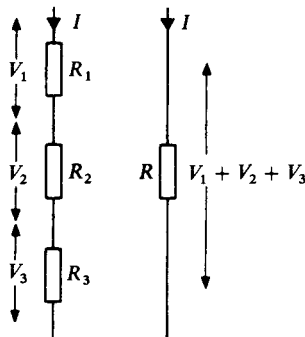


Figura 4.8.—Resistencia equivalente en una conexión en serie.

Puesto que la diferencia de potencial total V debe ser igual a la suma de las diferencias de potencial V_1 , V_2 y V_3 por separado, podemos utilizar la relación $V = IR$ para cada una de ellas:

$$V = V_1 + V_2 + V_3$$

con lo cual obtenemos:

$$IR = IR_1 + IR_2 + IR_3$$

o bien:

$$R = R_1 + R_2 + R_3$$

Por tanto, la resistencia equivalente de un conjunto de resistencias en serie es la suma de las resistencias individuales. Por ejemplo, para tres resistencias en serie de 4, 6 y 12 Ω , la resistencia equivalente es $4 + 6 + 12 = 22 \Omega$. En una conexión en serie la resistencia equivalente es siempre más grande que cualquiera de las resistencias integrantes. (Cuando el agua circula por un conjunto de tuberías estrechas en serie, cada tubería se opone al paso del agua en todo su recorrido.)

4.15. Resistencias en paralelo

En una conexión de resistencias en paralelo (Ap. 3.9) la diferencia de potencial es la misma para todas las resistencias, pero las corrientes pueden ser diferentes (Ap. 2.10). Igual que antes, con los valores de corriente y diferencia de potencial se puede calcular la resistencia R equivalente (Fig. 4.9).

$$I = I_1 + I_2 + I_3$$

con lo cual

$$\frac{V}{R} = \frac{V}{R_1} + \frac{V}{R_2} + \frac{V}{R_3}$$

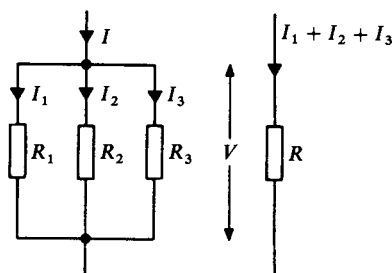


Figura 4.9.—Resistencia equivalente en una conexión en paralelo.

de donde

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

A partir de esta ecuación se puede obtener la resistencia equivalente de un conjunto de resistencias conectadas en paralelo. Por ejemplo, si tenemos tres resistencias de 4, 6 y 12 Ω en paralelo, la resistencia equivalente se puede hallar de la siguiente forma:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{4} + \frac{1}{6} + \frac{1}{12} = \frac{3 + 2 + 1}{12} = \frac{6}{12} = \frac{1}{2}$$

resultando que

$$R = 2 \Omega$$

En este tipo de conexión la resistencia equivalente es siempre menor que cualquiera de las resistencias integrantes por separado. (Si el agua circula por varias tuberías conectadas en paralelo, tiene varios caminos disponibles para pasar y, por tanto, tiene menos oposición que si tiene que pasar por una única tubería.)

Si se conectan sólo dos resistencias en paralelo, la ecuación se puede escribir como su producto dividido por su suma:

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

También se puede utilizar un método gráfico para hallar la resistencia equivalente de dos resistencias en paralelo (Fig. 4.10). En este método la escala horizontal no es importante. Se elige una escala vertical para cada resistencia y se marcan los valores de R_1 y R_2 en los puntos correspondientes A y B , uno a cada lado de la gráfica. Se dibuja entonces una línea desde A hasta el principio de la escala de R_2 y otra desde B hasta el principio de la escala de R_1 . El punto de corte de las líneas AQ y BP indica la resistencia equivalente R , que se puede medir en la escala vertical. (El lector puede convencerse de que la distancia PQ no afecta al cálculo y de por qué funciona este método.)

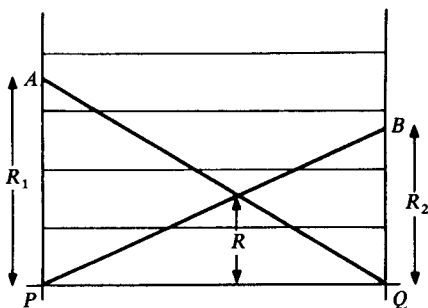


Figura 4.10.—Método gráfico para el caso de dos resistencias en paralelo.

4.16. Redes de resistencias

Los circuitos que contienen conexiones en serie y en paralelo mezcladas se pueden simplificar a una única resistencia equivalente reduciendo paso a paso pequeñas partes de la red. En la figura 4.11 se ilustran varios ejemplos.

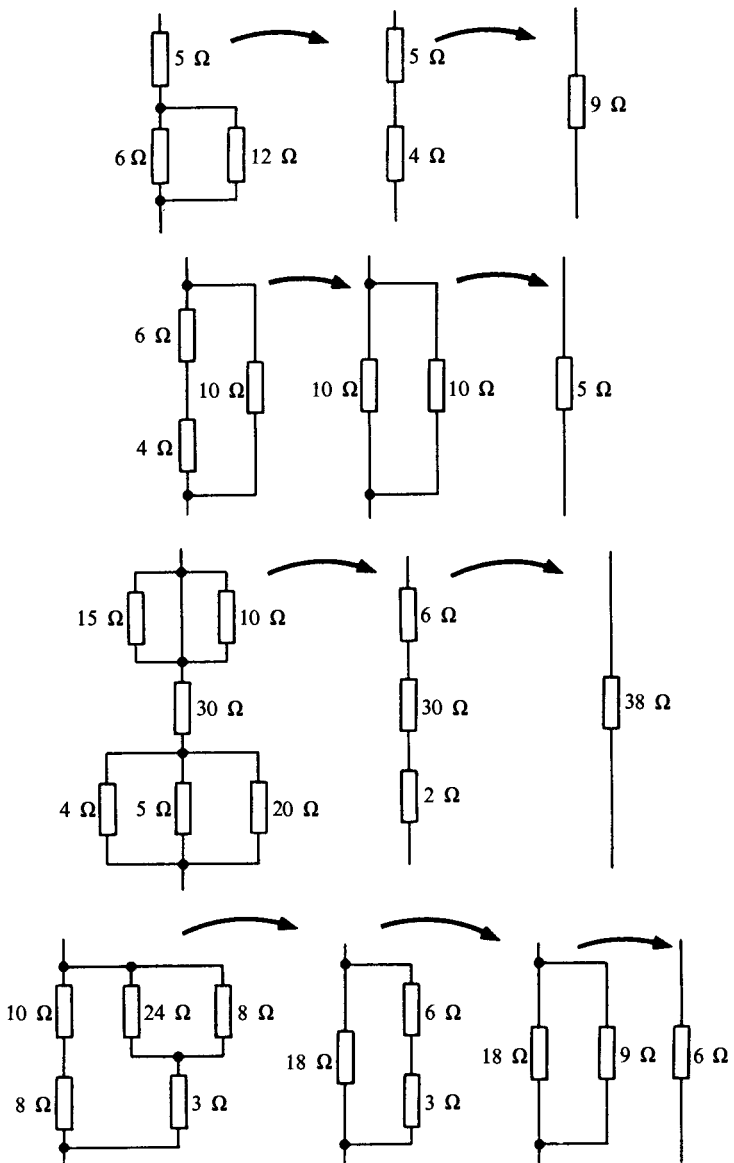


Figura 4.11.—Redes de resistencias.

El lector puede calcular de igual forma las resistencias equivalentes de cada una de las redes de la figura 4.12.

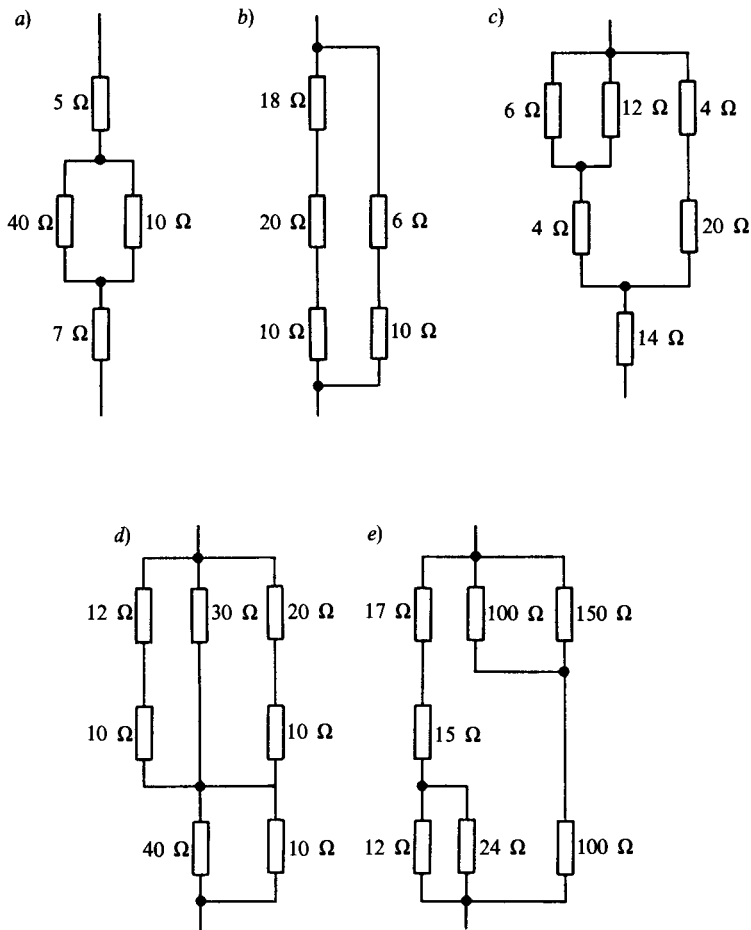


Figura 4.12

4.17. Resistencia en los circuitos de corriente alterna (c.a.)

Como se verá claramente en el capítulo 17, cuando se utiliza corriente alterna hay otros factores aparte de la resistencia que se oponen al paso de corriente: la capacidad y la inductancia, y estos tres efectos forman lo que se denomina *impedancia* al paso de corriente. Es posible, incluso, tener una resistencia negativa. Releyendo los apartados 4.3 y 4.13, podemos pensar en las circunstancias en las cuales sería útil que ocurriera esto.

4.18. Resumen

- Una ley describe la relación que hay entre dos magnitudes bajo ciertas condiciones, establecida por medidas experimentales.
- La ley de Ohm establece que la corriente que pasa por un conductor es directamente proporcional a la diferencia de potencial que cae en él, siempre que la temperatura permanezca constante.
- Hay muchos elementos eléctricos que no siguen la ley de Ohm.
- La resistencia eléctrica se opone al flujo de cargas (corriente) a través de un conductor.
- La resistencia es la razón que hay entre la diferencia de potencial y la corriente y se mide en ohmios.
- Un ohmio es un voltio por amperio:

$$R = \frac{V}{I} \quad , \quad V = IR \quad , \quad I = \frac{V}{R}$$

- Las resistencias se hacen de valores prefijados según sea su precisión y el valor de las mismas se indica según un código de colores.
- La proporcionalidad directa da lugar a una gráfica que es una recta que pasa por el origen de coordenadas.
- La resistencia varía con la temperatura.
- Para resistencias en serie se cumple que $R = R_1 + R_2 + R_3$.
- Para resistencias en paralelo se cumple que $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$.

5

Generación de electricidad

5.1. Pilas primarias

En 1790 Volta descubrió que cuando dos materiales conductores se ponían en contacto a través de un líquido conductor se producía una diferencia de potencial entre ellos. Un trozo de cobre y otro de cinc sumergidos parcialmente en ácido sulfúrico formaban una pila húmeda *primaria*, y una versión más elaborada de la misma desarrollada por Daniell se utilizó mucho en trabajos de laboratorio (Fig. 5.1).

Pronto se descubrió que se podían utilizar otros líquidos o materiales como *electrolito*, así como diferentes metales como el níquel

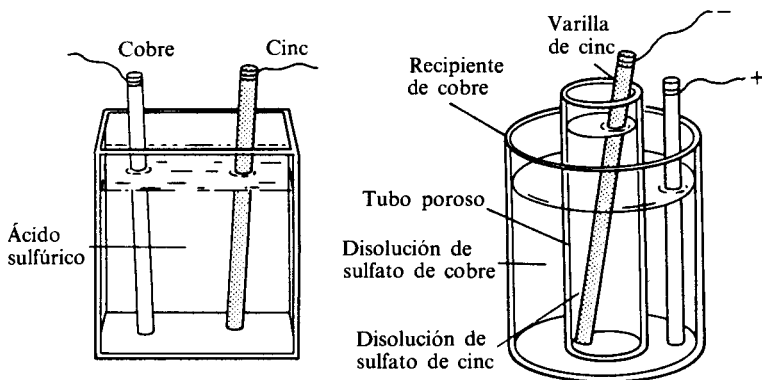


Figura 5.1

y el cadmio, o incluso el carbón, como electrodos. La pila Leclanché se utilizó tanto en forma húmeda como seca, siendo normal aún hoy día en linternas, juguetes, radios de transistores, timbres eléctricos, etc. (Fig. 5.2).

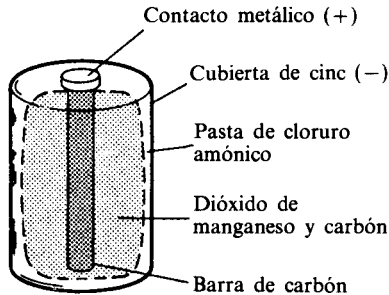


Figura 5.2.—Pila seca Leclanché.

Se han desarrollado también algunas pilas parecidas pero utilizando componentes químicos diferentes, siendo capaces algunas de producir una corriente constante durante períodos de tiempo asombrosamente largos. Algunas pilas se pueden fabricar en tamaños muy pequeños encontrando aplicación en dispositivos como relojes electrónicos, audífonos y marcapasos para el corazón.

5.2. Pilas secundarias (acumuladores)

Mientras que las pilas primarias pueden generar electricidad a partir de las reacciones químicas que tienen lugar entre las sustancias que hay dentro de ellas, las pilas secundarias tienen que ser cargadas por otros medios antes de poder producir corriente eléctrica. El ejemplo más común es la batería de un coche, que tiene acumuladores ácido-plomo y que normalmente se carga por medio de un generador que hay en el coche (Fig. 5.3).

La batería de un coche tiene normalmente seis pilas (acumuladores) conectadas en serie. Cuando la batería está cargada, unas placas se recubren de peróxido de plomo y, junto con otras placas de plomo y el ácido sulfúrico, se genera la diferencia de potencial eléctrico. Cuando la batería funciona, se está descargando y la con-

centración de ácido cambia debido a la creación de agua que tiene lugar, siendo necesario a veces rellenar con agua destilada o libre de iones hasta alcanzar el nivel adecuado. Las reacciones químicas son bastante complejas, pero puesto que son reversibles, este tipo de acumuladores pueden ser recargados repetidas veces y pueden reutilizarse. Los vehículos eléctricos, como los que se utilizan en algunos países para repartir la leche, o las carretillas elevadoras utilizan este tipo de baterías de acumuladores, que tienen que recargarse, generalmente durante la noche, para poder ser utilizados diariamente.

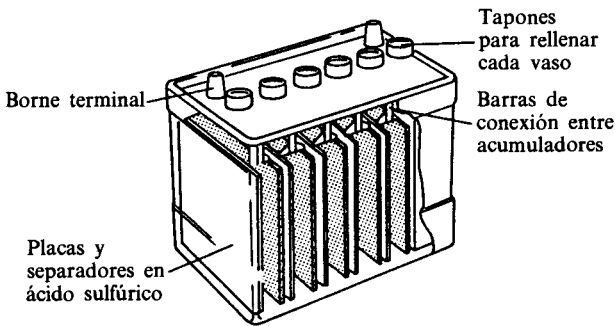


Figura 5.3.—Batería de acumuladores ácido-plomo.

Las pilas recargables más pequeñas, que tienen electrolito de pasta, se han desarrollado para aplicaciones domésticas tales como máquinas de afeitar o linternas, y utilizan distintos materiales como electrodos y como electrolitos.

5.3. Otras formas de generar electricidad

Células solares (células fotovoltaicas): convierten la luz directamente en energía eléctrica. Se utilizan en calculadoras y como fuentes de alimentación en vehículos espaciales, entre otras aplicaciones.

Cristales piezoeléctricos (como, por ejemplo, el cuarzo): producen electricidad cuando son deformados o excitados mecánicamente. Los encendedores del gas, los fonocaptos de tocadiscos de alta fidelidad (hi-fi) y los encendedores de cigarrillos emplean a veces este efecto.

Células de combustible: pueden «encender» combustible de forma que se convierta en electricidad directamente. Las células de hidrógeno-oxígeno se utilizan en vehículos espaciales, donde, además, el agua que se genera como subproducto también se aprovecha.

Dinamos y generadores: generan electricidad a partir de máquinas rotativas tales como las turbinas y los motores de combustión interna. Se utilizan en vehículos de motor y en generación de energía a gran escala en centrales eléctricas (Caps. 11 y 13).

Adaptadores y fuentes de alimentación: son dispositivos que convierten la energía eléctrica que proviene de la red o de la batería de un coche, por ejemplo, en una forma más conveniente para alguna aplicación específica; por ejemplo, alimentar un amplificador u otro equipo electrónico donde se necesitan corrientes y tensiones determinadas (Caps. 11 y 12).

Generadores electrostáticos: pueden producir voltajes extremadamente altos utilizando las cargas generadas por el roce de ciertos materiales con otros. El generador de Van der Graaff es un ejemplo (Cap. 14).

5.4. Fuerza electromotriz (f.e.m.)

Independientemente de la fuente de generación de electricidad que se utilice, el objetivo principal es disponer de algo que pueda mover los electrones por un circuito. Se necesita, por tanto, una «fuerza para mover los electrones», llamada normalmente *fuerza electromotriz*, o *f.e.m.*, y debe ser producida por el generador de electricidad que se utilice. Al igual que la diferencia de potencial, la f.e.m. se mide en voltios. El valor de la f.e.m. generada por cualquier dispositivo depende solamente de cómo se produzca. Cada tipo de fuente de generación de electricidad tiene su f.e.m. característica.

En el apartado 3.3 se definió un voltio como un julio por culombio. Esto quiere decir que si se mueve una carga de un culombio de un lugar a otro y se realiza un julio de trabajo para ello, la diferencia de potencial que hay entre los dos lugares es de un voltio.

Si se realiza un trabajo de dos julios, la diferencia de potencial será de dos voltios (Fig. 5.4).

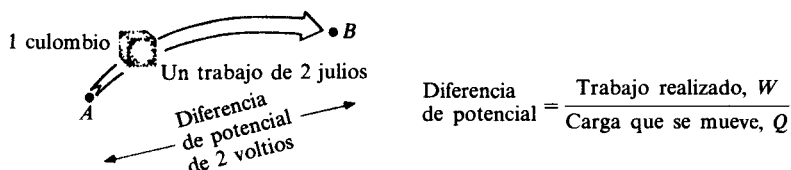


Figura 5.4.—Diferencia de potencial entre dos puntos.

Sin embargo, en el caso de un circuito, las cargas se mueven continuamente por un camino cerrado, pasando a través de la fuente de generación de electricidad misma, independientemente de lo que haya conectado en el circuito. Se necesita, por supuesto, energía para poder realizar este movimiento y es la fuente la que proporciona esta energía. La f.e.m. se define como el trabajo que realiza la fuente por cada culombio que circula por todo el circuito completo (Fig. 5.5).

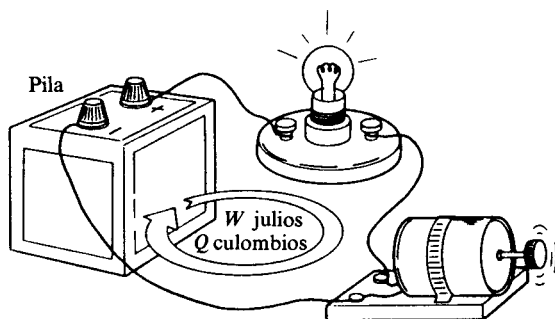


Figura 5.5.—f.e.m. de una batería = W/Q para un circuito completo.

La f.e.m. es el máximo voltaje que puede producir la fuente (aunque como veremos en el apartado 5.5 no se puede disponer normalmente de todo en el exterior). En la tabla 5.1 se indican algunos valores típicos de f.e.m.

TABLA 5.1

| | | | |
|------------------------|-------|--------------------------|----------------------|
| Fonocaptor hi-fi: | 1 mV | Pila seca: | 9 V |
| Pila simple: | 1 V | Batería de coche: | 12 V |
| Célula de combustible: | 1 V | Elemento piezoeléctrico: | 2 kV |
| Pila Daniell: | 1,1 V | Central de generación: | 4,4 kV |
| Pila seca (Leclanché): | 1,5 V | Van der Graaff: | 1 MV |
| Dinamo de bicicleta: | 6 V | Fuente de alimentación: | de 1 V hasta 1 kV |

5.5. Resistencia interna

Aunque la f.e.m. generada por una fuente es de gran importancia para cualquier aplicación, también es importante la corriente que es capaz de entregar. La f.e.m. depende de cómo esté hecha la fuente, pero la corriente depende de la resistencia que haya en el circuito. Se da la circunstancia de que la fuente misma tiene una resistencia, y puesto que la corriente debe pasar por todo el circuito completo incluyendo la fuente, deberá tenerse en cuenta como parte de la resistencia total.

La presencia de resistencia interna en las pilas se demuestra fácilmente. Si se cortocircuita una pila, es decir, se conectan sus terminales directamente con un hilo de cobre fino, los efectos varían sorprendentemente (Fig. 5.6). En el caso de un acumulador plomo-ácido de 2 V, el hilo de cobre se pondrá al rojo vivo y si tiene algún aislante probablemente se quemará. (¡Advertencia!: esto no es bueno para el acumulador.) Si se realiza esta experiencia con una pila seca, aunque tiene una f.e.m. más grande que el acumulador, no se producen efectos visibles en el hilo metálico.

Si se introduce un amperímetro en cada circuito probablemente indicaría 100 A en un caso, pero sólo 1 A en el otro. ¿Por qué la corriente del acumulador es mucho más grande que la corriente de la pila seca? La única explicación posible es que la resistencia que hay en el circuito es mucho más pequeña; es decir, que el acumulador plomo-ácido tiene una resistencia interna muy baja (aproximadamente $1/50 \Omega$) comparada con la resistencia de la pila seca (aproximadamente 10Ω).

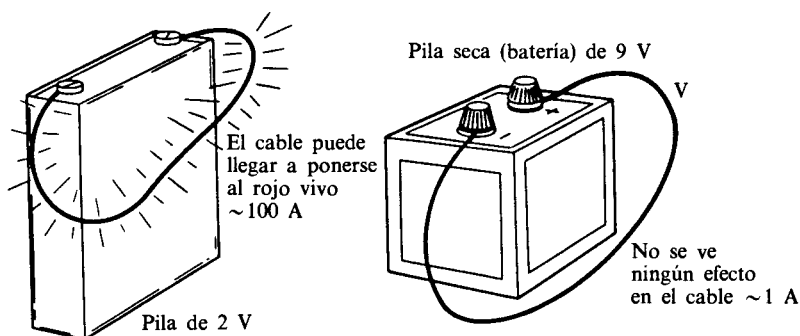


Figura 5.6.—La resistencia interna reduce la corriente.

El valor de la resistencia interna de una fuente es importante para poder determinar el valor de la corriente que puede producir. Claramente, la elección de una fuente puede depender mucho de la corriente que se necesite, tanto como de la f.e.m. La comodidad y la seguridad son factores que también pueden influir, por supuesto, pero en el caso de las baterías de los coches no hay casi posibles opciones; las pilas secas se utilizan a veces en equipos electrónicos, aunque las fuentes de alimentación son más económicas. Una resistencia interna considerable es una característica útil para evitar daños si se cortocircuita la fuente accidentalmente. Generalmente las pilas secas grandes tienen una resistencia interna menor que las pequeñas para el mismo voltaje.

5.6. Diferencia de potencial entre terminales y f.e.m. La ley de Ohm en circuitos completos

Cualquier fuente de electricidad tiene dos características que interesan al usuario: la f.e.m. (E) y la resistencia interna (r), las cuales se localizan entre sus dos terminales.

La fuente puede ceder una corriente (I) a una resistencia externa (R). La diferencia de potencial (V) que hay entre los terminales de la fuente es la que «ve» el circuito externo (Fig. 5.7). La fuente tiene, sin embargo, una f.e.m. que hace pasar la corriente a través de las resistencias interna y externa y debe producir el trabajo ne-

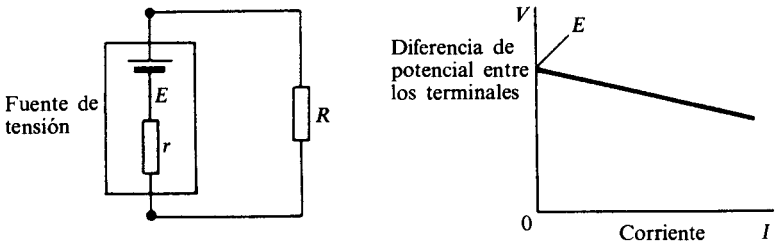


Figura 5.7.—Diferencia de potencial entre terminales y f.e.m.

cesario para que cada culombio pueda pasar a través de R y r . Por tanto, su f.e.m. se puede escribir como la suma de dos voltajes:

$$E = IR + Ir \quad (1)$$

Para la resistencia externa tenemos que $V = IR$, con lo cual

$$E = V + Ir$$

donde V es la diferencia de potencial que cae en R (y entre los terminales de la pila), resultando que

$$V = E - Ir \quad (2)$$

Las ecuaciones (1) y (2) representan la relación que existe entre las magnitudes I y V en función de las propiedades de la fuente, que vienen dadas por E y r . Lo primero que se deduce de la segunda ecuación es que V es siempre menor que E cuando la fuente está cediendo una corriente, siempre que exista una resistencia interna r . Si r permanece constante (lo cual es aproximadamente verdad para pilas secas y fuentes de alimentación) se puede representar en un gráfico la relación entre V e I , siendo iguales V y E cuando no está circulando corriente (Fig. 5.7).

Si la fuente no tiene resistencia interna (o es despreciable), es decir, que r es cero en la práctica, entonces $V = E$ para cualquier valor de I . Los acumuladores tienen una resistencia interna muy pequeña y, por tanto, se puede considerar que mantienen una dife-

rencia de potencial fija, virtualmente coincidiendo con su f.e.m. Sin embargo, se debe tener cuidado con ellos, pues pueden producirse corrientes muy altas si tiene lugar un cortocircuito, siendo esto muy peligroso.

5.7. Pilas en serie y en paralelo

Conexión en serie. Frecuentemente se conectan pilas en serie formando baterías (por ejemplo, seis pilas secas de 1,5 V forman una batería de 9 V) o se utilizan de forma separada pero en serie una detrás de otra en linternas o radios de transistores para obtener el voltaje deseado. Como se podría esperar, la f.e.m. y la resistencia interna resultantes son la suma de las que tienen por separado las pilas (Fig. 5.8).

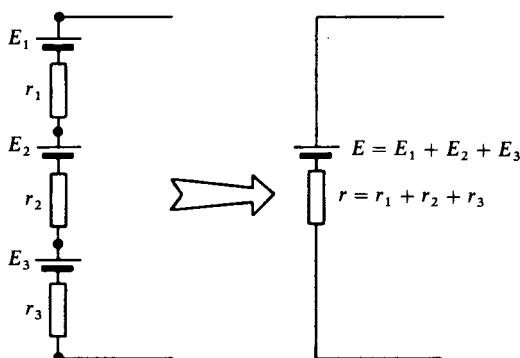


Figura 5.8.—Pilas en serie.

Puesto que la f.e.m. y la resistencia interna aumentan, la corriente también aumenta de valor, pero no proporcionalmente al número de pilas. (Esto se puede comprobar en un caso simple utilizando la fórmula $E = IR + Ir$ con $E = 2$ V, $r = 2$ Ω , $R = 5$ Ω , y después con tres pilas utilizando los valores $E = 6$ V, $r = 6$ Ω y $R = 5$ Ω .) La principal ventaja de conectar pilas en serie consiste en que se puede igualar la resistencia interna con la resistencia externa; cuando ocurre esto hay una transferencia máxima de potencia (Cap. 8).

Conexión en paralelo. Sólo se deben conectar en paralelo fuentes con f.e.m. igual, puesto que no debe haber circulación de corriente entre distintos puntos de las mismas. En este caso, la f.e.m. del conjunto permanece invariable, pero la resistencia interna se reduce, como se indica en la figura 5.9.

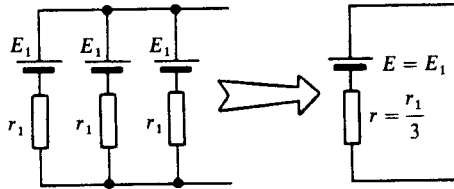


Figura 5.9.—Pilas en paralelo.

5.8. Resumen

- Las pilas primarias producen energía eléctrica a partir de reacciones químicas que tienen lugar dentro de ellas, mientras que las pilas secundarias deben ser cargadas antes.
- Otras fuentes de energía eléctrica son: células solares, cristales piezoeléctricos, células de combustible, generadores, fuentes de alimentación, generadores termoeléctricos y electrostáticos.
- Las fuentes de energía eléctrica tienen f.e.m. y resistencia interna.
- En un circuito completo se cumple que $E = IR + Ir$ y $V = E - Ir$.
- En una conexión en serie de pilas se cumple que f.e.m. = $E_1 + E_2 + E_3$, y resistencia interna = $r_1 + r_2 + r_3$.
- Para n pilas iguales en paralelo se cumple que f.e.m. = E , y resistencia interna = r/n .

6

Medición de la electricidad

6.1. Amperímetros y voltímetros

En capítulos anteriores hemos visto someramente cómo es necesario el uso de instrumentos de medida para medir e indicar los valores de las corrientes y de las diferencias de potencial: amperímetros y voltímetros, respectivamente. Estos instrumentos son fiables y fáciles de manejar, pero hay que tener cierto cuidado cuando se utilizan, para asegurarse de que no se estropeen por un uso indebido.

Sensibilidad. La cuestión más importante es elegir el instrumento que mejor se adapta a cada aplicación, prestando atención especial a la sensibilidad que se necesita. Un amperímetro, por ejemplo, tiene un valor de corriente límite que pueda medir, y es la que marca el final de su escala. Normalmente este valor está marcado claramente en la escala del aparato. Las corrientes mayores que la máxima pueden dañar las partes móviles que hay dentro del instrumento, o al menos doblar la aguja indicadora.

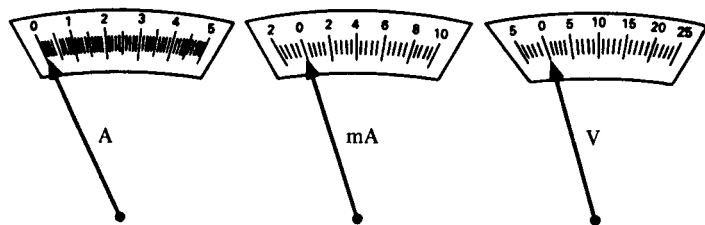


Figura 6.1.—Escala típicas de amperímetros y voltímetros.

Las mismas consideraciones se pueden aplicar a la selección de un voltímetro, o sea, poner atención a su lectura máxima y elegir uno que pueda hacer frente a las diferencias de potencial que se quieren medir. En la figura 6.1 se representan algunas escalas típicas de amperímetros y de voltímetros.

Conexiones (+) y (-). Algunos instrumentos de medida tienen una marca de ajuste de cero que permite indicar una gama pequeña de valores negativos, cuando la corriente o el voltaje están en sentido inverso del supuesto. Pensando en que la corriente sigue el sentido establecido por convenio, se debe conectar al punto de mayor potencial el terminal positivo del aparato de medida. Si las conexiones están realizadas de forma equivocada, la aguja se irá a la izquierda en vez de ir a la derecha, y entonces se deben conectar los cables al revés. Frecuentemente el terminal positivo de los instrumentos de medida es de color rojo o está marcado con un signo (+).

Lectura de la escala. En la figura 6.1 se puede observar que el tamaño de las divisiones de la escala puede variar dependiendo de la gama de valores que puede medir el instrumento. Se debe observar la escala cuidadosamente para asegurarse de la posición exacta de la aguja indicadora entre las marcas numeradas de la escala.

Corriente alterna y corriente continua. Los instrumentos de medida normales están diseñados para ser utilizados con c.c. (corriente continua, *d.c.* en inglés) o con c.a. (corriente alterna, *a.c.* en inglés), pero no con ambas. La marca --- indica corriente continua, mientras que la marca \approx indica corriente alterna. Un instrumento de corriente continua no funciona con corrientes alternas. Algunos instrumentos de corriente alterna responden a las corrientes continuas, pero no indican los valores correctos.

6.2. Resistencia de los amperímetros y de los voltímetros

Cuando se conecta un instrumento de medida tal como un amperímetro o un voltímetro en un circuito, es muy importante que el instrumento mismo no afecte al valor de la corriente o de la dife-

rencia de potencial que se pretende medir. Para explicar esto último, en el caso de un amperímetro, en la figura 6.2 se representa un circuito y se analizan los efectos que se producen al utilizar dos amperímetros diferentes para medir la corriente.

El amperímetro de resistencia más baja sólo ejerce una influencia pequeña en la corriente a medir.

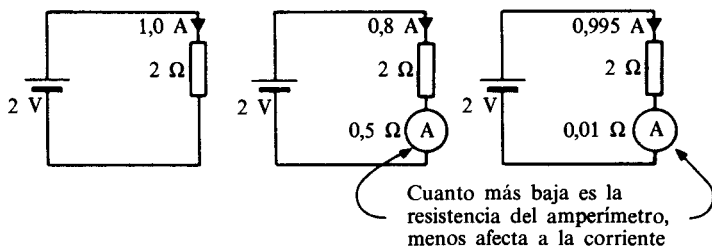


Figura 6.2.—Efecto que produce un amperímetro en la corriente que se va a medir.

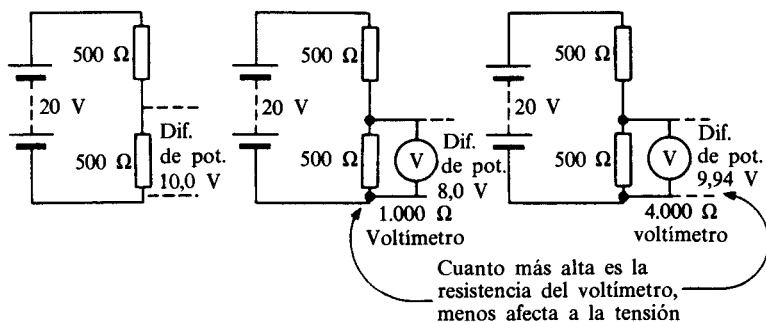


Figura 6.3.—Efecto que produce un voltímetro en la diferencia de potencial que se va a medir.

En la figura 6.3 se representa el caso análogo con un voltímetro.

En este caso, cuanto más alta es la resistencia del voltímetro menor efecto tiene en la diferencia de potencial a medir.

Idealmente, el amperímetro debería tener una resistencia nula, y el voltímetro una resistencia de valor infinito, pero ninguno de estos límites es fácil de obtener. Lo que sí debe ocurrir es que las resistencias sean altas o bajas en comparación con las del circuito en el que se va a conectar el instrumento de medida. Como regla ge-

neral, se puede decir que la resistencia debe ser veinte veces mayor o menor (según el caso) que las del circuito, siendo esto un factor decisivo para elegir el instrumento de medida junto, por supuesto, con la consideración de la gama de valores que es capaz de medir.

6.3. Galvanómetro

La base de casi todos los amperímetros y voltímetros es un instrumento llamado *galvanómetro* (llamado así en honor del científico Luigi Aloisio Galvani, 1737-1798). Se trata de un aparato para detectar el paso de corriente que utiliza el giro de una bobina de hilo metálico, por la cual circula la corriente, y que se encuentra entre los polos de un fuerte imán (véase el capítulo 9). En la figura 6.4 se representa uno de estos instrumentos. En las especificaciones del instrumento de medida se da la gama de valores de la escala, la unidad de corriente (o de voltaje) y su resistencia. Los galvanómetros se pueden fabricar con una variada gama de valores de corriente y de resistencia: de $10\ \Omega$ y $10\ \text{mA}$, de $100\ \Omega$ y $100\ \mu\text{A}$, de $50\ \Omega$ y $1\ \text{mA}$, etc.

La resistencia de un galvanómetro, que se debe principalmente al hilo fino de cobre de su bobina, tiene un valor normalmente que se encuentra entre 10 y $100\ \Omega$. Este valor no es lo suficientemente pequeño ni lo suficientemente grande como para que este aparato pueda utilizarse directamente como amperímetro o como voltímetro. Sin embargo, se puede convertir fácilmente un galvanómetro en cualquiera de estos dos aparatos de medida.

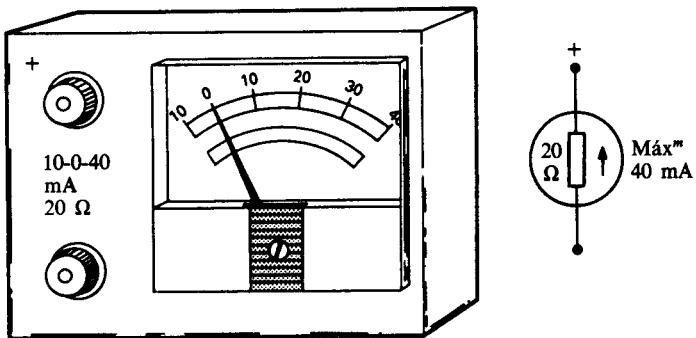


Figura 6.4.—Galvanómetro básico y símbolo del mismo.

6.4. Conversión en amperímetro

Si se tiene un galvanómetro cuya escala es de 40 mA y se quiere adaptar para poder medir hasta 4 A, por ejemplo, se debe hacer pasar la mayor parte de la corriente fuera del aparato a través de un *shunt*, que consiste en una resistencia conectada en paralelo con el aparato. Cuando la corriente es de 4 A, pasa toda por el *shunt*, excepto 40 mA, y la resistencia se elige de forma que se cumplan esas proporciones exactamente. Se comprueba con un simple cálculo que el *shunt* debe tener una resistencia de $0,202 \Omega$. De forma similar se puede elegir la resistencia del *shunt* adecuada para que el galvanómetro tenga cualquier escala que se necesite. Por ejemplo, para que el galvanómetro anterior pudiera medir hasta 400 mA se necesitaría un *shunt* de $2,222 \Omega$. En la figura 6.5 se representa cómo se puede añadir un *shunt* a un galvanómetro básico, y también se indica la disposición eléctrica que esto implica.

Generalmente los fabricantes suministran varios *shunts* para ser colocados en cada galvanómetro, con lo cual se pueden utilizar varias escalas. A veces, para evitar tener que multiplicar por 10, 100, 1.000..., las lecturas en la escala básica del galvanómetro, ya viene provisto de dos escalas en las que se puede leer directamente el valor que indica la aguja. En el galvanómetro de la figura 6.4 se podría poner, por ejemplo, una segunda escala que fuera de 20-0-80 (véase la figura 6.10). Cuando se realiza una medida, es muy importante leer adecuadamente en la escala correspondiente, poniendo los ceros que sean necesarios y fijándose en las subdivisiones que haya.

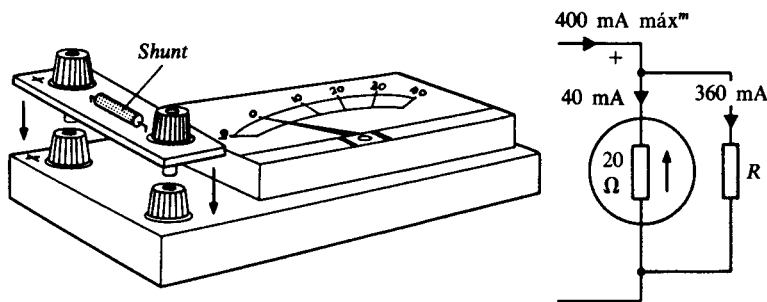


Figura 6.5.—Conversión de un galvanómetro en un amperímetro.

Al utilizar un *shunt* en paralelo con el galvanómetro, disminuye la resistencia total de éste. En el caso del galvanómetro de 20 Ω 40 mA descrito anteriormente, el instrumento convertido tiene una resistencia de 2 Ω , con un *shunt* de 400 mA y una resistencia de 0,2 Ω con el de 4 A. Esta resistencia baja es justamente la que se necesita para un amperímetro.

6.5. Conversión en voltímetro

Si se tiene un galvanómetro con una resistencia de 20 Ω que puede conducir una corriente de sólo 40 mA, podrá medir una diferencia de potencial de hasta $40 \text{ mA} \times 20 \Omega = 800 \text{ mV}$, o 0,8 V (utilizando $V = IR$). Cualquier diferencia de potencial por encima de ésta produciría una corriente mayor que la máxima de 40 mA. Para poder hacer frente a voltajes más altos que 0,8 V, se debe colocar una resistencia en serie con el galvanómetro, llamada *multiplicador*, que pueda limitar la corriente para que no pase de 40 mA. La resistencia del multiplicador se elige en función de la escala de diferencia de potencial que se necesita medir. Por ejemplo, con una de 180 Ω se podría medir con este galvanómetro un voltaje de hasta 8 V, y con una de 1.980 Ω , hasta 80 V. En la figura 6.6 se puede observar cómo hacer una unidad enchufable para convertir el galvanómetro en un voltímetro; también aparece en la figura el esquema eléctrico resultante.

Como en el caso del amperímetro, se debe disponer de varios multiplicadores para poder cambiar de escala. La resistencia del multiplicador está en serie con la del galvanómetro, por lo cual éstas se suman dando lugar a 200 Ω para la escala de 8 V y 2.000 Ω para la escala de 80 V. Se trata de resistencias altas, que son adecuadas para los voltímetros.

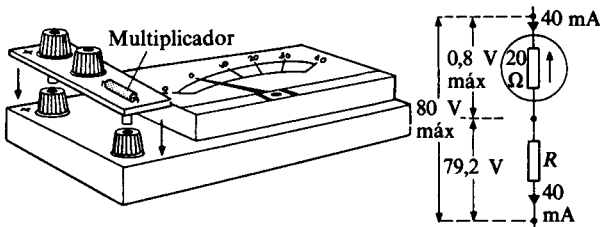


Figura 6.6.—Conversión de un galvanómetro en un voltímetro.

6.6. Ohmímetro

El galvanómetro funciona cuando pasa una corriente eléctrica a través de él. Para medir una magnitud pasiva, como el caso de una resistencia, se debe disponer de una corriente eléctrica que pase por la resistencia y por el galvanómetro (una resistencia alta dará lugar a una corriente baja y una resistencia baja producirá una corriente elevada, por lo cual la escala de medida de resistencias añadida a un galvanómetro irá inevitablemente en sentido contrario). En la figura 6.7 se indica una forma de realizar las conexiones, donde la resistencia a medir se conecta entre X e Y .

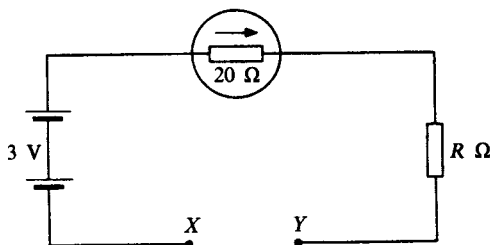


Figura 6.7.—Diseño de un ohmímetro.

Si la resistencia es cero (un hilo de cobre fino, por ejemplo), se juntan los terminales X e Y , y entonces el galvanómetro debe estar protegido para que no se produzca una corriente más grande que la máxima permitida; para este propósito se utiliza la resistencia R . Si la intensidad máxima permitida es de 40 mA, con los valores indicados en la figura 6.7, la resistencia R tendrá un valor de 55 Ω ($E = I(R + 20)$, teniendo cuidado con las unidades). Con una resistencia de valor cero deben pasar por el galvanómetro 40 mA y la aguja marcará el último punto de la escala, con lo cual este punto indicará el cero en la escala de resistencia.

De forma análoga, si X e Y no están unidos, es decir, que la resistencia es infinita, el galvanómetro indicará una corriente nula y su posición deberá corresponder con la marca ∞ (infinito) en la escala de resistencia. Los valores que hay entre 0 e ∞ se deben hallar, yendo de derecha a izquierda. Esta tarea es relativamente fácil si nos fijamos en que en la figura 6.7 la resistencia total de $55 + 20 = 75 \Omega$ provoca una corriente de 40 mA, estando unidos

los terminales X e Y por medio de una resistencia nula. Por tanto, una resistencia adicional de 75Ω conectada entre X e Y reducirá la corriente a la mitad, significando esto que 75Ω en la escala de resistencia caerá justo en la marca de 20 mA de la escala de corriente. De igual forma se pueden obtener las demás divisiones de la escala de resistencia. En la figura 6.8 se representa el resultado de realizar estas operaciones para el caso del circuito anterior. Para obtener medidas por encima de 1.000Ω se necesitaría un galvanómetro más sensible.

Una característica curiosa de la escala de resistencias es que las divisiones no son iguales, no es una escala lineal. De hecho, si no fuera así, nunca sería posible llegar a la marca de ∞ . En la práctica habrá una resistencia variable en serie con R , utilizada para realizar el ajuste del cero, para permitir cambios en la f.e.m. de las pilas.

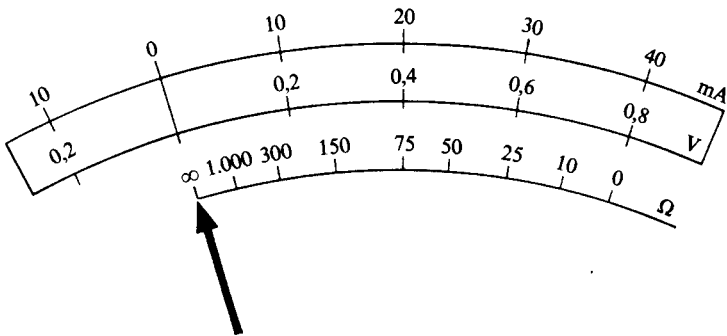
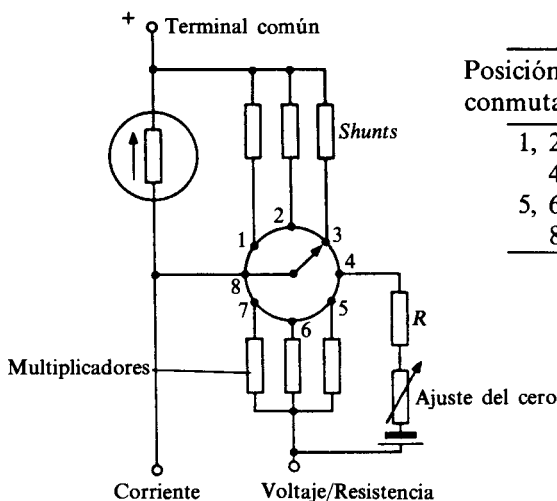


Figura 6.8.—Escala de corriente, de voltaje y de resistencia.

6.7. Multímetros

Los amperímetros, voltímetros y ohmímetros provistos de *shunts* y de multiplicadores adecuados para ofrecer varias escalas tienen mucha flexibilidad de uso y son necesarios cuando se necesita hacer medidas de diferentes magnitudes simultáneamente. Sin embargo, en otras aplicaciones es útil combinar escalas diferentes de corriente y de voltaje, e incluso escalas de resistencia también, en un único instrumento de medida llamado *multímetro* (o polímetro). En la figura 6.9 se representa un diseño sencillo de uno de estos aparatos,

en el cual se utilizan terminales separados para corriente y voltajes/resistencias. El lector puede dibujar la conexiones con el conmutador en las posiciones 2, 4 y 7 para comparar con las figuras 6.5, 6.6 y 6.7.



| Posición del conmutador | Función |
|-------------------------|--------------|
| 1, 2, 3 | Amperímetro |
| 4 | Ohmímetro |
| 5, 6, 7 | Voltímetro |
| 8 | Galvanómetro |

Figura 6.9.—Diseño de un multímetro.

Con una disposición más elaborada se puede realizar un multímetro con sólo dos terminales. Un multímetro comercial puede tener escala de corriente y voltaje continuos, voltaje alterno y resistencia (Fig. 6.10). Para realizar las medidas de corriente alterna el instrumento debe tener un transformador y un rectificador (Cap. 12). Es posible incluir escala de corriente alterna, pero para ello se debe disponer de circuitos y componentes más complicados. Obsérvese el botón de *reset*; se trata de un interruptor automático que salta si circula una corriente demasiado grande por el galvanómetro, lo cual es fácil que ocurra en los multímetros si el conmutador de selección está a la izquierda en una posición errónea cuando ha cambiado la medida a realizar. Es aconsejable poner siempre el conmutador en la posición OFF después de utilizarlo o entre diferentes usos. Otra característica útil de algunos multímetros es que tienen un botón de $\div 2$ que duplica la medida en la escala de corriente

o de diferencia de potencial cuando es pulsado. Se utiliza cuando la aguja señala una medida pequeña, pero demasiado grande para la escala siguiente; entonces, al pulsar este botón se aumenta la precisión de la medida porque el giro de la aguja se hace más grande. Sin embargo, el usuario debe recordar que se debe dividir por dos la medida que se obtenga de esta forma.

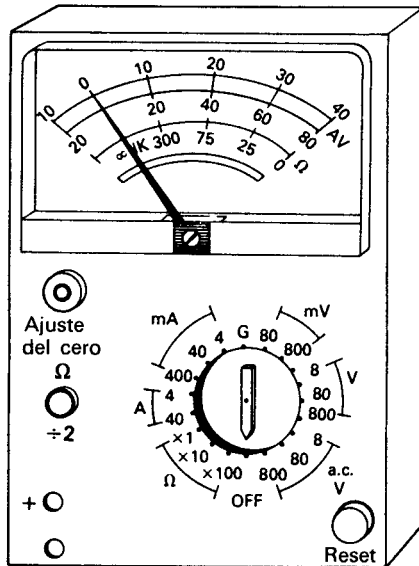


Figura 6.10.—Multímetro comercial.

6.8. Osciloscopio

El osciloscopio es un instrumento muy importante que se puede utilizar en muchas ramas de la electricidad para medir o representar gráficamente distintas magnitudes eléctricas. Este instrumento utiliza un haz de electrones (rayos catódicos) que desprende luz al chocar con una pantalla especialmente recubierta. En la figura 6.11 se representa la estructura de uno de estos instrumentos.

La parte más importante de un osciloscopio es el tubo de rayos catódicos o CRT (siglas inglesas). Dentro del tubo debe existir un alto vacío; los electrones, que provienen de un filamento caliente, se

aceleran dentro del tubo debido a una diferencia de potencial de unos 2.000 V. Dentro del tubo hay un sistema de cilindros y discos con voltajes apropiados, que se encargan de dirigir el haz a un punto de la pantalla y de controlar el número de electrones por segundo que lleva dicho haz. Las placas deflectoras, entre las cuales pasa el haz, se utilizan para mover el punto de la pantalla en dos direcciones (*X* horizontalmente, *Y* verticalmente). Una de estas dos placas se conecta a tierra y se aplica tensión a la otra placa para poder controlar el haz.

La ventaja principal del osciloscopio es que lo único que se mueve en él son los electrones, que pueden responder inmediatamente a los cambios de voltaje en las placas deflectoras. Los electrones se mueven dentro del tubo a una velocidad que es aproximadamente la décima parte de la velocidad de la luz.

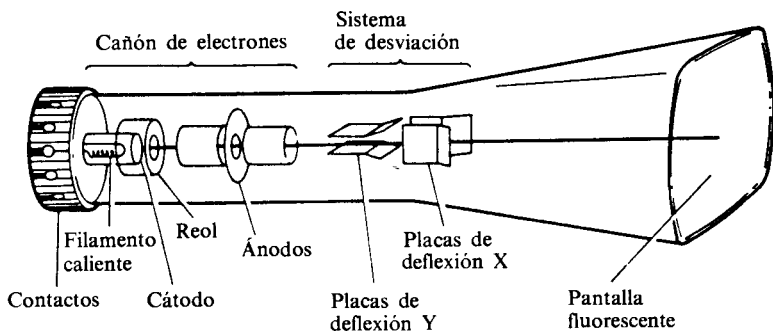


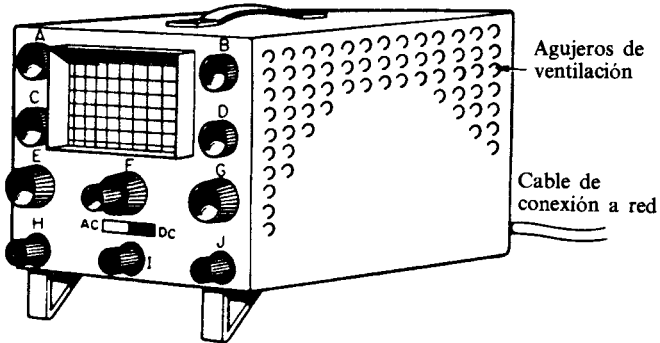
Figura 6.11.—Características de un tubo de rayos catódicos (CRT) de un osciloscopio.

6.9. Preparación del osciloscopio

En la figura 6.12 podemos ver un osciloscopio con los controles dispuestos de la forma en que suelen encontrarse normalmente. Para utilizar un osciloscopio se deben seguir los siguientes pasos:

- enciéndalo y espere unos 20 segundos para que se caliente;
- ajuste el brillo;
- asegúrese de que la base de tiempos está en la posición OFF;
- ajuste los controles de desplazamiento *X* e *Y* para centrar el punto luminoso en la pantalla;

- e) si es necesario, ajuste el control de enfoque para obtener más luminosidad en el punto (es más fácil hacerlo con el brillo mínimo que con el máximo).



A = Brillo; B = Enfoque; C = Desplazamiento Y; D = Desplazamiento X; E = Ganancia Y; F = Base de tiempos; G = Ganancia X; H = Entrada Y; I = Tierra; J = Entrada X.

Figura 6.12.—Aspecto típico de un osciloscopio.

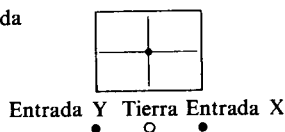
A través de los terminales que vienen marcados se puede aplicar tensión a las placas X e Y. El conmutador a.c./d.c. tiene efecto normalmente sólo sobre la placa Y; es útil para distinguir entre el nivel de voltaje absoluto (d.c.) y las fluctuaciones en torno a un valor fijo (a.c.). En la posición c.a. sólo se pueden ver los «cambios» de voltaje, con lo cual una fluctuación entre 110 V y 90 V aparecería como una variación entre +10 V y -10 V. Los controles de ganancia en X y en Y permiten que las entradas a observar sean de muy diferentes formas y valores. Con el control de posición según X y según Y se puede mover el punto a cualquier parte de la pantalla.

6.10. Efectos que producen las entradas de corriente continua y de corriente alterna

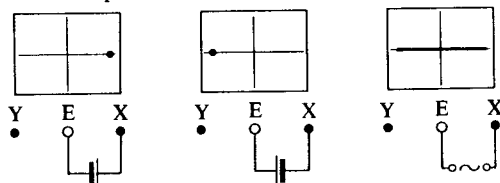
El osciloscopio es un instrumento que funciona controlado por voltaje respondiendo, por tanto, a diferencias de potencial aplicadas a las placas X o a las Y, pero no responde ante corrientes eléctricas, resultando por ello un perfecto voltímetro (Ap. 6.2). En la figura 6.13 se representan los efectos que tienen lugar al aplicar al osciloscopio tensión continua y tensión alterna.

Observemos que el punto de luz forma una línea continua si la frecuencia de la tensión alterna es de algunos hertzios debido al movimiento rápido que realiza a través de la pantalla. La distancia del punto al centro depende de los controles de ganancia X e Y, pero para unas ganancias ajustadas el desplazamiento del punto es proporcional a la tensión aplicada. Con tensión de entrada alterna, la longitud de la línea indica la máxima oscilación de la tensión; por ejemplo, de +5 V a -5 V.

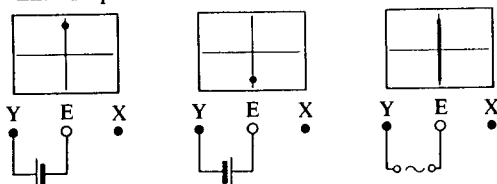
a) Sin entrada



b) Entrada por X



c) Entrada por Y



d) Entrada por X y por Y

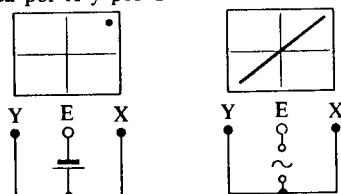
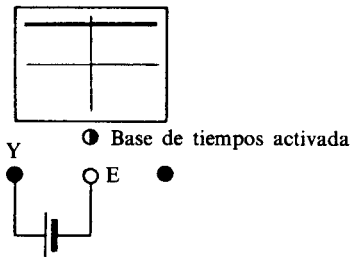


Figura 6.13.—Comportamiento del osciloscopio ante tensiones de entrada alternas y tensiones de entrada continuas. Se pueden ajustar las escalas para convertir las deflexiones directamente en voltajes.

6.11. El control de la base de tiempos

Aunque a veces se utilizan las deflexiones de un punto de luz estacionario, en el uso más común el punto recorre la pantalla de izquierda a derecha de forma continuada, realizando un barrido de cada línea de la pantalla y cambiando de una línea a otra en un breve instante y de forma no apreciable a simple vista. El circuito que controla este tipo de movimiento se llama *base de tiempos* y

a) Tensión continua



b) Tensión alterna con frecuencia de 100 Hz (100 ciclos por segundo)

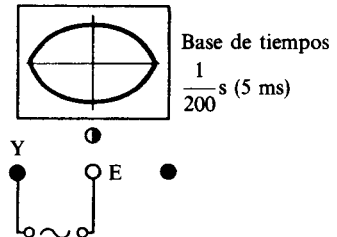
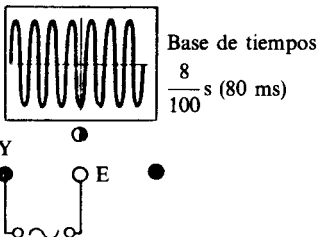
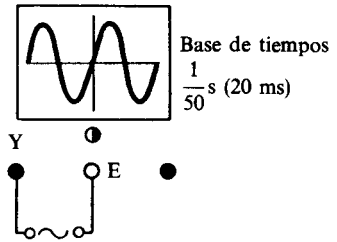
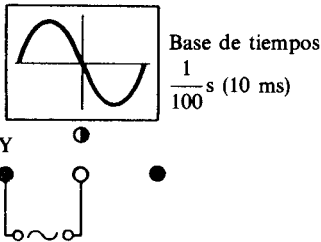


Figura 6.14.—Imágenes de osciloscopio con la base de tiempos aplicada a las placas.

el tiempo que tarda el punto en realizar el barrido de una línea de la pantalla puede variar entre unos 2 segundos y 1/2.000 segundos. Cuando se activa la base de tiempos no se puede aplicar otro voltaje a las placas X.

En la figura 6.14 se representa cómo aparecen las tensiones alternas y continuas en un osciloscopio cuando está activa la base de tiempos. Para obtener una línea constante cuando se utiliza tensión alterna, el tiempo de repetición del circuito de la base de tiempos debe ser ajustado para que esté sincronizado con las repeticiones de la tensión alterna, con el fin de que el punto luminoso recorra la misma línea en cada barrido de la pantalla. ¿En qué circunstancias se obtiene una imagen como la última de la figura 6.14?

6.12. El osciloscopio como voltímetro

Puesto que la deflexión del punto es el efecto que produce un voltaje aplicado a las placas X o Y, el desplazamiento desde la posición cero se puede utilizar para medir el voltaje aplicado. Todo lo que se necesita es saber a qué distancia se mueve el punto para cada voltaje (para 5, 10, 15, 20 V) y tener una escala graduada en la pantalla para convertir la deflexión en voltios. La mayoría de los osciloscopios traen esta calibración de fábrica, por lo cual el control de ganancia Y (Fig. 6.12) tiene una escala de ajuste marcada en voltios por centímetro con múltiplos para realizar el ajuste (por ejemplo, x1, x5, x10, x100, etc.). Con una escala transparente marcada en centímetros y en milímetros, se puede convertir cualquier posición del punto en voltios, con el factor apropiado, que se obtiene mirando la posición del control de ganancia Y. Si el punto se mueve a 4,6 cm, con un factor de x5, la tensión será de $4,6 \times 5 = 23$ V.

Se pueden realizar medidas similares de la tensión alterna utilizando la altura a que se encuentra la línea de la figura 6.14 o la longitud de la línea de la figura 6.13. Con esto se obtiene el valor pico a pico de la tensión que se puede utilizar para calcular el valor eficaz de la misma más utilizado normalmente. (En el capítulo 17 se verá esto con más detalle.)

6.13. Otros usos del osciloscopio

El control de la base de tiempos del osciloscopio se puede utilizar para visualizar los cambios de voltaje y para comparar diferentes voltajes visualmente, especialmente las tensiones alternas. Algunas de estas aplicaciones son las siguientes:

- Comparación de la entrada y de la salida de un amplificador o de un rectificador.
- Examen de la forma de onda de la tensión alterna.
- Visualización de las formas de onda musicales cuando se utiliza un micrófono.
- Exploración de la tensión en diferentes puntos de un aparato electrónico.
- Visualización de ritmos fisiológicos, tales como los del corazón o los del cerebro.

El receptor de televisión también tiene un tipo especial de tubo de rayos catódicos (CRT) en el cual el punto luminoso realiza el barrido de la pantalla en 625 líneas entrelazadas veinticinco veces por segundo. Las señales de televisión que van por el espacio modifican el brillo del haz de electrones para producir una imagen en la pantalla. Para obtener imágenes en color se necesitan tres haces de electrones separados, que inciden en puntos de material fluorescente diferente distribuidos sobre la superficie del tubo; la mezcla de luz de tres colores que se emite produce el efecto equivalente a la emisión de todos los colores.

6.14. Resumen

- El galvanómetro es un indicador de corriente eléctrica.
- El galvanómetro se puede convertir en un amperímetro añadiéndole un *shunt* (una resistencia).
- Un amperímetro debe tener una resistencia pequeña.
- Un voltímetro debe tener una resistencia grande.
- Con un galvanómetro y una pila se puede construir un ohmímetro.
- Los multímetros tienen varias escalas de medida de corriente eléctrica, de voltaje y de resistencia, pudiendo medir en continua y en alterna.
- Con un osciloscopio se pueden medir y visualizar tensiones continuas y alternas.

7

Electromagnetismo

IDEAS BÁSICAS SOBRE MAGNETISMO

7.1. Polos y campos magnéticos

Observando un trozo de material magnético se puede apreciar que es en sus extremos donde se concentran sus efectos, lo que nos conduce a la idea intuitiva de *polos* magnéticos. Cuando se descubrió que un imán suspendido de un hilo se alineaba siempre en la misma dirección, la correspondiente a norte-sur (o muy próxima a ésta), se llamó polos norte y sur a los extremos del mismo. En un principio el nombre fue «polo buscador del norte (o del sur)» (Fig. 7.1a). También se comprobó que los materiales magnéticos unas veces se atraían y otras se repelían entre ellos. De nuevo parecía que los efectos se originaban entre los polos que se encontraban más cerca, y la regla que se estableció para describir este comportamiento fue que «polos iguales se repelen y polos distintos se atraen» (Fig. 7.1b).

Para poder explicar la influencia de un imán sobre otro, aunque no estén en contacto, se ha desarrollado el concepto de *campo magnético*, que es la región del espacio en torno al imán donde se puede notar su efecto. (El concepto de campo es normal en física, así como en magnetismo. Surge cuando se observan efectos a distancia de los elementos que los provocan.) La región de influencia de un imán es donde actúa el campo, en teoría cualquier lugar en torno al imán, pero esta influencia es menor cuanto más lejos del

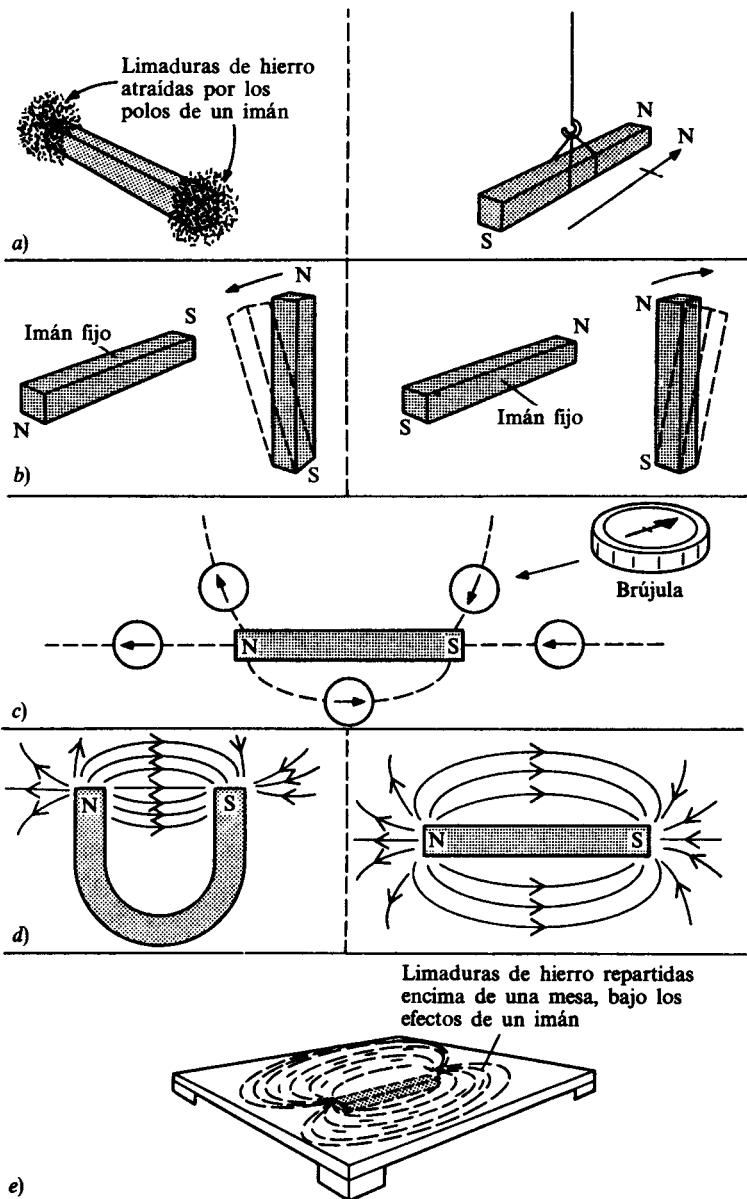


Figura 7.1.—Efectos magnéticos básicos.

mismo se encuentre dicho lugar. Es lógico, por tanto, pensar que el campo magnético tiene una intensidad (tiene una magnitud que se puede medir) y también una dirección, puesto que las fuerzas que se producen son magnitudes direccionales (vectores).

¿Qué aspecto tiene el campo magnético? Imaginemos la pequeña aguja de una brújula situada cerca de un imán. Esté donde esté, su polo norte será atraído por el polo sur del imán, y su polo sur será atraído por el polo norte del imán, colocándose según el efecto de esas atracciones, así como de las repulsiones entre polos iguales (en la figura 7.1c se muestran algunas de estas posiciones). Moviendo la aguja de la brújula por distintos sitios en torno al imán, se puede realizar un dibujo partiendo de la dirección en que se sitúa la aguja en cada punto. El conjunto de líneas que componen este dibujo representa el campo magnético: la proximidad de las líneas da una medida de la intensidad del campo y la dirección de las líneas representa la dirección del campo. Puesto que sólo hay una única dirección en cada punto, las líneas de campo nunca se cruzan ni se tocan. En la figura 7.1d se muestra el dibujo del campo que hay alrededor de un imán recto y de un imán en forma de herradura (en realidad, el campo es tridimensional, por supuesto). Obsérvese que las líneas de campo van desde los polos norte a los polos sur. El campo magnético también se puede «ver» utilizando limaduras de hierro distribuidas sobre una mesa bajo la cual se coloca el imán (Fig. 7.1e).

Entre los múltiples usos de los imanes permanentes se encuentran los siguientes: cerraduras de puertas de armarios, cintas de las puertas de frigoríficos, puntas de destornilladores, imanes de enfoque en tubos de imagen de televisión, motores eléctricos, dinamos de bicicleta, brújulas, altavoces, amperímetros y voltímetros.

La Tierra tiene un campo magnético propio, lo cual explica que la aguja de una brújula se coloque en la dirección norte-sur. La forma de este campo es muy similar a la que produciría un imán recto colocado cerca del centro de la Tierra, pero inclinado un pequeño ángulo con respecto al eje de rotación.

7.2. Combinación de campos

La forma relativamente simple del campo alrededor de un solo imán se complica considerablemente cuando hay más de uno y cuando influye también el campo magnético de la Tierra. En la figura 7.2 se muestran los dibujos de algunos de estos campos. Lo más importante de esto es que en algunos puntos de los campos se refuerzan unos a otros, mientras que en otros se debilitan e incluso se cancelan unos a otros (por ejemplo, en los puntos marcados con una cruz).

7.3. Materiales magnéticos

La roca magnética, la magnetita, es un mineral de hierro, pero de los metales puros sólo se pueden magnetizar el hierro, el cobalto y el níquel. Con aleaciones de estos tres metales con otros, tales como el aluminio o los aceros que contienen diversas cantidades de carbón, se pueden fabricar imanes permanentes muy potentes (sin embargo, el acero inoxidable normalmente no es magnético debido a su contenido en cromo). También se pueden fabricar imanes cerámicos o de caucho, que tienen gran intensidad magnética, pero por lo general una resistencia física pequeña. Todos estos materiales se conocen como *ferromagnéticos* y son afectados fuertemente por los campos magnéticos. Es sorprendente saber que hay otras sustancias, incluso líquidas, que tienen ciertas propiedades magnéticas aunque muy débiles, pero esas propiedades pueden ser importantes en ciertas circunstancias especiales.

Los imanes tienen dos características importantes: la intensidad de su magnetización y el tiempo que dura retenida. En un imán permanente es más importante que retenga el magnetismo cuando se utiliza que su intensidad magnética, mientras que en los electroimanes (Ap. 7.6) y en los transformadores (Cap. 10) lo más importante es la capacidad para conmutar de un estado a otro.

Los imanes cerámicos tienen aplicaciones interesantes debido a su ligereza y a su fuerte magnetización. Se encuentran en forma de barra o en placas rectangulares o con forma de anillo y se pueden magnetizar de formas inesperadas (Fig. 7.3). Incluso es posible que un imán en forma de anillo se magnetice sin aparecer ningún polo. ¿Cómo puede ser magnetizado?

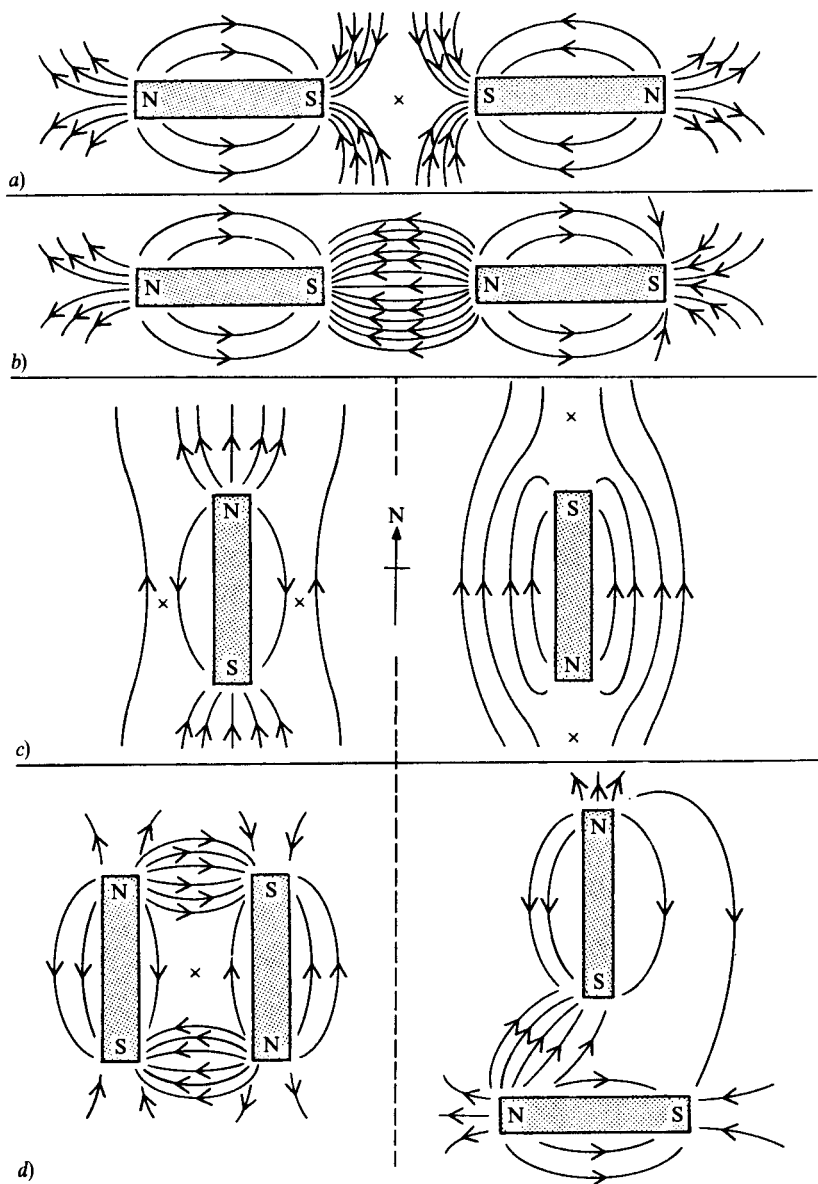


Figura 7.2.—Combinación de campos magnéticos; a), b) y c) con dos imanes; d) entre un imán y la Tierra.

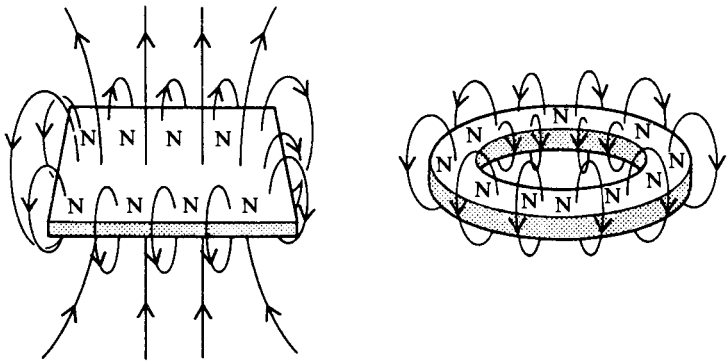


Figura 7.3.—Campos magnéticos cerca de los imanes cerámicos.

CAMPOS Y CORRIENTES

7.4. Campos magnéticos generados por corrientes eléctricas

Se puede comprobar que una corriente eléctrica produce un campo magnético colocando una brújula cerca de un cable por el que pasa una corriente eléctrica. Cuando pasa corriente por el cable, la aguja se desvía de su posición N-S normal. La forma del campo se puede estudiar utilizando una brújula o limaduras de hierro, como se muestra en la figura 7.4.

El dibujo del campo está formado por una serie de círculos concéntricos, la intensidad del campo es más pequeña cuanto más lejos está el punto de la corriente eléctrica. Si cambia el sentido de la corriente, también cambia el sentido del campo magnético. Con una corriente eléctrica de 1 A, por ejemplo, el campo no es muy intenso, pero con corrientes más grandes se pueden generar campos muy intensos.

7.5. Corriente circular y solenoide

Si tenemos un conductor doblado en forma circular, por el que pasa una corriente eléctrica, podemos observar que se forma un campo magnético muy interesante (Fig. 7.5).

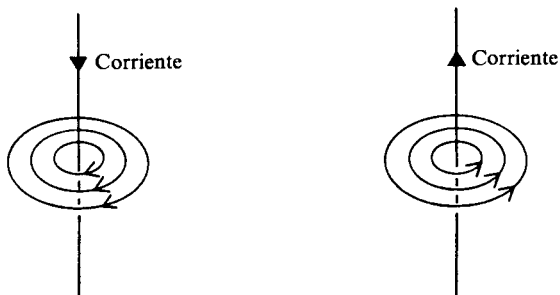
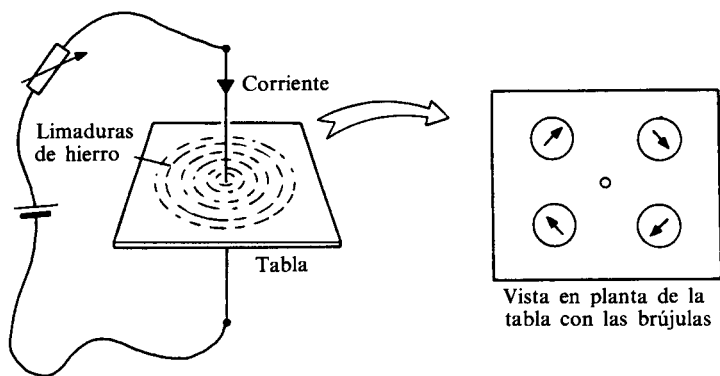


Figura 7.4.—Campo magnético generado por una corriente eléctrica.

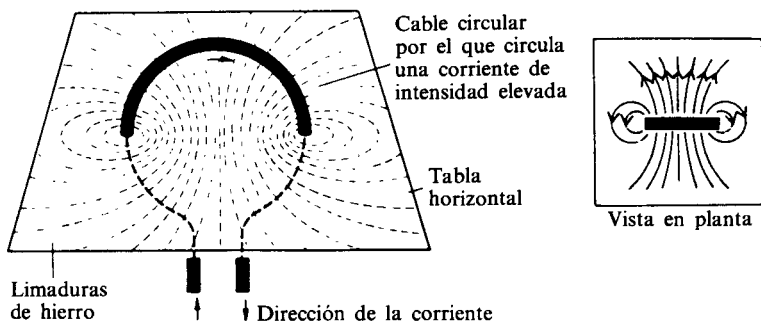


Figura 7.5.—Campo magnético a través de un conductor circular.

Observe el campo en el centro del conductor; el efecto se puede aumentar arrollando el cable por el que circula la corriente en forma de *hélice* o *solenoides*. En este caso, el dibujo del campo tanto dentro como fuera del solenoide es importante (Fig. 7.6).

Dentro del solenoide, el dibujo del campo es un conjunto de líneas rectas separadas uniformemente. Su intensidad depende del valor de la corriente eléctrica y de lo cerca que se encuentren las vueltas (espiras) de cable unas de otras. Con varios cientos de espiras

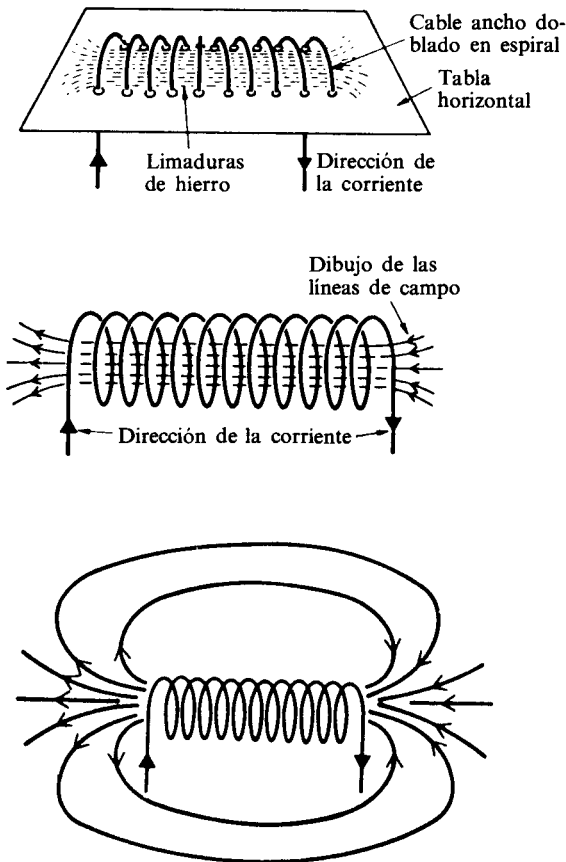


Figura 7.6.—Campo magnético dentro y fuera de un solenoide.

se puede generar un campo intenso y uniforme dentro del solenoide, que es fácil de controlar alterando la corriente eléctrica.

El dibujo del campo externo se parece notablemente al dibujo del campo de un imán permanente (Fig. 7.1d). De hecho, no se podrían diferenciar si el único factor de comparación fueran los campos. Incluso el solenoide se comporta como si tuviera polo norte y polo sur que repelen y atraen a otros polos, igual que los polos de los imanes. Si se pudiera mover libremente (lo cual no es fácil porque necesita tener cables conectados a él), el solenoide indicaría la dirección norte-sur.

7.6. Electroimanes

El campo magnético que hay dentro de un solenoide se puede utilizar para fabricar un *electroimán* si las espiras del solenoide se arrollan sobre un núcleo de hierro. El campo del solenoide magnetiza el hierro, y éste suma su campo mucho mayor al campo generado por la corriente eléctrica. La principal ventaja de este sistema reside en que como su núcleo es de hierro (hierro casi puro, no acero), no se retiene su magnetismo cuando cesa de pasar la corriente.

La fuerza del electroimán depende de la corriente que pasa por el solenoide, del número de vueltas (o espiras) de cable y del volumen del núcleo de hierro. En la figura 7.7 se puede ver una forma simple de comprobar estos factores.

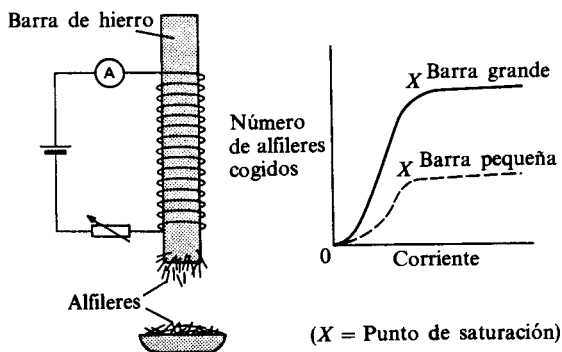


Figura 7.7.—Estudio de la fuerza de un electroimán.

Lo más importante a destacar es que la fuerza del electroimán tiene un valor límite para un tamaño de núcleo determinado, que se alcanza cuando el hierro se magnetiza totalmente, es decir, que se «satura». Por encima de este punto no se puede obtener una fuerza mayor. En cuanto a la magnetización del solenoide, lo que más importa es el número de amperios-vuelta; por ejemplo, 3 A y 100 vueltas originan el mismo efecto que 2 A y 150 vueltas o que 1 A y 300 vueltas.

7.7. Tipos de electroimanes

En la figura 7.8 aparecen algunos tipos de electroimanes, cada uno para aplicaciones específicas. Cuando se utiliza más de una bobina de cable se debe tener cuidado de que los arrollamientos estén en el sentido apropiado, para que produzcan dos polos diferentes (los dibujos no están a escala).

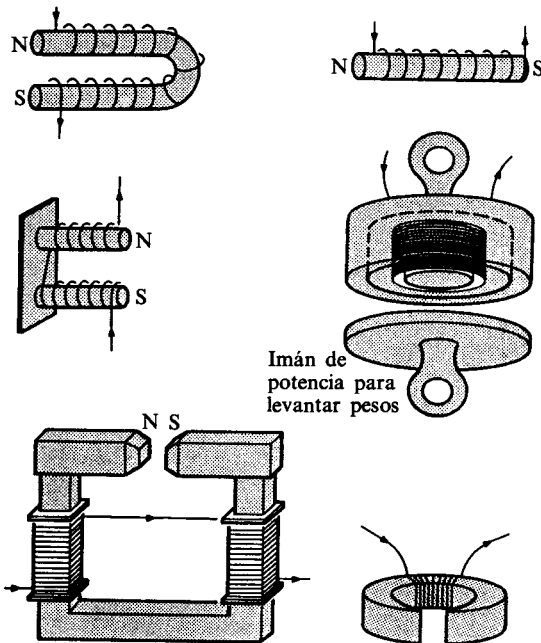


Figura 7.8.—Tipos de electroimanes.

Al igual que con los imanes permanentes, hay muchas aplicaciones de los electroimanes: timbres y vibradores, separadores de hierro/acero de otras sustancias, magnetófonos, relés de los coches, transformadores, generadores de electricidad, motores eléctricos, auriculares de teléfono, bobinas inductoras, aceleradores de partículas atómicas (el ciclotrón, por ejemplo). En la figura 7.9 aparecen algunas de estas aplicaciones.

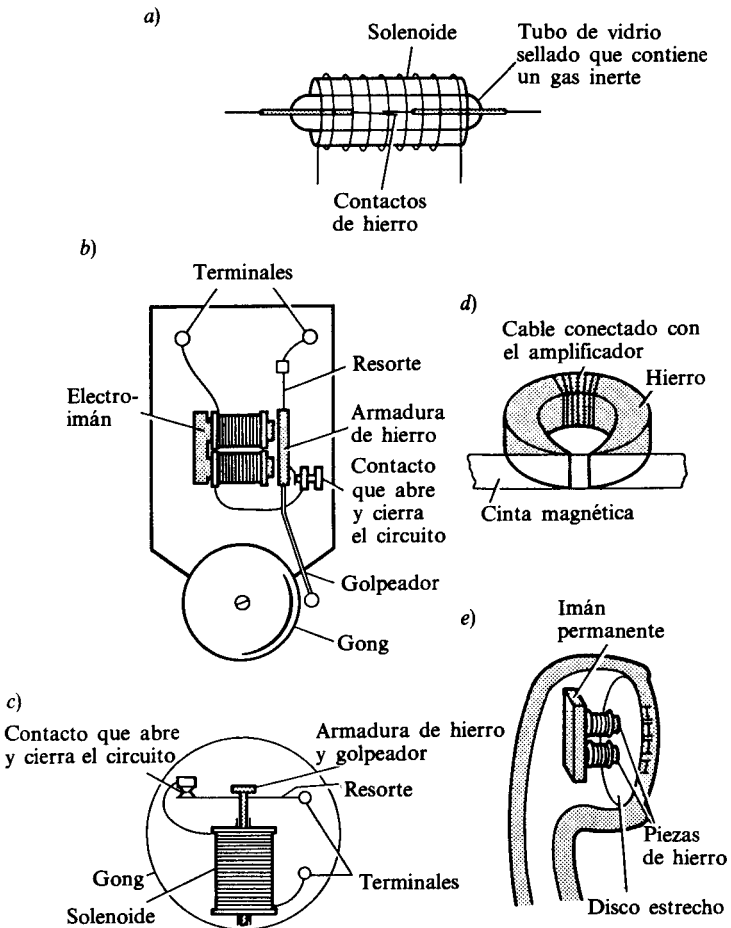


Figura 7.9.—Algunas aplicaciones de los electroimanes.

- a) Se trata de un relé *reed*. Tiene dos contactos que se juntan o se separan por la acción de un campo magnético producido por la corriente que circula por otro circuito distinto al circuito en el que se encuentran dichos contactos. Este tipo de relé se utiliza para conectar o desconectar una corriente utilizando otra.
- b) El timbre eléctrico básico funciona de la siguiente forma: cuando pasa corriente, el electroimán atrae una «armadura» de hierro dulce, lo que provoca la ruptura del circuito y, por tanto, la armadura vuelve a su sitio, repitiéndose esta secuencia periódicamente. Es muy importante el ajuste del contacto para que el timbre suene adecuadamente.
- c) Otro diseño de timbre eléctrico. La armadura se encuentra por encima de... ¿Puede usted explicar qué es lo que ocurre para que suene el timbre?
- d) La cabeza grabadora (o reproductora) de un magnetófono magnetiza las partículas que hay en la cinta dependiendo de las señales eléctricas que provienen del amplificador.
- e) El auricular de un teléfono contiene un disco muy fino que vibra en función de los cambios que experimenta el campo magnético producido por un electroimán.

7.8. Resumen

- Los polos magnéticos iguales se repelen y los polos distintos se atraen.
- En torno a un material magnético y a una corriente eléctrica existe un campo magnético.
- Las líneas de campo magnético no se cruzan ni se tocan entre ellas.
- La tierra tiene su propio campo magnético.
- Cada material magnético tiene propiedades diferentes en cuanto a la intensidad del campo y a la retención.
- El campo magnético generado por un solenoide es muy parecido al de un imán recto.
- La fuerza de un electroimán depende del tamaño del núcleo y del número de amperios-vuelta.

8

Energía y potencia eléctricas

8.1. Energía y potencia

La energía se mide normalmente en julios; el julio es una unidad científica llamada así en honor del investigador inglés James Prescott Joule (1818-1889), que trabajó en la relación existente entre la energía mecánica y el calor, aproximadamente en el año 1850. En algunos países, entre ellos España, se emplea a veces la caloría, o la kilocaloría (1.000 calorías). La relación entre estas dos unidades es: 1 caloría = 4,18 julios, o 1 kilocaloría = 4,18 kJ.

Un julio es la cantidad de energía transferida de una forma a otra cuando una fuerza de un newton se mueve una distancia de un metro. Aunque se define con términos mecánicos, el julio es aplicable a toda clase de energía. Para hacerse una idea de la magnitud de un julio, es la energía necesaria para levantar una masa de 98 g (el tamaño de una tableta de chocolate pequeña) a un metro de altura, venciendo la gravedad (Fig. 8.1), o también la que se necesita para levantar un paquete de azúcar de un kilogramo a una altura de 10,2 cm.

Parece lógico hablar de *transferencia de energía* o trabajo que se realiza cuando ocurre algo tan simple como levantar un peso a una cierta altura. Cuando se trata del funcionamiento del motor de un coche o de un horno, sin embargo, es más útil considerar la «velocidad» a la cual se transfiere energía o a la cual se realiza un trabajo, es decir, el número de julios por segundo. Un julio por segundo es un *vatio* (llamado así en honor de James Watt, 1736-1819), que es la unidad de medida de la potencia; la potencia

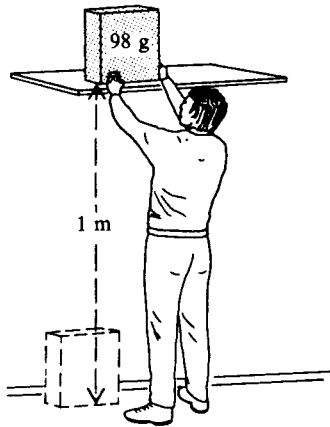


Figura 8.1.—Para levantar 98 g a una altura de un metro se debe emplear un julio de energía.

es la velocidad a la que se realiza la transferencia de energía o a la que se realiza el trabajo. La abreviatura del vatio es «W».

| | |
|------------------|---|
| | $1 \text{ vatio} = 1 \text{ julio por segundo}$ |
| $1 \text{ kW} =$ | $1.000 \text{ W} = 1.000 \text{ Js}^{-1}$ |
| $1 \text{ MW} =$ | $1.000.000 \text{ W} = 1.000.000 \text{ Js}^{-1}$ |
| $1 \text{ mW} =$ | $\frac{1}{1.000} \text{ W} = \frac{1}{1.000} \text{ Js}^{-1}$ |

Estas relaciones anteriores no son ecuaciones en las que los miembros de la izquierda tienen el mismo valor que los miembros de la derecha; son identidades en las cuales la parte de la izquierda y la parte de la derecha son lo mismo pero con distinto nombre.

A veces se utiliza como unidad de potencia el caballo de vapor o CV, cuya relación con el vatio es $7 \text{ CV} = 735 \text{ W}$. También existe el caballo inglés o *horsepower* (HP), que equivale aproximadamente a 750 W . Un hombre de 70 kg subiendo una escalera de doce escalones, de 23 cm de altura cada uno, en cinco segundos desarrollaría una potencia de 375 W o de $0,5 \text{ HP}$.

8.2. Amperios, voltios, ohmios y vatios

Cuando se mueve un culombio por medio de una diferencia de potencial de un voltio, se transfiere un julio de energía (Ap. 3.3). Por tanto, si por medio de 1 V se mueve 1 C en cada segundo, se transferirá 1 J de energía en cada segundo.

Sabemos que 1 C moviéndose en un segundo es 1 A (Ap. 1.4).

Por tanto, si circula 1 A por medio de una diferencia de potencial de 1 V, se transfiere 1 J en cada segundo.

Pero 1 J por segundo es 1 W (Ap. 8.1).

Según esto, si circula 1 A a través de una diferencia de potencial de 1 V, la velocidad de transferencia de energía es de 1 W.

Por tanto, si circulan 2 A a través de una diferencia de potencial de 3 V, la potencia transferida es de $2 \times 3 = 6$ W.

Por tanto, si circula una corriente eléctrica I a través de una diferencia de potencial V , la potencia transferida es IV .

| |
|--|
| $\begin{array}{l} \text{Velocidad de transferencia} \\ \text{de energía o potencia} \\ \text{eléctrica (en vatios)} \end{array} = \begin{array}{l} \text{Corriente} \\ \text{en amperios} \end{array} \times \begin{array}{l} \text{Diferencia de} \\ \text{potencial} \\ \text{(en voltios)} \end{array}$ |
|--|

En símbolos: $P = IV$

Se debe resaltar que esta relación entre la potencia, la corriente eléctrica y la diferencia de potencial no es una oscura fórmula de física: se deduce directamente a partir de la definición del voltio como un julio por culombio.

Utilizando la relación $V = IR$ (Ap. 4.8) se obtienen otras dos ecuaciones sustituyendo I o V :

$$P = I^2 R \quad ; \quad P = \frac{V^2}{R}$$

8.3. Cálculo de potencia

Para calcular la potencia se puede utilizar cualquiera de las tres fórmulas anteriores, dependiendo de los datos de que se disponga.

EJEMPLO 1. ¿Cuál es la velocidad de transferencia de energía, o sea, la potencia, que se transfiere cuando pasa una corriente de 5 A a través de una diferencia de potencial de 12 V?

Utilizando $P = IV$, Potencia = $5 \times 12 \text{ W} = 60 \text{ W}$.

EJEMPLO 2. Una corriente eléctrica de 4 A circula a través de una resistencia de 20Ω . ¿Cuál es la potencia?

Utilizando $P = I^2R$, Potencia = $4^2 \times 20 \text{ W} = 320 \text{ W}$.

EJEMPLO 3. En una resistencia de 10Ω cae una diferencia de potencial de 100 V. ¿Cuál es la potencia?

Utilizando $P = \frac{V^2}{R}$, Potencia = $\frac{100^2}{10} \text{ W} = 1.000 \text{ W}$.

Obsérvese la forma de hablar en estos ejemplos: la potencia es la velocidad de transferencia de energía, no la energía disipada, perdida o utilizada. Para que pase una corriente a través de una resistencia, la fuente debe convertir la energía con una velocidad o rapidez determinada, y la energía eléctrica se transforma en energía térmica puesto que la resistencia se calienta en el proceso. También es cierto que desde el punto de vista de la fuente, la energía se «pierde», pero esta energía no se destruye, sino que se transforma. La fuente debe funcionar de forma que suministre una cantidad determinada de energía en cada segundo.

EJEMPLO 4. Una fuente tiene una resistencia interna de 12Ω y hace que circule una corriente eléctrica de 10 A a través de una resistencia de 20Ω . ¿Cuánta potencia suministra la fuente y qué proporción de la misma se emplea en calentar la resistencia externa? (véase el circuito de la figura 8.2a).

$$\text{Resistencia total} = (12 + 20) \Omega = 32 \Omega$$

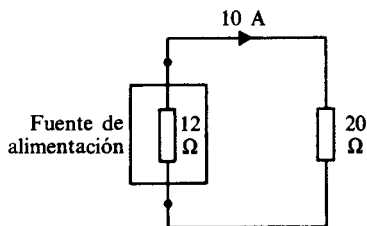


Figura 8.2(a).

Utilizando $P = I^2R$, para el circuito completo,

$$\text{Potencia total} = 10^2 \times 32 \text{ W} = 3.200 \text{ W}$$

Utilizando $P = I^2R$ para la resistencia externa,

$$\text{Potencia disipada en la resistencia} = 10^2 \times 20 \text{ W} = 2.000 \text{ W}$$

La proporción de potencia empleada en calentar la resistencia será

$$\frac{2.000}{3.200} = \frac{5}{8}$$

EJEMPLO 5. En el circuito de la figura 8.2b, ¿qué potencia suministra la fuente a las resistencias externas?

La resistencia equivalente externa, R , se calcula según:

$$1/R = 1/20 + 1/30 = (3 + 2)/60 = 5/60$$

$$R = 60/5 \Omega = 12 \Omega$$

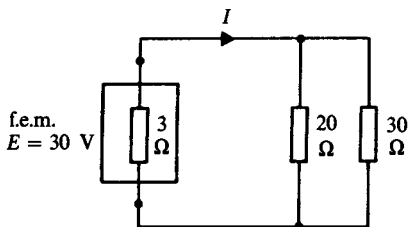


Figura 8.2(b).

Necesitamos conocer la corriente que circula por esta resistencia equivalente, o conocer la tensión o diferencia de potencial que cae en la misma; la intensidad de la corriente es más fácil de obtener:

$$\text{Utilizando } E = Ir + IR$$

$$30 = I(3 + 12)$$

$$30 = I \times 15$$

$$I = 2 \text{ A}$$

Utilizando $P = I^2R$ para las resistencias externas:

$$\text{Potencia} = 2^2 \times 12 \text{ W} = 48 \text{ W}$$

En este caso hay que tener cuidado si se utiliza la fórmula $P = V^2/R$, puesto que en la resistencia externa no caen los 30 V de la f.e.m. de la fuente; cae una parte de la tensión en la resistencia interna, 6 V en este caso ($V = Ir$). Este ejemplo, con diversos valores, se puede utilizar para demostrar que la potencia cedida a la resistencia interna tiene el mismo valor que la resistencia externa. Esta conclusión es muy importante y se puede aplicar para cualquier fuente de tensión.

EJEMPLO 6. Se compra una bombilla de 220 V, 100 W. ¿Qué resistencia tiene cuando se está utilizando y qué valor tiene la intensidad de la corriente que pasa por la misma?

Utilizando $P = V^2/R$:

$$\begin{aligned} 100 &= 220^2/R \\ R &= 220^2/100 \text{ } \Omega = 484 \text{ } \Omega \end{aligned}$$

Utilizando $V = IR$:

$$\begin{aligned} 220 &= I \times 484 \\ I &= 220/484 \text{ A} = 0,45 \text{ A} \end{aligned}$$

O utilizando $P = IV$,

$$\begin{aligned} 100 &= I \times 220 \\ I &= 100/220 \text{ A} = 0,45 \text{ A} \end{aligned}$$

8.4. Facturación de la electricidad

Si se piensa en el uso a que se destina la electricidad en el hogar, el comercio o la industria —calefacción, alumbrado, motores, equipos de sonido, electroimanes, plantas químicas, transporte— se deduce que lo que se utiliza es energía.

Con un julio de energía no se pueden calentar ni siquiera unas cuantas gotas de agua hasta un nivel apreciable, por lo cual se necesita una unidad de medida mucho mayor, kilojulios o incluso megajulios. Una bombilla de 100 W funcionando durante un minuto consumirá una energía de $100 \times 60 = 6.000$ J. Otra forma de expresar este consumo, es decir, 100 vatios-minuto, pero incluso esta unidad de energía es relativamente pequeña. En la práctica se utiliza una unidad muy normal, que es el kilovatio-hora (kWh).

$$\begin{aligned}
 1 \text{ kWh} &\text{ equivale a } 1.000 \text{ vatios en una hora} \\
 &\quad \text{o a } 1.000 \text{ julios por segundo en una hora} \\
 &\quad \text{o a } 1.000 \times 60 \times 60 \text{ julios} \\
 1 \text{ kWh} &= 3.600.000 \text{ J} \\
 &= 3,6 \text{ MJ}
 \end{aligned}$$

Tanto el kWh como el MJ son unidades de energía adecuadas para medir el consumo de energía eléctrica en los hogares, y los aparatos de medida que registran el consumo utilizan estas unidades, sobre todo el kWh.

8.5. Consumo de algunos equipos típicos

Todos los aparatos eléctricos llevan una etiqueta o una placa de características donde el fabricante indica la gama de potencias y de tensiones para las que han sido diseñados. En España se utiliza una tensión de red de 220 V para las viviendas familiares (Ap. 13.3) (hasta no hace mucho tiempo se utilizaban 125 V), aunque en la industria es normal utilizar 380 V. En parte de Europa y en Estados Unidos se utilizan 110 V, y en Gran Bretaña la tensión de red es de 240 V en los hogares y 415 V para la industria.

En la tabla 8.1 aparecen algunos electrodomésticos junto con la potencia típica que desarrollan.

Los aparatos eléctricos que más energía consumen son los que incorporan algún elemento que se calienta. Los calentadores de agua eléctricos, en particular, suelen estar enchufados bastante tiempo, por lo que es rentable disponer de un temporizador que conecte y desconecte automáticamente el calentador cada cierto tiempo. Las

cocinas eléctricas no suelen llevar termostatos para controlar la temperatura, que son muy normales en los hornos y en los radiadores eléctricos de calefacción, encendiéndolos y apagándolos para mantener una temperatura determinada o para realizar un determinado tipo de guiso. De forma similar, la energía que se consume (se transfiere) en un receptor de televisión o en un equipo de sonido no tiene un valor constante.

TABLA 8.1

| Electrodoméstico | Potencia típica |
|-------------------------------|-----------------|
| Máquina de afeitar | 8 W |
| Bombilla | 100 W |
| Manta eléctrica | 120 W |
| Equipo de música | 140 W |
| Receptor de televisión | 190 W |
| Cortadora de césped | 400 W |
| Cafetera | 725 W |
| Secador de pelo | 1,2 kW |
| Estufa eléctrica (dos barras) | 2,0 kW |
| Olla | 2,4 kW |
| Calentador eléctrico | 3,0 kW |
| Cocina de cuatro fuegos | 11,0 kW |

8.6. Resumen

- La potencia es la «velocidad» con que se transfiere la energía, y se mide en vatios.
- Un vatio es un julio por segundo o un voltio-amperio.

$$P = IV, I = \frac{P}{V}, V = \frac{P}{I}, P = I^2R, P = V^2/R$$

- La energía eléctrica se factura tomando como unidades el kilovatio-hora o el megajulio.
- Un kilovatio-hora (kWh) equivale a 3,6 MJ.

9

Motores eléctricos

9.1. Movimiento utilizando el electromagnetismo

En el capítulo 7 se han descrito los campos magnéticos que aparecen en torno a los imanes permanentes y a los conductores por los que pasa una corriente eléctrica. La interacción entre campos provenientes de diferentes fuentes puede producir fuerzas y, por tanto, movimiento, siempre que se utilicen de forma apropiada y se dispongan convenientemente para poder aprovechar estas propiedades.

El efecto motor básico resulta de los efectos combinados del campo de un imán y el de una corriente eléctrica.

En la figura 9.1 se representa un esquema mediante el cual se pueden comprobar experimentalmente los efectos que se producen cuando pasa una corriente eléctrica a través del campo magnético que hay entre los polos de un potente imán. La barra por la cual circula la corriente puede deslizarse por encima de unos carriles metálicos por los cuales también circula la corriente. Cuando se conecta el circuito, la barra se mueve debido a la fuerza generada por los campos magnéticos del imán y de la corriente eléctrica. En la figura 9.2 se representan los dos campos separados y el que resulta de la combinación de ambos.

La fuerza proviene de la distribución tan asimétrica del campo que existe y, tanto el imán como la barra por la que pasa la corriente, experimentan unas fuerzas que están en sentido opuesto y que intentan nivelar el campo. La dirección de la fuerza depende de las direcciones de los campos magnéticos del imán y de la co-

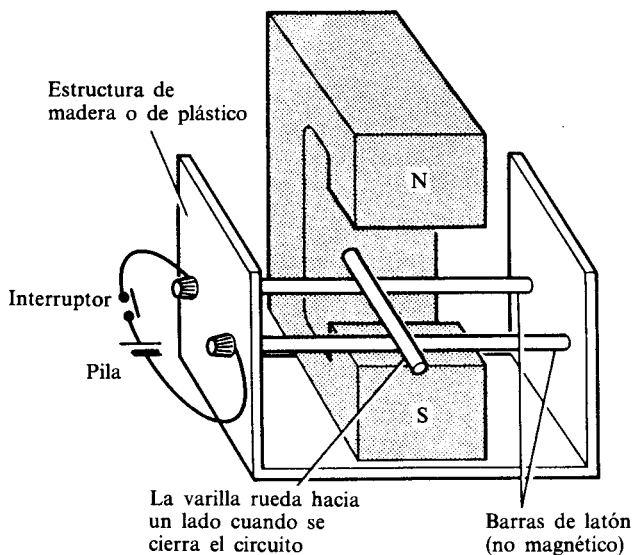


Figura 9.1.—Experimento para comprobar la interacción entre el campo magnético de un imán y el de una corriente eléctrica.

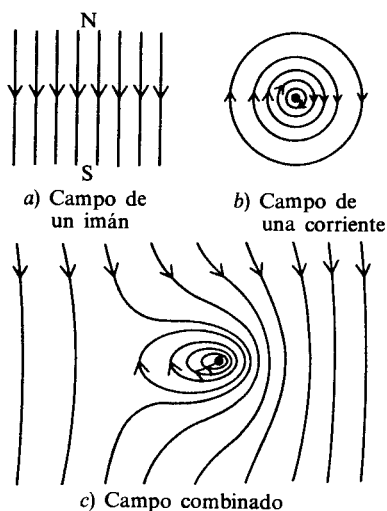


Figura 9.2.—Resultado de la combinación del campo magnético de un imán y el de una corriente eléctrica.

riente eléctrica. En la figura 9.3 se resumen las relaciones en tres dimensiones que existen entre estas direcciones y se muestra la fuerza que experimenta el conductor por el cual circula la corriente.

Para recordar cuál es cada dirección puede ser útil emplear la «regla de la mano izquierda», de Fleming (Fig. 9.4).

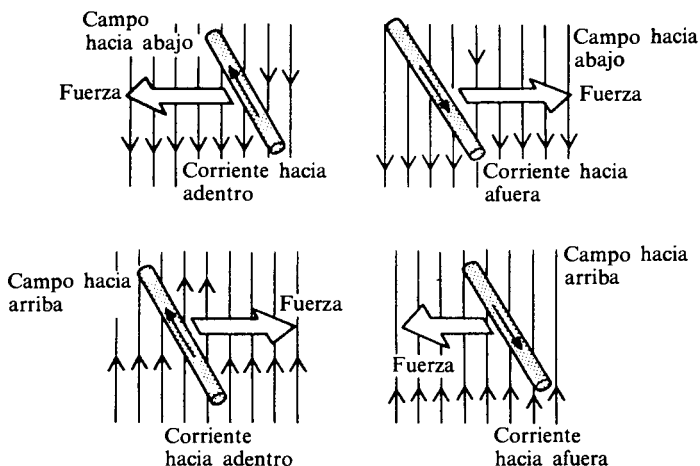


Figura 9.3.—Relación entre las direcciones del campo, de la corriente eléctrica y de la fuerza.

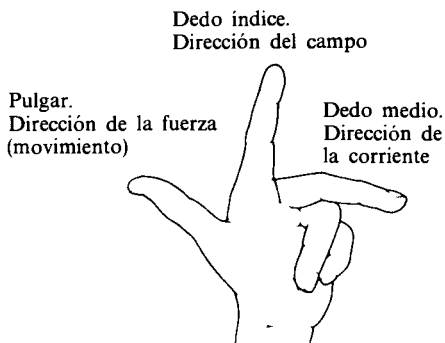


Figura 9.4.—Regla de la mano izquierda, de Fleming.

9.2. Fuerzas entre corrientes eléctricas. El amperio

Para ver cómo actúan las fuerzas que se generan al circular dos corrientes por sendos cables rectos que se encuentran próximos entre sí, se puede emplear la regla de la mano izquierda (Fig. 9.5). El curioso resultado es que si las corrientes van en la misma dirección (el mismo sentido) se atraen, mientras que si van en direcciones contrarias se repelen entre ellas.

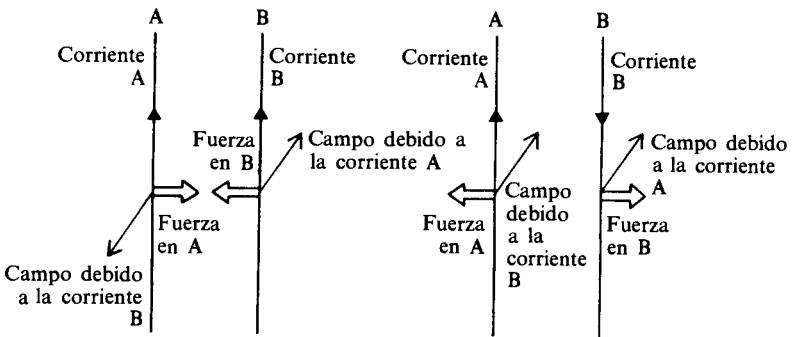


Figura 9.5.—Fuerzas generadas entre dos corrientes paralelas.

Hay una definición importante del amperio que utiliza este efecto de generación de una fuerza entre dos conductores por los cuales circula una corriente eléctrica:

El amperio es la intensidad de una corriente que circula por dos conductores finos de longitud infinita y paralelos separados 1 m uno de otro y situados en el vacío, y que produce una fuerza entre ellos de 2×10^{-7} N por metro de longitud de los conductores.

Aunque se trata sólo de una definición teórica, se pueden medir corrientes utilizando métodos basados en esta definición, equilibrando fuerzas, y además esta definición se acepta internacionalmente como forma para comprender lo que es un amperio.

9.3. El efecto Hall

Si tenemos un imán y un conductor que no se pueden mover y el campo del imán y de la corriente eléctrica que pasa por el conductor están interaccionando, la fuerza que se crea afecta a los electrones que hay dentro del conductor, desplazándolos hacia un lado mientras se están moviendo. Como consecuencia de esto se genera una pequeña diferencia de potencial en dirección perpendicular a la corriente, fenómeno que se denomina *efecto Hall*. En la figura 9.6 se representan los conceptos antes mencionados y la relación entre ellos. Los materiales semiconductores, como el germanio, presentan un efecto Hall muy acusado, pudiendo ser utilizados para medir la intensidad de campos magnéticos a partir de la intensidad de la corriente utilizada y de la diferencia de potencial que se genera.

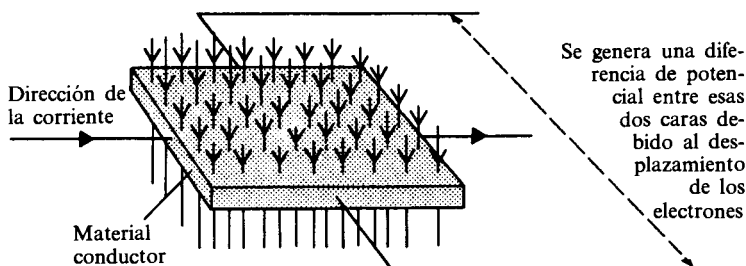


Figura 9.6.—Efecto Hall.

9.4. Motor de corriente continua

En la figura 9.7 se puede ver la forma de fabricar un motor sencillo de corriente continua, cuyo diseño tiene bastante en común con el de los motores grandes que aparecen en el mercado. Se compone de una *armadura* (un trozo de madera) que sirve de soporte a una *bobina* de cable aislado compuesta por varias vueltas (espiras), y que puede girar libremente en el seno de un *campo magnético*. Para que la corriente pueda entrar y salir de la bobina a través de los contactos, sin influir en ello el movimiento de la armadura, se utiliza el método que se representa en la figura 9.7.

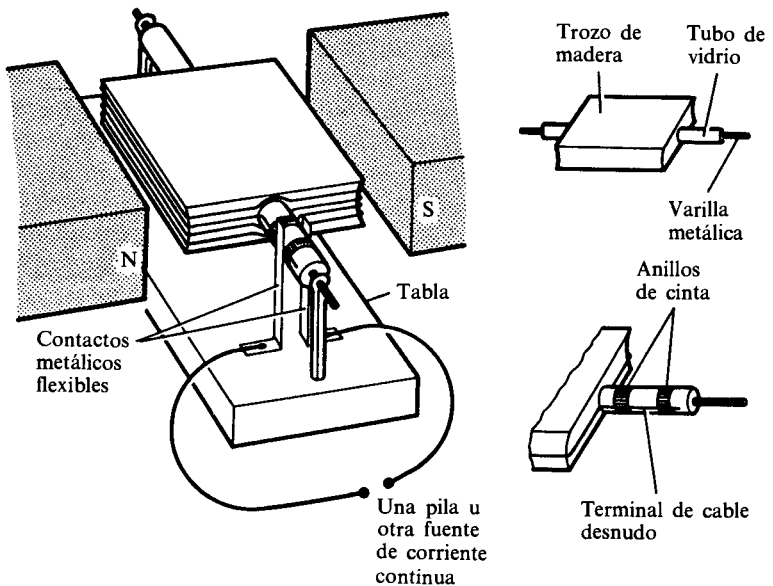


Figura 9.7.—Fabricación de un motor de corriente continua.

El motor funciona debido a que las caras opuestas de la bobina soportan fuerzas en sentido contrario, provocando el giro de la armadura. En la figura 9.8 se representan las fuerzas que actúan: *a)* cuando la bobina está en posición horizontal, y *b)* cuando se encuentra formando un ángulo con la dirección de los polos del imán.

Si la bobina gira por efecto de las fuerzas, como se ve en las figuras, se pondrá rápidamente en posición vertical, quedándose así en equilibrio, y las fuerzas que se aplican a los lados *AB* y *CD* se mantendrán fijas. Para mantener la rotación se necesita que la corriente cambie de sentido en la bobina, saliendo ésta de la posición vertical, como se ve en la figura 9.8c, produciéndose unas fuerzas que son las que hacen que continúe girando la bobina. Si se puede invertir el sentido de la corriente cada media vuelta cuando la bobina pasa por la posición vertical (es decir, cuando la espira representada se pone paralela a las caras de los polos del imán), las fuerzas también se invierten y la bobina mantiene su rotación.

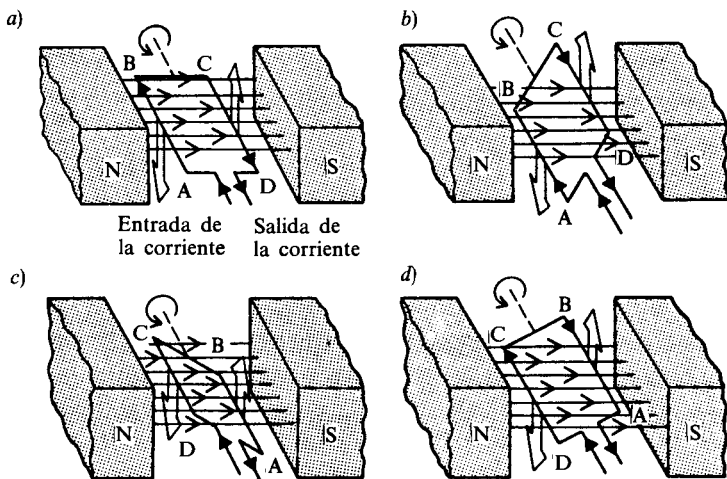


Figura 9.8.—Efectos producidos en un motor de corriente continua.

El dispositivo que se utiliza para invertir el sentido de la corriente se denomina *colector conmutador*. En la figura 9.9 se representa un colector sencillo; tiene dos escobillas de carbón que rozan con dos semicilindros aislados entre sí, a los cuales se conectan los extremos de la bobina. Con esto se introduce una mejora al método utilizado en la figura 9.7, puesto que se pueden mantener los contactos eléctricos durante el giro completo de la bobina en vez de tener que hacerlo de forma intermitente, únicamente conectando los extremos de la bobina a los contactos metálicos (en la figura 9.9, las escobillas de carbón estarían fijas a la carcasa del motor y los anillos de cobre girarían entre ellas al mismo tiempo que la bobina).

9.5. Algunos detalles de diseño de motores de corriente continua reales

Los motores reales se construyen de forma más robusta y elaborada que el modelo descrito anteriormente. Se necesitan, por ejemplo, diseños apropiados de las piezas mecanizadas y de la carcasa protectora, pero sobre todo se puede mejorar el diseño si se utilizan varias bobinas de cable separadas una cierta distancia co-

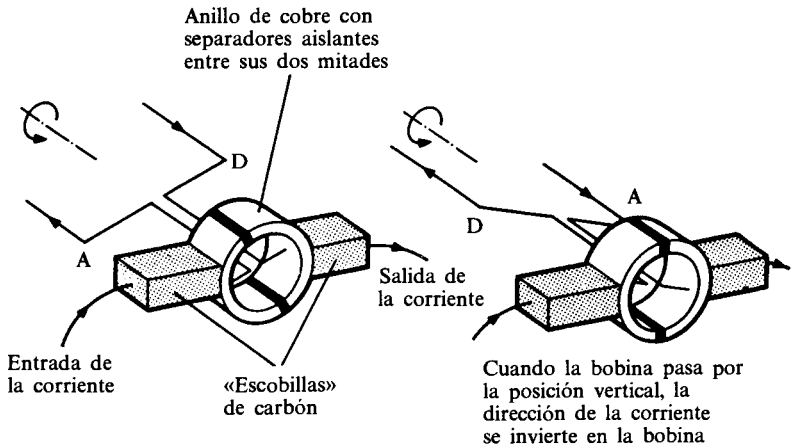
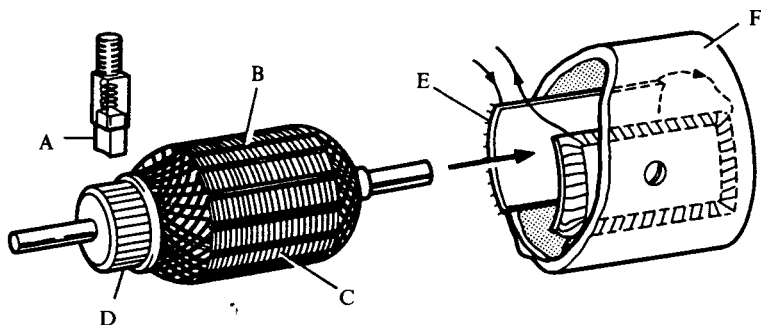


Figura 9.9.—Detalle del colector.

nectadas en serie y arrolladas en una armadura cilíndrica. Para ello se necesita un colector múltiple con escobillas de carbón, con el fin de proporcionar las conexiones necesarias y producir la inversión de la corriente. La armadura se fabrica en hierro dulce laminado y los polos del imán son curvados para adaptarse a la armadura (también llamada inducido). Los motores pequeños utilizados para juguetes tienen imanes permanentes, pero los motores grandes llevan electroimanes que necesitan bobinados separados para funcionar. En la figura 9.10 se pueden observar las distintas partes mencionadas de un motor de corriente continua.

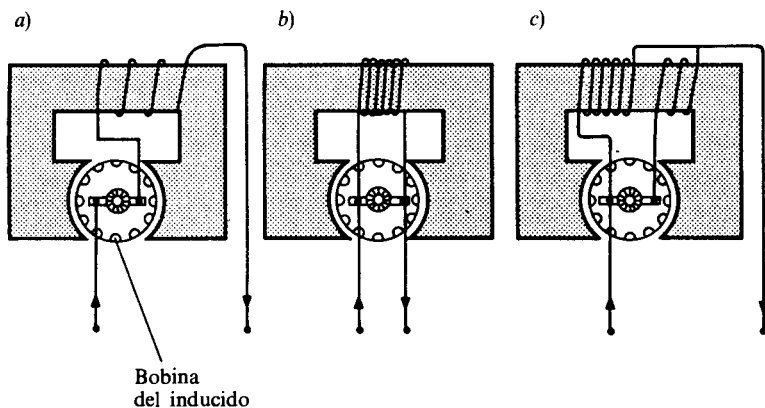
Cuando se utilizan electroimanes en los motores, hay tres formas de realizar las conexiones para utilizar la misma fuente en el electroimán y en el inducido (Fig. 9.11). Cada tipo de bobinado da al motor unas propiedades distintas y, por tanto, se utiliza para distintas aplicaciones.

Una propiedad de todos los motores, que se considerará en el apartado 10.13, es que necesitan una intensidad de corriente muy grande para arrancar, pero cuando está en régimen es mucho más baja. Esto hace pensar que el motor tiene una resistencia cuyo valor depende de la velocidad a la que está girando. La razón por la que ocurre esto será explicada en el capítulo siguiente, pero ya podemos deducir que es importante incluir una resistencia variable



- A. Escobillas de carbón sustituibles.
 B. Múltiples bobinas en serie conectadas a los segmentos apropiados del colector.
 C. Armadura de hierro dulce laminado, en cuyas ranuras se alojan las bobinas.
 D. Colector conmutador múltiple; tiene un par de segmentos para cada bobina.
 E. Bobinas para formar el electroimán.
 F. La carcasa exterior del motor tiene forma cóncava, como el electroimán. La forma cóncava de los polos permite que haya un par máximo en la armadura (o inducido).

Figura 9.10.—Partes de un motor de corriente continua real.



- a) Bobinado en serie: la bobina que produce el campo está en serie con las bobinas del inducido.
 b) Bobinado en *shunt*: la bobina que produce el campo está en paralelo con las bobinas del inducido.
 c) Bobinado compuesto: hay dos bobinas para producir el campo, una conectada en serie con las bobinas del inducido y otra en paralelo.

Figura 9.11.—Tres tipos de bobinados en motores de corriente continua.

(cuyo valor se puede reducir progresivamente) en el circuito que contenga un motor, para prevenir un calentamiento indebido de los bobinados (Fig. 10.18).

9.6. Motores de corriente alterna

La parte más complicada de un motor de corriente continua es el colector conmutador, que invierte el sentido de la corriente en las bobinas del inducido o armadura cada media vuelta, como ya hemos visto. Si se utiliza corriente alterna en vez de continua, no se necesita el colector, puesto que la corriente invierte su sentido automáticamente. Sin embargo, sigue teniendo el problema de que los contactos permanezcan al girar el motor. En la figura 9.12 se representa una adaptación del diseño de motor básico en el cual los terminales de la bobina permanecen siempre en contacto con los mismos contactos, en lugar de estar alternativamente cambiando de uno a otro, como en el caso del motor de continua de la figura 9.7.

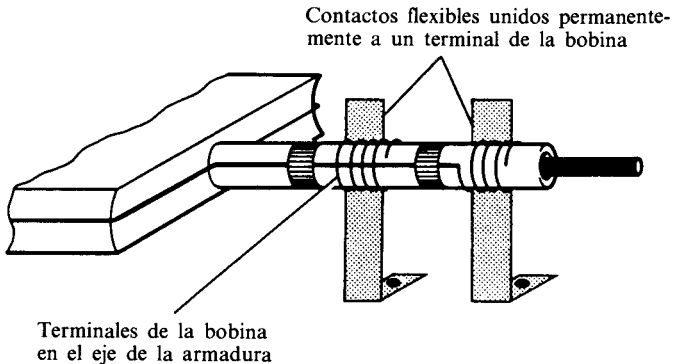


Figura 9.12.—Detalle de los contactos en un motor básico de corriente alterna.

Puesto que el giro del inducido depende del cambio de sentido de la corriente en el momento apropiado, existirá una cierta velocidad a la cual el motor de corriente alterna funcione sincronizado con la frecuencia de la corriente alterna. Este tipo de motores *síncronos* tiene una aplicación obvia en relojes eléctricos

diseñados para funcionar dependiendo de la frecuencia de 50 Hz de la tensión de red. En la figura 9.13 aparecen algunos detalles de la construcción de un motor de este tipo. Los polos interiores y los exteriores cambian el sentido de su magnetización cada vez que se invierte la corriente. Si el rotor (parte del motor que gira) gira a la velocidad adecuada, sus polos permanentes son atraídos continuamente por el siguiente par de polos fijos y se puede mantener una velocidad de rotación constante, que depende del número de polos fijos y de la frecuencia de la corriente alterna de alimentación. Normalmente este tipo de motor necesita un pequeño giro inicial para empezar a funcionar. Los motores de corriente alterna grandes se diseñan de diferente forma (Ap. 10.11).

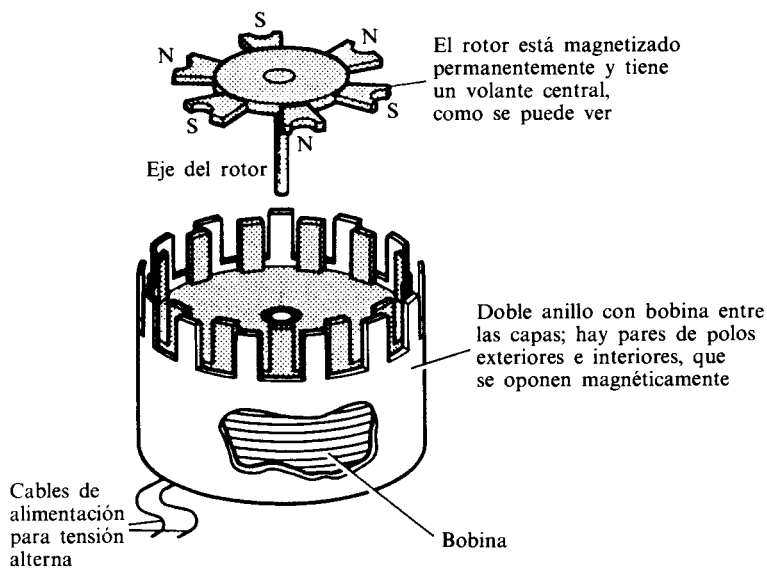


Figura 9.13.—Motor síncrono de corriente alterna.

9.7. Diseño de un galvanómetro

Otra aplicación del efecto que aparece en los motores se encuentra en la construcción del galvanómetro de bobina móvil, que se puede adaptar para funcionar como amperímetro, voltímetro u ohmí-

metro (Cap. 6). Igual que en un motor de corriente continua, hay una bobina de cable y un campo magnético, produciéndose, por tanto, una rotación, pero en este caso se emplean muelles para evitar que la bobina gire más de 90 grados. En la figura 9.14 se muestran detalles de este sistema.

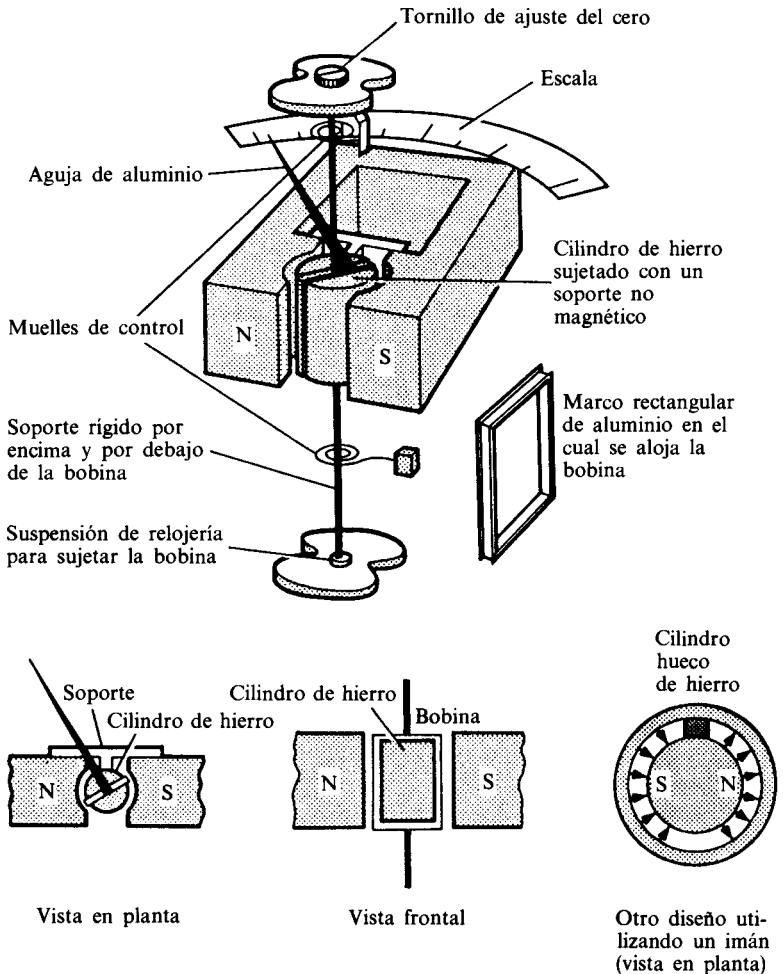


Figura 9.14.—Partes de un galvanómetro de bobina móvil.

Obsérvese que la bobina rectangular alojada en un marco de aluminio se mueve en el espacio que queda entre los polos del imán y el cilindro de hierro. El cilindro está sujeto al imán por medio de una abrazadera no magnética. La corriente entra y sale de la bobina a través de los muelles de control.

Hay que destacar el uso de un marco de aluminio en el que se enrolla la bobina (Ap. 10.11), y la presencia de un hueco estrecho entre los polos del imán y el núcleo de hierro para que pueda girar la bobina. En el caso de fabricación de instrumentos de medida, es deseable que todas las piezas necesarias para la sujeción y suspensión estén fabricadas con precisión típica de relojería, para conseguir un diseño robusto. Los muelles de control que se encuentran por encima y por debajo de la bobina también sirven como contactos para que pueda pasar la corriente eléctrica. El imán permanente que produce el campo magnético se puede colocar dentro de la bobina en vez de fuera de ella, como está representado, con lo cual se permite un ángulo de giro de la bobina más grande y también se reduce el peso del instrumento, pues se puede utilizar un imán más pequeño.

9.8. Sensibilidad de un galvanómetro

El ángulo de deflexión de la bobina en un galvanómetro construido como el anteriormente mencionado depende de:

- la intensidad del campo B ;
- la intensidad de la corriente eléctrica I ;
- el número de espiras de la bobina n ;
- el área de la bobina A ;
- la rigidez de los muelles de control c .

Para obtener un ángulo de desviación grande sería preciso que las cuatro magnitudes primeras de la lista fueran grandes y que la quinta fuera pequeña. El aumento de B , de n y de A está limitado en la práctica por el tamaño y el peso del instrumento. El valor de n puede ser de varios cientos de espiras de cable muy fino, pero el valor de A sólo puede ser de 1 a 2 cm². El valor de B depende del material (aleación) de que esté hecho el imán, y el valor de I

es el que se pretende medir. La rigidez del muelle es la que determina en mayor medida, por tanto, la sensibilidad del galvanómetro.

En instrumentos muy sensibles se utiliza un sistema de suspensión diferente y muy delicado, que proporciona el control sin utilizar muelles. En vez de utilizar una aguja, se utiliza un rayo de luz y un sistema de espejos; este rayo se puede desviar unos centímetros cuando pasa una corriente eléctrica de un microamperio, pudiéndose observar esta desviación en una escala. En la figura 9.15 se representa uno de estos galvanómetros. Se debe tener mucho cuidado cuando se mueven estos instrumentos, para que no se dañe la suspensión. A veces se puede utilizar una abrazadera para sujetar la bobina cuando se tiene que mover el instrumento. En algunos instrumentos hay que ajustar el nivel mediante unos tornillos para asegurar un alineamiento apropiado.

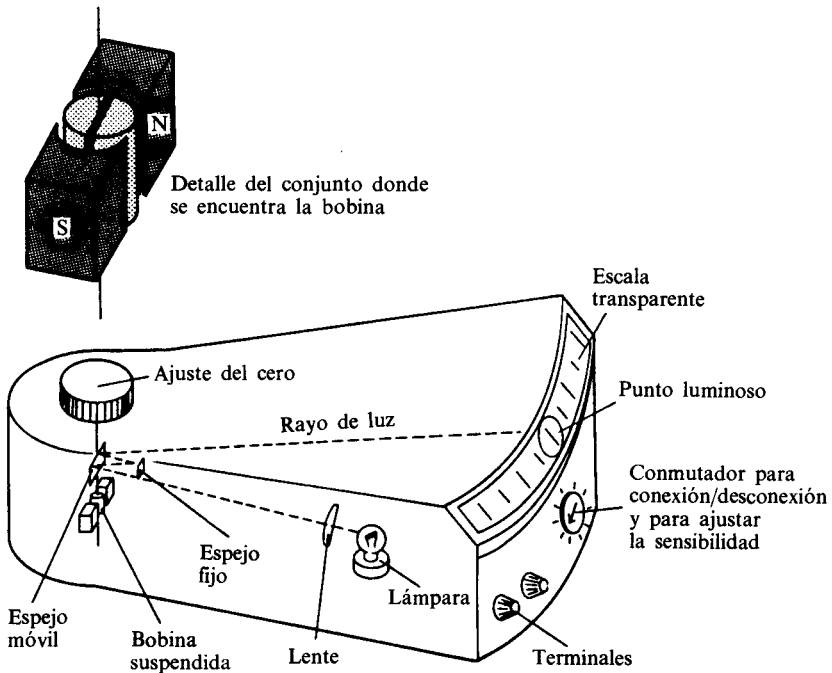


Figura 9.15.—Galvanómetro sensible de bobina móvil.

9.9. Altavoz de bobina móvil

Muchos altavoces de receptores de televisión, receptores de radio, magnetófonos y sistemas de megafonía son aparatos de bobina móvil. Estos altavoces reciben corrientes alternas provenientes de amplificadores y las bobinas vibran en vez de girar o de dar vueltas. En la figura 9.16 se muestra cómo están dispuestos la bobina y el campo magnético para producir el movimiento alternativo de la bobina. Este movimiento es transmitido a un cono de papel, el cual, a su vez, produce vibraciones en el aire que hay delante de él. Es interesante pensar en cómo se magnetiza el imán para producir los polos que se representan en la figura.

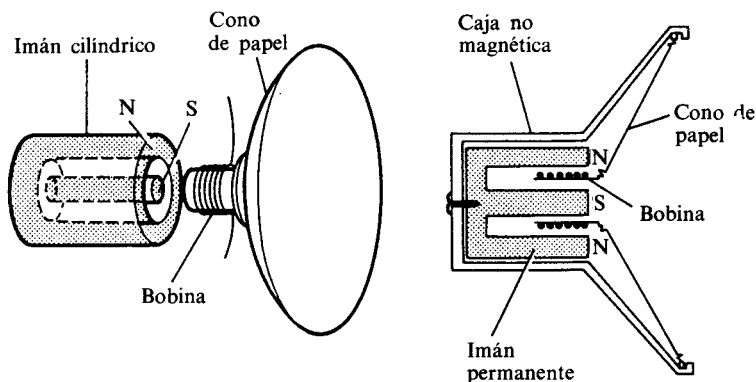


Figura 9.16.—Altavoz de bobina móvil.

9.10 Resumen

- Combinando corrientes eléctricas y campos magnéticos se pueden producir fuerzas y movimiento.
- La dirección de la fuerza generada es perpendicular a la dirección del campo magnético y a la dirección de la corriente eléctrica.
- El amperio se define considerando las fuerzas que hay entre corrientes eléctricas.
- Un motor de corriente continua tiene un colector conmutador y una armadura o inducido.

- Los núcleos de las armaduras se hacen laminados para reducir las corrientes de Foucault (corrientes inducidas en el núcleo).
- El motor de corriente alterna básico tiene unos anillos deslizantes, y puede girar de forma síncrona.
- Los galvanómetros de bobina móvil son como motores de corriente continua modificados.
- Los altavoces de bobina móvil son aparatos de corriente alterna que convierten señales eléctricas en sonidos.

10

Inducción electromagnética

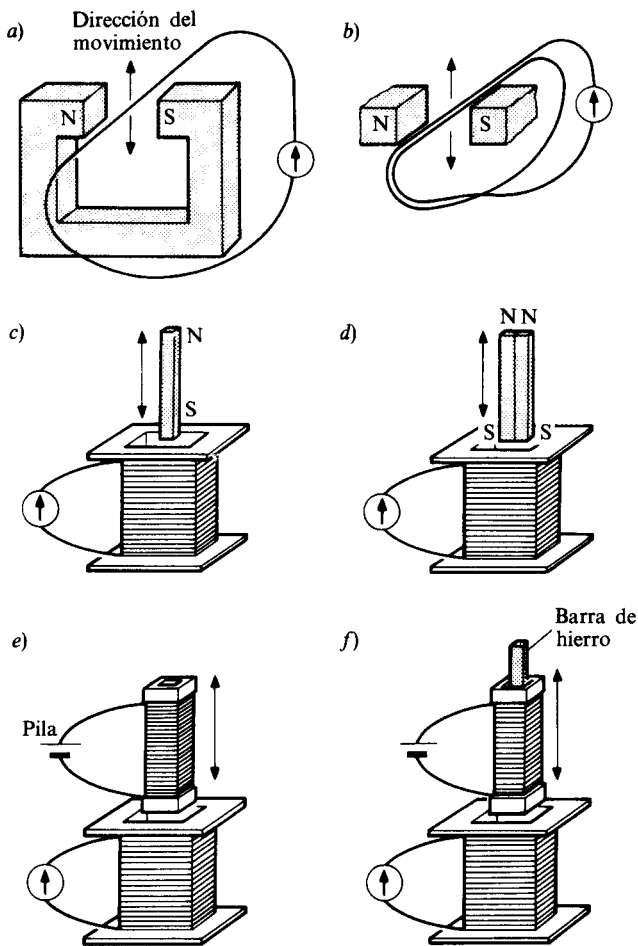
10.1. El efecto «opuesto» al que se da en los motores

En el capítulo anterior se vio que se podía producir un movimiento a partir de un campo magnético y de una corriente eléctrica. El tema de este capítulo es algo así como el efecto contrario, *generar* corriente eléctrica partiendo de un movimiento y de un campo magnético (hay muchos fenómenos en la ciencia que parecen tener asociados otros fenómenos «opuestos» que se pueden producir: electrólisis y células de combustible; micrófonos y altavoces; piezoelectricidad y osciladores de cuarzo). En este caso es el efecto motor y el efecto dinamo o generador los que son «opuestos», y se encontrarán en este capítulo muchas cosas iguales a las descritas en el capítulo 20.

10.2. Experimentos básicos. Ley de Faraday

Las características esenciales de la *inducción electromagnética*, como se denomina este proceso, se pueden observar realizando una serie de experimentos donde se utiliza un equipo básico (Fig. 10.1). Las características comunes de esos experimentos son: 1) un campo magnético generado por un imán o un electroimán; 2) un cable separado o una bobina, y 3) un movimiento relativo entre ellos. En los diagramas *a)* y *b)* el cable se mueve hacia arriba y hacia abajo, en *c)* y en *d)* son los imanes los que se mueven, y en *e)* y en *f)* son las bobinas. En todos los casos la aguja del galvanómetro se mueve hacia un lado y hacia otro cuando hay movimiento.

¿Qué es lo que se induce exactamente debido al movimiento?



- a) Cuando se mueve el cable hacia arriba y hacia abajo se produce una desviación en el galvanómetro.
- b) Cuantas más espiras haya, mayor será la desviación.
- c) Un imán que se mueve entrando y saliendo de un solenoide también produce una desviación.
- d) Cuanto más potente sea el imán y más espiras haya, mayor será la desviación.
- e) El movimiento de un solenoide primario, por el que pasa una corriente, entrando y saliendo de otro secundario provoca una desviación.
- f) Una barra de hierro aumenta el efecto.

Figura 10.1.—Experimentos básicos de inducción electromagnética.

La desviación de la aguja del galvanómetro demuestra la existencia de una corriente eléctrica, pero esta corriente no surge por sí misma, tiene que haber una fuerza electromotriz que mueve las cargas, por lo cual es más exacto hablar de una f.e.m. inducida. Si resulta que a partir de esta f.e.m. aparece una corriente, se deberá a que hay un circuito por el que pueden circular las cargas, y el valor de la intensidad de corriente dependerá de la resistencia que haya en el circuito. Las investigaciones por medio de estos experimentos se llevaron a cabo por Michael Faraday (1791-1867), que resumió sus descubrimientos en forma de ley:

Cuando varía el flujo magnético que atraviesa un circuito, se induce una f.e.m. en dicho circuito, que es proporcional a la velocidad con que varía dicho flujo.

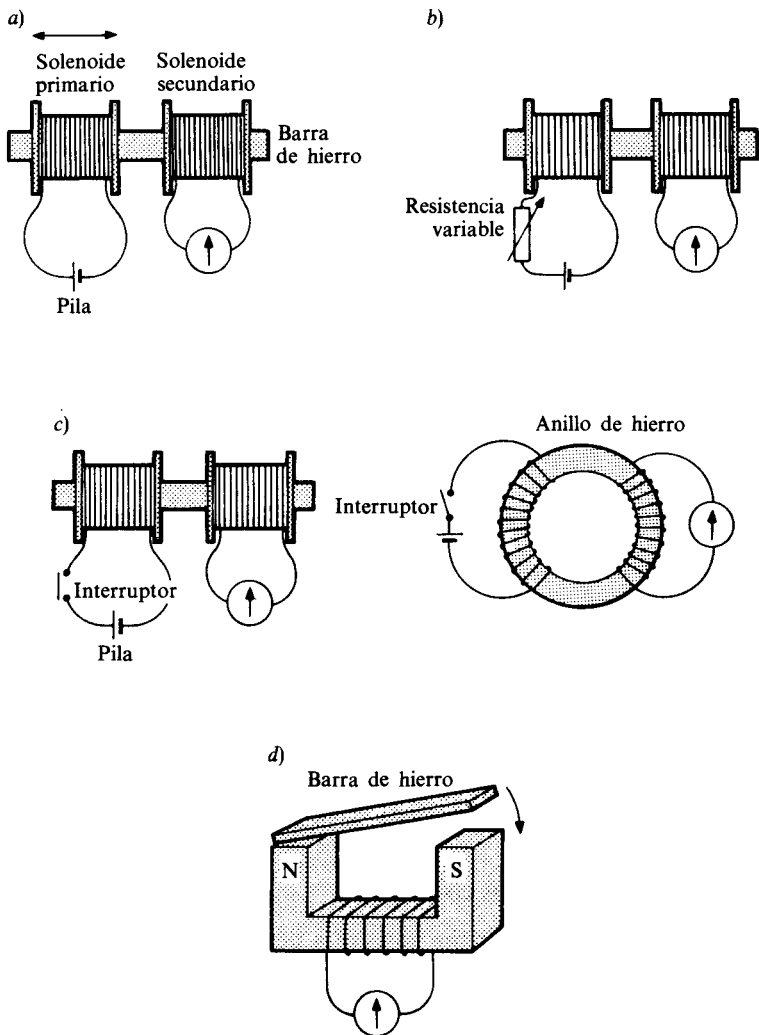
(El flujo magnético a través de una superficie S es el número de líneas magnéticas que atraviesa dicha superficie. Es una magnitud que da una idea del valor del campo magnético y de su dirección en una cierta región del espacio.)

10.3. Otros experimentos sobre inducción electromagnética

Los puntos principales que descubrió Faraday son que debe haber un *cambio* en el campo magnético y que la f.e.m. inducida depende de la *velocidad* con que cambia el campo magnético. En la figura 10.2 aparecen disposiciones más elaboradas donde cambian los campos magnéticos. En cada caso, el galvanómetro marca alguna intensidad de corriente sólo cuando está cambiando el campo, y la causa que produce el cambio también producirá una f.e.m. inducida. Los cambios se pueden realizar, por ejemplo, conectando y desconectando, por lo cual no es necesario que haya un movimiento físico. Se observa que al unir las dos bobinas con un núcleo de hierro se incrementa notablemente el valor de la f.e.m. inducida.

10.4. La bobina inducida

En la figura 10.2c se muestra el fundamento de lo que se denomina bobina de inducción, que sirve para producir una tensión elevada en un circuito secundario cuando conmuta la corriente en un



La variación del campo se puede producir de varias formas:

- Moviendo el solenoide primario.
- Alterando el valor de la resistencia variable.
- Conectando y desconectando el circuito primario.
- Uniendo los polos del imán con una barra de hierro.

Figura 10.2.—Más experimentos sobre inducción electromagnética.

circuito primario. En la figura 10.3 se muestra cómo se puede emplear este efecto para electrificar una cerca para el ganado.

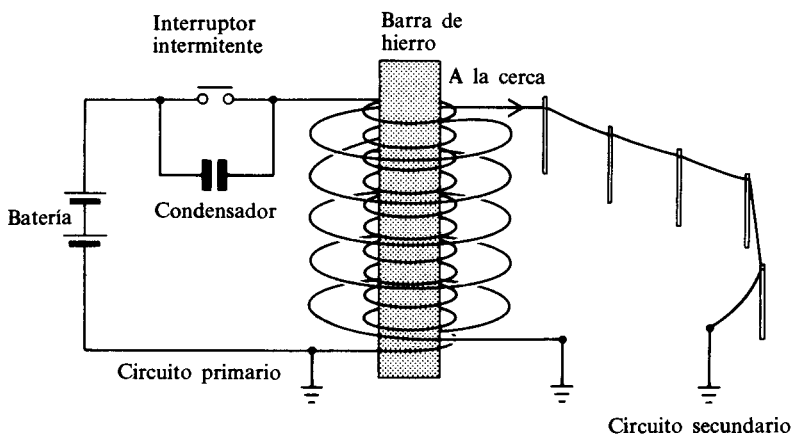


Figura 10.3.—Electrificación de una cerca por medio de una bobina de inducción.

El circuito primario se compone de una batería, un interruptor y una bobina de cable arrollado en una varilla o en una barra (el condensador se pone para evitar chispazos en el interruptor, Apartado 10.13). La bobina primaria está hecha con cable grueso, por lo cual cuando se conecta el circuito se produce una corriente considerable. La bobina del circuito secundario está arrollada directamente en la primaria (pero utilizando cable aislado, por supuesto) y tiene muchas vueltas de cable más fino. La f.e.m. inducida en la bobina secundaria se aplica directamente al alambre de la cerca, que está aislado convenientemente por medio de unos soportes a una altura apropiada para que llegue a la nariz de las vacas. Al conectar el circuito primario se produce una f.e.m. inducida en el secundario de pequeño valor, pero cuando se desconecta se produce un efecto mucho mayor debido al cambio brusco magnético que tiene lugar en la barra de hierro, puesto que pasa de magnetización completa a magnetización nula. Se pueden producir miles de voltios de esta forma, pero en un período corto de tiempo. Si se dispone de un mecanismo que conecte y desconecte el circuito primario de forma intermitente cada tres segundos, por ejemplo, se producirá una tensión elevada en la cerca cada vez que se desconecta el cir-

cuito. Si un animal se pone en contacto con el alambre de la cerca experimentará una corta y suave descarga eléctrica. En las cercas electrificadas se pueden utilizar motores pequeños para conmutar mecánicamente el circuito primario a la frecuencia deseada, pero esta conmutación resulta mucho mejor si se realiza utilizando circuitos eléctricos. Desde el punto de vista del granjero, las cercas electrificadas tienen la gran ventaja de ser fáciles de mover de un sitio a otro.

Una versión parecida pero más elaborada de la bobina de inducción se utiliza para generar la chispa del encendido en los motores de los coches. Para provocar la chispa en las bujías de los motores de los coches se necesita una tensión mucho más elevada que la que puede obtenerse directamente de la batería de 12 V, por lo cual se induce una f.e.m. de la misma forma que la descrita anteriormente. En este caso se complica más porque es necesario sincronizar la generación de las altas tensiones que se aplican a los cuatro cilindros (normalmente hay cuatro) con el movimiento de los pistones, para que la mezcla de aire y gasolina explote en el momento apropiado en cada uno. Esta función se realiza de forma mucho más fiable con sistemas electrónicos que con interruptores, como se ha visto anteriormente.

Observemos que la función del circuito primario en una bobina de inducción es producir un alto grado de magnetización del núcleo de hierro utilizando una corriente de intensidad elevada. Los cables de este circuito deben ser bastante grandes para que pueda pasar la corriente. Por otra parte, en el circuito secundario se induce una f.e.m. en cada espira, por lo cual cuantas más espiras haya mayor será el efecto. Si hay varios cientos de espiras, el cable deberá ser fino para evitar que ocupe demasiado y el volumen sea muy grande, pero la corriente es tanto más baja (proporcionalmente) cuanto más estrechos son los cables. En el apartado 10.9 se volverá a tratar este punto cuando se hable del transformador.

10.5. La dirección de la f.e.m. inducida. Ley de Lenz

Como en el caso del motor eléctrico, donde había una relación entre las direcciones del campo, la corriente eléctrica y la fuerza inducida (Fig. 9.1), también existe una relación entre las direcciones

del campo, del movimiento y de la f.e.m. inducida. Si se utiliza un sistema como el representado en la figura 10.4, se puede hallar esta relación, conociendo la dirección N-S del campo, la dirección del movimiento y utilizando un galvanómetro para saber en qué sentido circula la corriente eléctrica.

Igual que en el caso de los motores, las tres direcciones son perpendiculares entre sí y se pueden recordar utilizando la regla de la mano derecha de Fleming (Fig. 10.5).

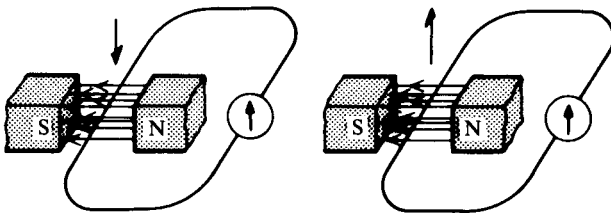


Figura 10.4.—Experimento para establecer la relación entre las direcciones del campo magnético, el movimiento y la f.e.m. inducida.



Figura 10.5.—Regla de la mano derecha, de Fleming.

Es curioso el parecido que existe entre los dos efectos electromagnéticos, el efecto motor y el de la f.e.m. inducida. El sentido común puede llevar a pensar que se trata de lo mismo, pero hay una razón muy importante por la cual deben ser diferentes.

Consideremos de nuevo el efecto motor representado en la figura 10.6. El campo va hacia abajo de N a S, la corriente circula de

A a B y la fuerza hace que la varilla se mueva hacia la izquierda. En cuanto se mueve la varilla, se presenta el efecto básico de inducción que se muestra en la figura 10.6b con el campo de nuevo hacia abajo y el movimiento de AB hacia la izquierda, pero esto quiere decir que la f.e.m. inducida irá de B a A y no de A a B . Este efecto reducirá la corriente en AB y, por tanto, AB dejará de moverse. Si fuera al contrario, que la f.e.m. inducida fuera al revés, de A a B , se incrementaría el valor de la corriente, haciendo que la varilla se moviera aún más deprisa, aumentando más aún el valor de la f.e.m. y a su vez haciendo que la varilla rodara más deprisa, etc. Si ocurriera esto estaríamos incrementando la energía del sistema simplemente por conectar unos cuantos componentes y sin introducir desde fuera ninguna energía adicional. Este tipo de máquinas que generan energía sin tomarla de fuera no existen y la razón en este caso es que el efecto de inducción da como resultado un decrecimiento del movimiento y no un aumento del mismo. Este resultado general se expresa en la ley de Lenz:

La dirección de la corriente inducida es siempre tal que se opone al cambio que la produce.

Observemos que esta ley se refiere a la corriente inducida, no a la f.e.m. Si el circuito estuviera abierto sólo habría f.e.m. inducida, pues no podría haber corriente y, por tanto, no se generaría ninguna fuerza que se opusiera (véase también el apartado 10.11).

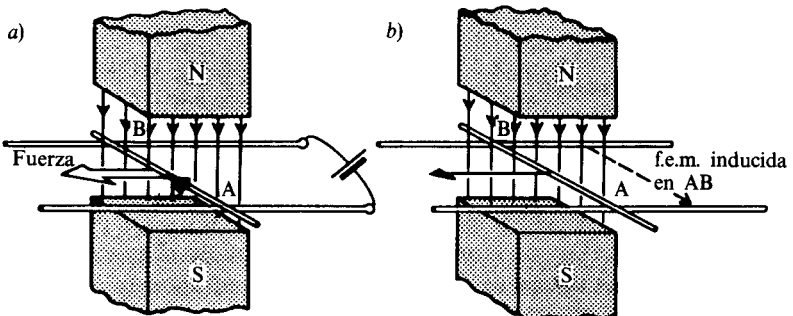


Figura 10.6.—Relación entre el efecto motor y el efecto dinamo.

10.6. Transformadores

Probablemente la aplicación más útil de la inducción electromagnética, aparte de la generación de energía eléctrica, sea el *transformador*. En la figura 10.7 se muestra el principio del transformador; esta figura es similar a la 10.2.

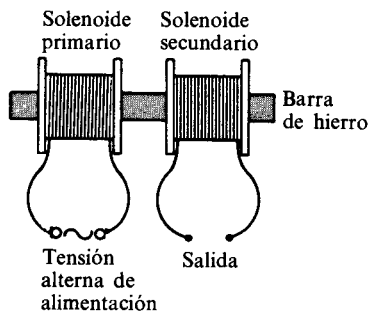


Figura 10.7.—Principio del transformador.

Sólo se induce f.e.m. cuando existe un cambio en el flujo magnético que atraviesa una bobina. Este cambio se puede producir por medio de un movimiento o conectando y desconectando el circuito, pero si el campo se produce por medio de una corriente alterna éste cambiará de valor y de dirección continuamente. Esto tiene como consecuencia la aparición de una f.e.m. inducida que cambia constantemente. El transformador es, por tanto, un aparato de corriente alterna en el cual por medio de una corriente alterna en su entrada se genera una f.e.m. alterna en su salida.

Cuanto más cerca se puedan poner las bobinas una de otra, mejor alcanzará el campo del primario al secundario, es decir, que se «derrochará» menos flujo magnético. El mejor sistema es unir las bobinas por medio de un núcleo de hierro para obtener el máximo aprovechamiento del campo magnético. En la figura 10.8 se muestra cómo se puede llevar a cabo esto en la práctica.

El núcleo de hierro en el que ambas bobinas se arrollan no está hecho de un solo bloque, sino que es *laminado*, es decir, que se compone de muchas capas de hierro aisladas eléctricamente unas de otras por medio de un recubrimiento de barniz que se les da antes de unir las. En la figura 10.9 se muestra una construcción típica. La

razón de que esto se diseñe así, es porque se quiere evitar la pérdida de energía por formación de corrientes de Foucault que circulan en el núcleo de hierro (Ap. 10.10).

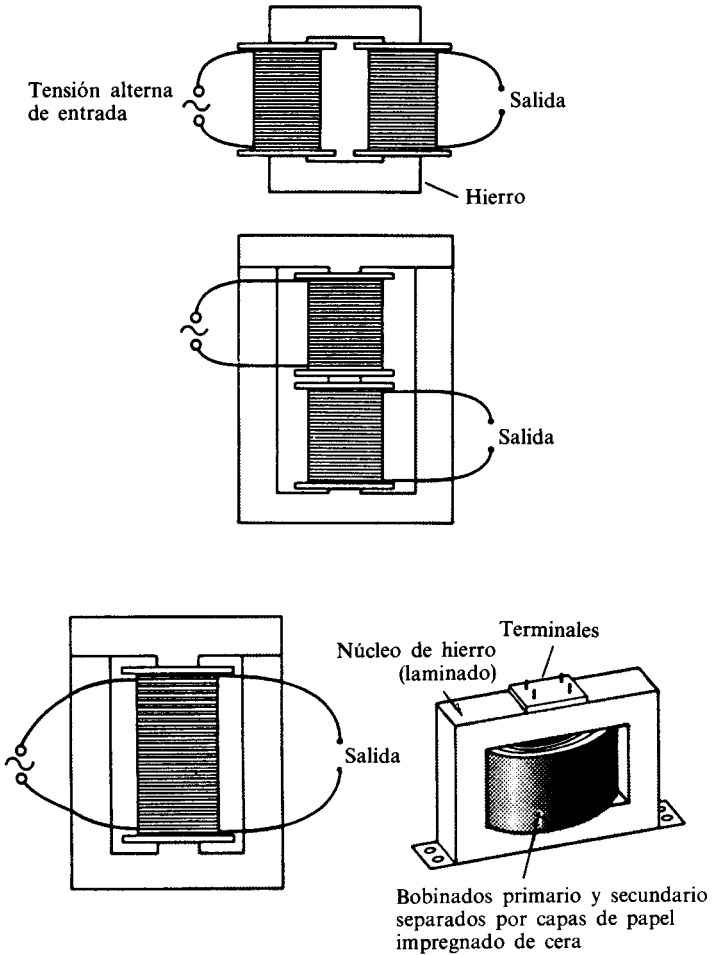


Figura 10.8.—Diseños mejorados de transformadores.

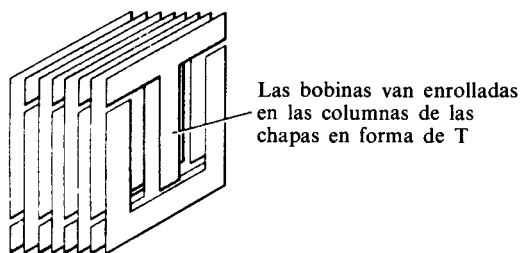
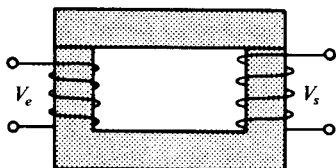


Figura 10.9.—Construcción de un núcleo de transformador con chapas de hierro en forma de U y en forma de T.

10.7. Transformadores elevadores y transformadores reductores

El gran uso de los transformadores en los sistemas eléctricos y electrónicos se debe a que pueden cambiar la magnitud de una tensión alterna, aumentándola o disminuyéndola. El comportamiento ante la tensión viene determinado por el número de espiras que tienen la bobina del primario y la bobina del secundario. En un transformador que tuviera el 100 por 100 de rendimiento se cumpliría que:

$$\frac{\text{Tensión alterna de entrada}}{\text{Tensión alterna de salida}} = \frac{\text{Número de espiras en la bobina primaria}}{\text{Número de espiras en la bobina secundaria}}$$



$$\frac{V_e}{V_s} = \frac{n_1}{n_2}$$

Un transformador elevador aumenta la tensión, por lo que tiene más espiras en el secundario que en el primario, mientras que un transformador reductor reduce la tensión y, por tanto, tiene más

espiras en el primario que en el secundario. Aunque una relación de transformación ($n_1:n_2$) 1:1 no altera el valor de la tensión, puede ser útil para aislar una parte de un sistema de otra. Frecuentemente se utilizan transformadores con dos o más devanados secundarios o con varias tomas en el devanado secundario. En la figura 10.10 se muestran los símbolos para distintos tipos de transformadores, así como algunas aplicaciones de cada uno.

Hay que recordar que los transformadores funcionan sólo con tensiones alternas. La bobina de inducción (Ap. 10.4) es un aparato de corriente continua, pero para que funcione se necesita un interruptor mecánico que haga variar el campo y se genere de esta forma una tensión de salida intermitente.

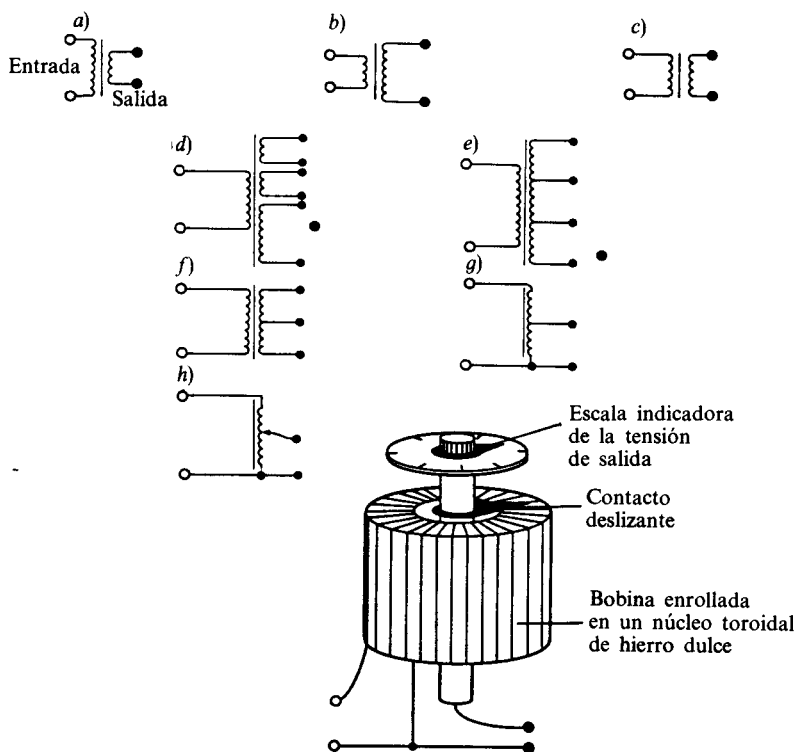
10.8. La importancia de los transformadores

Debido a que los transformadores pueden cambiar el valor de tensiones alternas, aumentándolo o disminuyéndolo, son de los elementos electromagnéticos que más se utilizan. En el capítulo 11 se verá que los transformadores juegan un papel muy importante en la distribución de energía eléctrica, pero también se utilizan mucho en los electrodomésticos y en equipos electrónicos. El alto rendimiento que tienen los transformadores también les caracteriza y tiene como consecuencia su aplicación en muchos usos; hay pocas máquinas que tengan un rendimiento tan alto (del 90 por 100 es normal). Muchos sistemas mecánicos, tales como grúas y tornos, y muchas máquinas, tales como locomotoras y automóviles, sólo llegan hasta el 40 por 100 de rendimiento normalmente.

Debido a esta gran diversidad de usos, hay mucha variedad de tamaños de transformadores, existiendo transformadores de 1 cm en equipos electrónicos y de 5 m en las centrales eléctricas.

10.9. Potencia en los transformadores

Una máquina hecha de hierro y de hilo de cobre no puede generar energía por sí misma, por lo cual la potencia de salida del transformador no puede ser más grande que la potencia de entrada.



- a) Transformador reductor de los que se utilizan en los cargadores de baterías, por ejemplo.
- b) Transformador elevador.
- c) Transformador de relación 1:1, utilizado para aislar una parte de un circuito de alterna de otra.
- d) Transformador con tres devanados secundarios separados: se utiliza para proporcionar las tensiones apropiadas a diferentes componentes en los receptores de televisión y de radio.
- e) Transformador de varias tomas: proporciona diversos escalones de tensión; de este tipo se utilizan en las fuentes de alimentación de los laboratorios.
- f) Transformador con toma intermedia: se obtienen dos tensiones iguales pero de sentido contrario; se utilizan en rectificadores (Cap. 12).
- g) Autotransformador: lleva un único devanado, son los más corrientes los de 125/220 V y se utilizan mucho en el hogar.
- h) Autotransformador variable: proporciona cualquier tensión de salida hasta un límite máximo de la tensión de entrada

Figura 10.10.—Tipos de transformadores y sus aplicaciones.

En el caso ideal, la potencia de entrada y la de salida son iguales, es decir:

$$I_e \times V_e = I_s \times V_s$$

pero esto supone considerar que el rendimiento es del 100 por 100 y que no se «pierde» energía en el proceso. En la práctica hay una pérdida (cambio) inevitable de energía que reduce el rendimiento del 100 por 100:

- a) Pérdidas en el cobre: se produce energía calorífica por el paso de corriente eléctrica tanto en el devanado primario como en el secundario. I^2R para cada bobina (Ap. 8.2).
- b) Pérdidas en el hierro: calentamiento provocado por las corrientes de Foucault (Ap. 10.10) que aparecen en el núcleo debido al cambio constante de magnetización en el hierro mismo.
- c) Pérdida de flujo: hay una parte del flujo magnético que no llega a los devanados primario y secundario.

Por tanto, la potencia de salida es algo menor que la potencia de entrada, pero con un diseño adecuado del transformador, se puede llegar a obtener un 90 por 100 de rendimiento.

En un transformador elevador se aumenta la tensión, pero como el producto IV permanece constante, la intensidad de la corriente disponible debe disminuir. Por esta razón, no es necesario que el cable utilizado en el devanado secundario de un transformador elevador sea tan grueso como el cable del devanado primario.

10.10. Corrientes de Foucault

La inducción electromagnética aparece cuando hay una variación de flujo magnético generado por un imán o por una corriente eléctrica, y se induce una f.e.m. en otro circuito o en un conductor.

La f.e.m. inducida provoca una corriente eléctrica y este efecto se utiliza en generadores, dinamos y transformadores. Sin embargo, también se puede inducir una f.e.m. en cualquier conductor que se encuentre en el campo de acción del flujo magnético, no sólo en las espiras de la bobina del secundario, sino también en el núcleo

de hierro mismo del transformador, por ejemplo. Si ocurre esto, se perderá energía en el circuito secundario y, por tanto, se reducirá el rendimiento. En la figura 10.11 se muestra una forma sencilla para minimizar el efecto de las corrientes de Foucault en los transformadores, que se generan por la f.e.m. inducida que aparece en el hierro, provocando un calentamiento del núcleo.

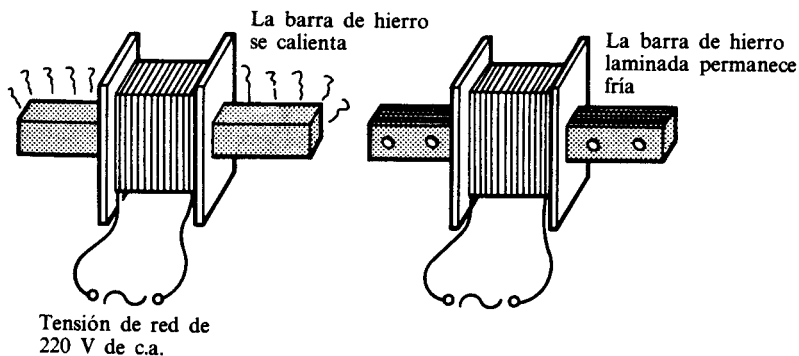


Figura 10.11.—Utilización de un núcleo laminado para minimizar el calentamiento debido a las corrientes de Foucault.

Haciendo el núcleo de hierro con chapas aisladas en vez de hacerlo de una sola pieza, se mantienen sus propiedades magnéticas, pero se evitan en gran medida las corrientes de Foucault debido a la gran resistencia que existe entre unas chapas y otras. Los núcleos de los transformadores se fabrican con chapas de metal (Fig. 10.9), y el núcleo de una bobina de inducción (Fig. 10.3) debería estar constituido por un conjunto de hilos finos de hierro en vez de ser una única barra.

10.11. Aplicaciones de las corrientes de Foucault

Amortiguación en el galvanómetro. En el galvanómetro de bobina móvil (Fig. 9.14) la bobina está arrollada en un marco de aluminio en vez de estarlo en uno de plástico para que se formen corrientes de Foucault. El marco actúa como una bobina de una sola espira, y cuando se utiliza el instrumento este marco se mueve, induciéndose en él una f.e.m., la cual provoca la circulación de una

corriente por el marco que tiene una dirección, tal que se opone al movimiento de la bobina (ley de Lenz, Ap. 10.5). De esta forma se amortigua el movimiento de la bobina, llegando la aguja a su posición final suavemente, sin pasarse y sin oscilar. La corriente de Foucault que se genera en el marco sólo existe mientras se está moviendo la bobina y no afecta a la desviación final de la aguja.

Freno electromagnético. En la figura 10.12 se muestra el principio del freno electromagnético. Las locomotoras eléctricas pueden utilizar este fenómeno cuando bajan por pendientes muy escarpadas. Cuanto más deprisa vaya el tren, mayor será el efecto producido por el freno, justo lo que se necesita.

El disco de aluminio gira libremente sobre su eje...

...en un campo magnético sólo gira media vuelta.

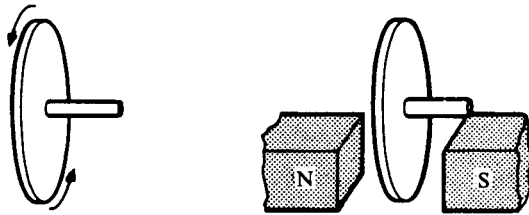


Figura 10.12.—Principio del freno electromagnético.

Motores de inducción. En la figura 10.13 se explica el fundamento de los motores de inducción de corriente alterna, que son probablemente los más utilizados en ingeniería. El campo magnético que se mueve induce una f.e.m. en el disco, generándose corrientes de Foucault que se oponen al movimiento del campo (es decir, el disco intenta alcanzar al campo o es arrastrado por él). En la figura 10.14 se muestra una aplicación sencilla de este fenómeno en los velocímetros de los coches.

Una aplicación más sofisticada consiste en construir motores de inducción en los cuales hay un campo magnético rotatorio que arrastra a un rotor central (Fig. 10.15). El campo giratorio se genera utilizando una fuente de tensión alterna monofásica, resultando dos pares de polos, siendo necesario un condensador para desfazar la tensión, o bien utilizando una fuente de tensión trifásica, resultando tres pares de polos; esta última forma es la más utilizada sobre

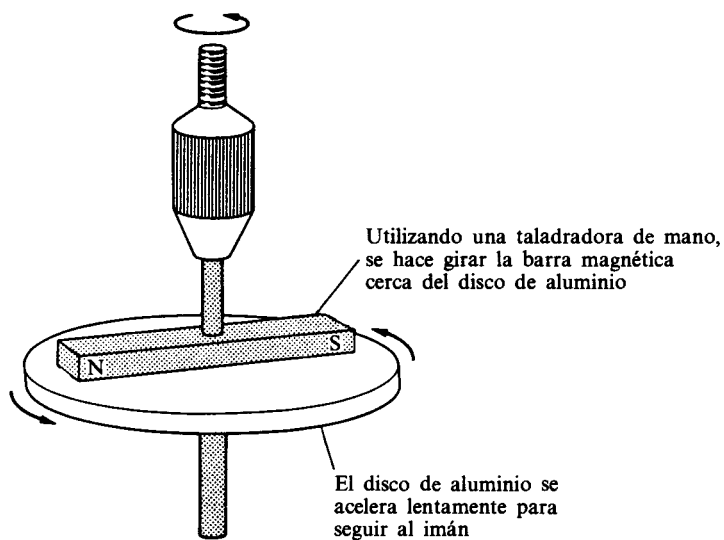


Figura 10.13.—Principio del motor de inducción.

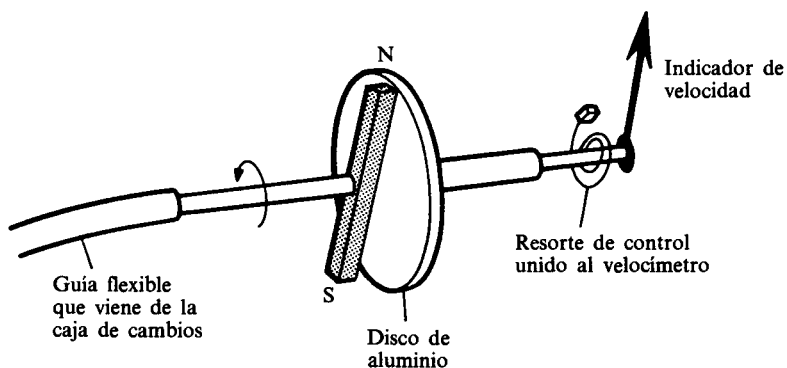


Figura 10.14.—Utilización del efecto de inducción en el velocímetro de un coche.

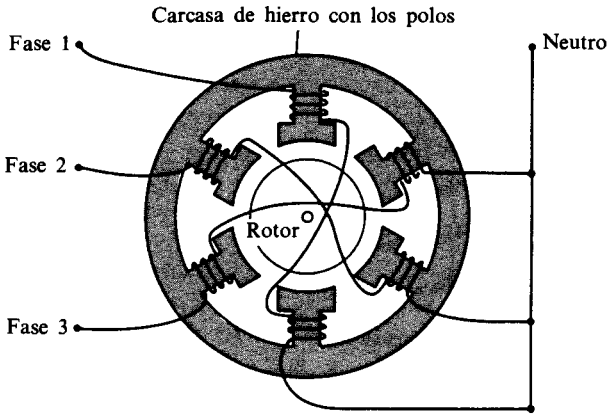


Figura 10.15.—Motor de inducción trifásico.

todo en motores grandes. En los capítulos 11 y 13 se tratarán estos puntos con más detalle.

La ventaja principal de los motores de inducción es que no tienen contactos eléctricos unidos a partes móviles (escobillas).

Horno de inducción. Las corrientes de Foucault se pueden utilizar para calentar metales hasta su punto de fusión; este efecto se utiliza en el horno de inducción. El metal se encuentra dentro de un crisol incombustible y al pasar una corriente de valor elevado por los tubos de cobre se inducen corrientes de Foucault en el metal. En la figura 10.16 se representa el diseño básico.

Se necesitan grandes cantidades de energía para que este tipo de horno funcione como es debido y además es necesario enfriar por medio de agua que circula por los tubos de cobre.

10.12. Autoinducción

En cualquier sistema electromagnético en el que haya variación de campo magnético, se inducirá una f.e.m. en todos los conductores que se encuentren cerca (como ya se dijo en el apartado 10.10), incluyendo los devanados primarios de una bobina de inducción o de un transformador. En la figura 10.17 se muestra un circuito sencillo donde aparece esta *autoinducción*.

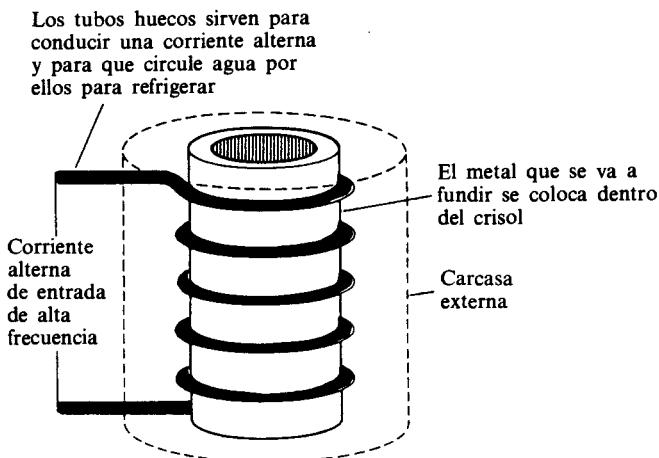


Figura 10.16.—Horno de inducción.

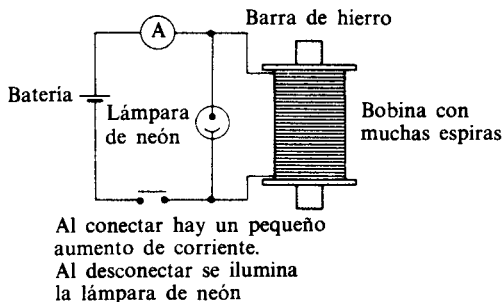


Figura 10.17.—Demostración del fenómeno de autoinducción.

Cuando se conecta el circuito, la corriente crece lentamente debido a que la f.e.m. inducida en la bobina se opone al crecimiento de la corriente. Al apagar o desconectar el circuito, sin embargo, la lámpara de neón dará un fogonazo. Esto se debe a la variación brusca del campo magnético, que provoca una f.e.m. inducida alta. La lámpara de neón puede necesitar una tensión de 200 V para dar el fogonazo de luz. Si no estuviera la lámpara, se produciría un chispazo grande entre los contactos del interruptor cuando se abre el circuito, y una descarga eléctrica desagradable si alguien los toca accidentalmente.

Una forma de evitar que se genere una f.e.m. inducida muy grande es conectar un condensador de valor elevado (en la figura 10.3 aparece uno en el circuito de una bobina de inducción). En todos los equipos donde haya inducción electromagnética se deben utilizar protecciones de este tipo para evitar que haya chispazos cuando se apagan (en los capítulos 16 y 17 se tratan más temas sobre los circuitos inductivos).

10.13. Fuerza contraelectromotriz (f.c.e.m.) en los motores de corriente continua

En el capítulo 9 se aplicaron con cierto detalle los principios de los motores de corriente continua, pero no se tuvo en cuenta el efecto de autoinducción que se produce en las bobinas que hay arrolladas en la armadura (por supuesto, la armadura de hierro debe ser laminada, igual que el núcleo de los transformadores, para reducir las corrientes de Foucault). Cuanto más rápidamente gira el motor, más grande es la f.e.m. inducida en las propias bobinas, y más se opone a la f.e.m. que hace girar el motor (de ahí su denominación de fuerza contraelectromotriz). Por ejemplo, un motor diseñado para funcionar con una alimentación de 50 V, puede tener una f.c.e.m. de hasta 47 V cuando funciona a su velocidad nominal. Con una resistencia de 1Ω en la bobina, la corriente que se produce es de 3 A en el caso anterior, pues la tensión resultante es de 3 V.

Sin embargo, cuando se conecta el motor, arranca partiendo de velocidad nula y no hay f.c.e.m., por lo cual las bobinas soportan una tensión de 50 V, produciéndose una corriente de hasta 50 A. Lo que se necesita para resolver el problema es una resistencia que varíe su valor en función de la velocidad que tenga el motor. En la figura 10.18 se muestra una forma para realizar esto.

Obsérvese que se utiliza un electroimán para mover el brazo hasta la posición deseada y un muelle para que el brazo vuelva a su posición inicial cuando se desconecta el motor. Este tipo de circuito de control electromecánico sirve para ilustrar la idea de utilizar una resistencia que disminuya su valor progresivamente según va aumentando la velocidad del motor. Este mismo efecto se puede conseguir utilizando sistemas de control electrónicos, que no tienen partes móviles y que no requieren mantenimiento.

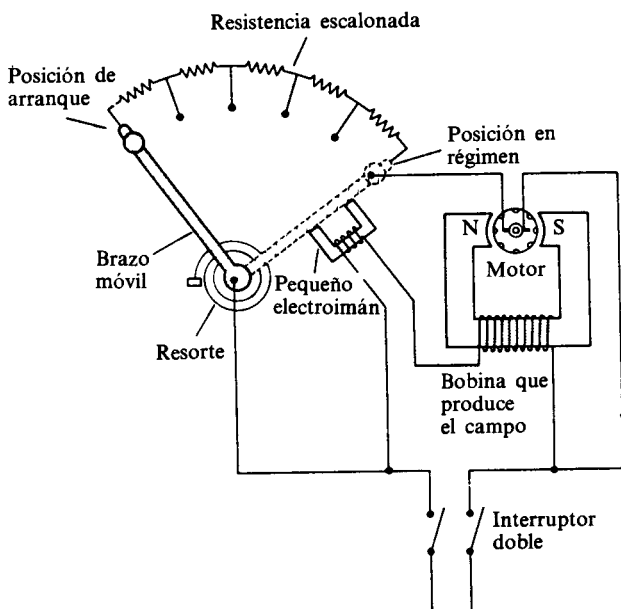


Figura 10.18.—Sistema de arranque de un motor de corriente continua por medio de una resistencia variable.

10.14. Resumen

- Cuando existe un movimiento relativo entre un conductor por el que circula una corriente eléctrica y un campo magnético, se induce una f.e.m.
- La dirección de la f.e.m. inducida es perpendicular a las direcciones del campo magnético y del movimiento.
- La dirección de la corriente inducida es siempre tal que se opone al cambio que la produce.
- Las bobinas de inducción tienen un sistema mecánico para producir una corriente que cambia de valor.
- Los transformadores funcionan sólo con corriente alterna.
- En un transformador siempre se cumple que:

$$\frac{V_e}{V_s} = \frac{\text{Número de espiras en la bobina primaria}}{\text{Número de espiras en la bobina secundaria}}$$

- En un transformador ideal se cumple: $I_e V_e = I_s V_s$.
- En los transformadores se pierde energía debido al calentamiento, a las corrientes de Foucault y la magnetización del núcleo.
- El alto rendimiento que tienen los transformadores influye en que se utilice corriente alterna en la distribución de energía eléctrica.
- Las corrientes de Foucault surgen en cualquier conductor que se encuentre cerca de un campo magnético que varía.
- En la industria se utilizan mucho los motores de inducción.
- El fenómeno de autoinducción puede producir chispazos.
- En los motores de corriente continua se genera una fuerza contraelectromotriz.

11

Generación de corriente alterna y de corriente continua

11.1. Planteamiento del problema

Disponer de un sistema fiable y seguro que permita utilizar la energía eléctrica en el hogar, en el comercio y en la industria se da por supuesto en los países avanzados y se necesita en muchos países en desarrollo.

Las necesidades de los consumidores son muy variadas, pues éstos pueden ser desde pequeñas familias hasta grandes complejos industriales distribuidos por todo el país. Cada uno necesita su propio suministro eléctrico, apropiado para su demanda y a veces a un voltaje particular, independiente de otros usuarios siempre que sea posible, y que esté disponible las veinticuatro horas del día. Además, es preferible que los cables de distribución no estén a la vista y que exista un sistema interconectado que no falle cuando se estropea la central eléctrica local. Deben existir picos de demanda de energía eléctrica, dependiendo del tiempo que haga, del momento del día que sea, o de acontecimientos especiales. El suministro debe ser homogéneo en todo el país, aunque las grandes ciudades y las áreas industriales puedan tener prioridad en casos de emergencia o en circunstancias especiales.

Todo esto sólo se puede llevar a cabo con una industria eléctrica potente y una organización comercial de gran envergadura, disponiendo de miles de personas y de materia prima en cantidades masivas para poder distribuir miles de millones de vatios de energía eléctrica.

11.2. Generadores y dinamos

El principio de funcionamiento de un generador o de una dinamo se basa en la generación de una f.e.m. debido al movimiento de un cable conductor en el seno de un campo magnético. En la figura 11.1 aparece un generador básico; compárelo con el dibujo de la figura 9.7.

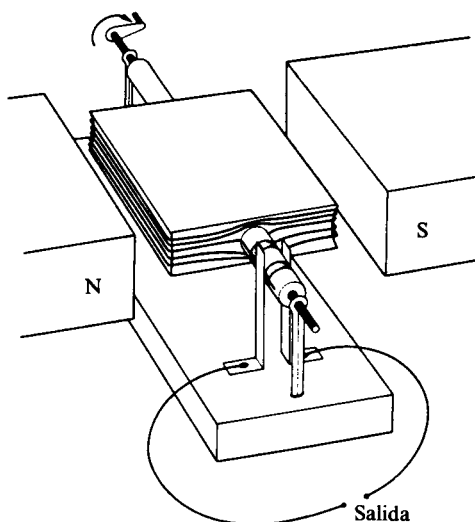


Figura 11.1.—Generador básico.

La construcción de un generador de corriente continua es idéntica a la de un motor de corriente continua, incluido el colector, pero en el generador hay un movimiento mecánico del mismo para producir electricidad, mientras que el motor se mueve por la acción de una corriente eléctrica. En la figura 11.2 se representa la bobina en dos posiciones cuando está girando. En (a) el flujo magnético que pasa a través de la bobina cambia tanto más rápidamente cuanto más grande sea la velocidad con que las caras de la bobina cortan las líneas de campo magnético (aunque en el instante representado el flujo que atraviesa la bobina es cero). En (b), sin embargo, el flujo que atraviesa la bobina es más grande, pero no está variando cuando la bobina se encuentra en este punto porque no

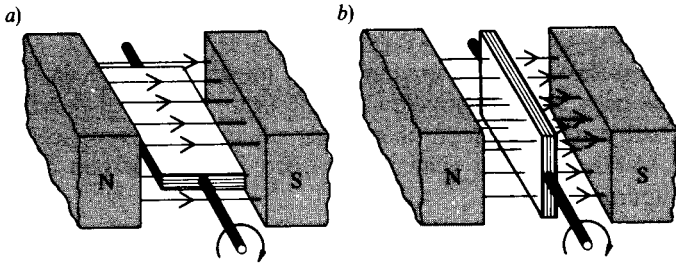


Figura 11.2.—Posiciones de la bobina cuando: a) la f.e.m. inducida es máxima, y b) cuando es cero.

corta ninguna línea de flujo. En (a) la f.e.m. inducida será máxima, pero en (b) será cero. Por tanto, la f.e.m. que hay entre los terminales de la bobina será alterna, como se muestra esquemáticamente en la figura 11.3. para los casos de funcionamiento en continua y en alterna.

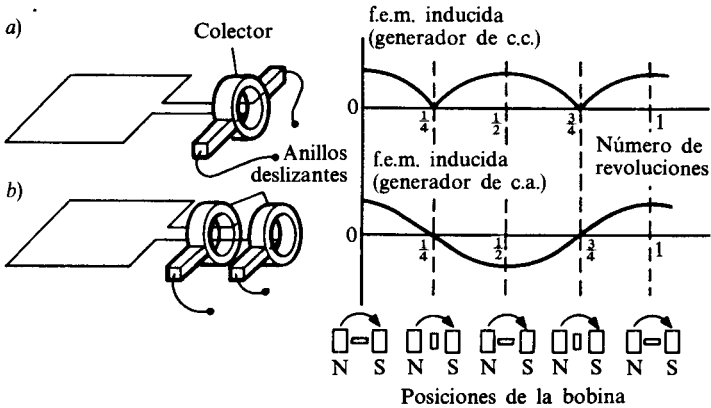


Figura 11.3.—f.e.m. que se obtiene en una única bobina de un generador cuando: a) funciona en continua, y b) en alterna.

11.3. Generadores comerciales

El diseño de generadores comerciales es más complejo que el modelo simple de laboratorio y supone disponer de polos cóncavos, un electroimán en lugar de un imán permanente, varias bobinas

nas de cable conectadas en serie y alojadas en un núcleo de hierro laminado, y escobillas de carbón para los contactos del colector (Fig. 11.4). Estas características son muy parecidas a las de los motores eléctricos (Ap. 9.5) y a veces se puede utilizar la misma máquina como motor o como generador.

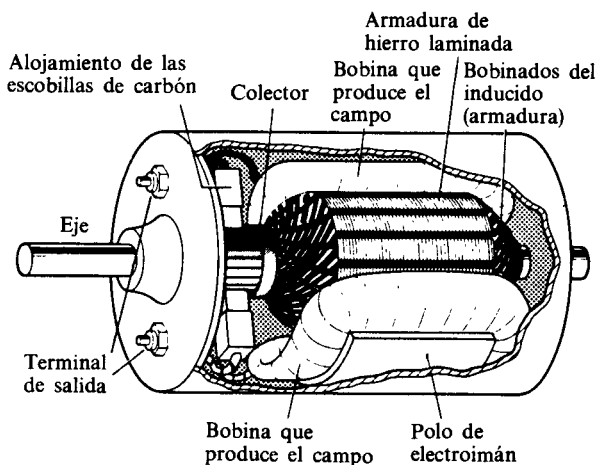


Figura 11.4.—Detalles de un generador comercial.

11.4. La dinamo de bicicleta

Un tipo de generador muy común es el que llevan las bicicletas para alimentar las bombillas de las luces; suele llevar una ruedecita moleteada que gira cuando una de las ruedas de la bicicleta gira, pues roza contra ella (Fig. 11.5a). Aquí se utiliza un imán permanente y la bobina está arrollada en una armadura de hierro. Se ponen como contactos unos anillos deslizantes que permiten sacar las conexiones al exterior. La carcasa de la dinamo sirve como contacto, es decir, todas las partes metálicas de la bicicleta (ésta es la razón de que sólo se utilice un cable para conectar la bombilla a la dinamo, pues el otro conductor lo forman las partes metálicas de la bicicleta).

La f.e.m. que se obtiene a la salida de este tipo de dinamo es alterna, pero no varía suavemente como la tensión de red, puesto que tiene altibajos en ciertos puntos del giro de la armadura. En

la figura 11.5b se muestra un gráfico de la f.e.m. en función del tiempo correspondiente a la salida de una dinamo; esto se podría ver con un osciloscopio (Ap. 6.8).

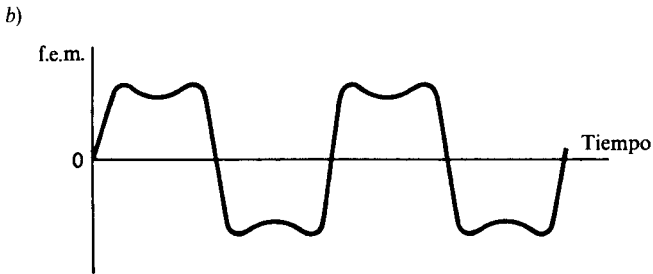
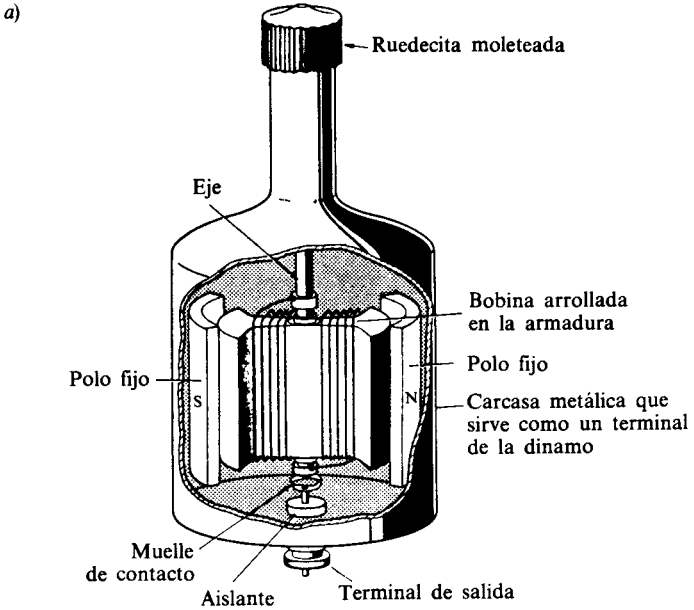


Figura 11.5.—Estructura de una dinamo de bicicleta y f.e.m. que genera.

11.5. Generadores de las centrales eléctricas

Los grandes generadores que producen decenas de megavatios de potencia se diseñan según un principio diferente de los descritos anteriormente. En lugar de utilizar el campo magnético de un imán o de un electroimán y unas bobinas en las que se induce la f.e.m. al girar dentro del campo, se utiliza una disposición contraria: el campo magnético gira y las bobinas permanecen quietas. En la figura 11.6 se muestra uno de estos generadores seccionado. El rotor gira movido por turbinas de vapor en la central eléctrica y lleva sus propias bobinas alimentadas por una fuente de continua aparte para magnetizarlas. Cada par de «brazos» del rotor está magnetizado con polos N-S alternativamente, por lo cual los polos N y S pasan cerca de cada bobina del estátor cuando el rotor está girando. La figura corresponde a un alternador *monofásico*, donde todas las bobinas están conectadas en serie para dar una única tensión de salida.

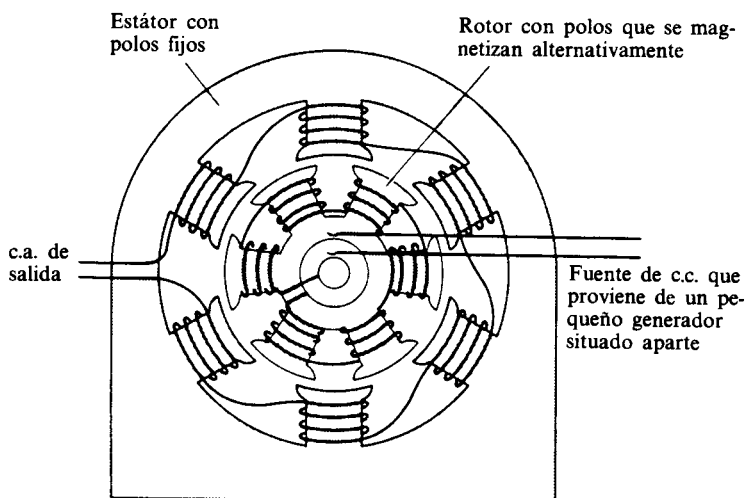


Figura 11.6.—Generador de alterna monofásico.

En una disposición más compleja se utilizan tres salidas diferentes que provienen de pares opuestos de bobinas, produciéndose tres

tensiones alternas de salida desfasadas entre ellas (Ap. 13.7). En la figura 11.7 se representa un esquema del sistema de generación de energía eléctrica utilizando una turbina para mover el rotor del generador.

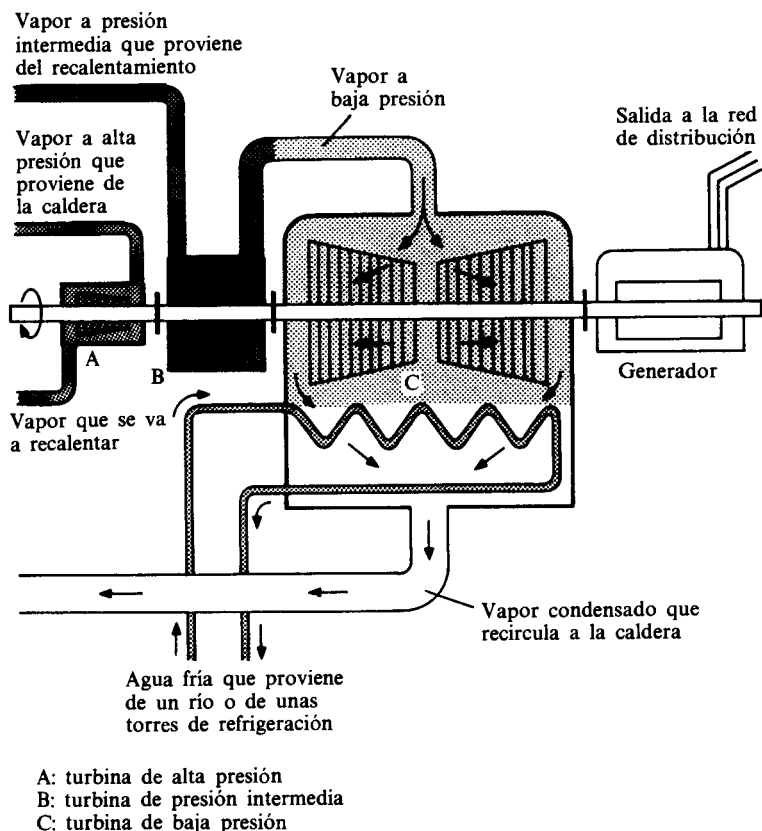


Figura 11.7.—Características principales de un sistema de generación con turbina de una central eléctrica.

11.6. Resumen

- Los generadores de electricidad son parecidos en su estructura a los motores eléctricos.
- En los grandes generadores de alterna (alternadores), el campo magnético gira cerca de las bobinas que se encuentran fijas.
- Los generadores de alterna (alternadores) pueden producir tensiones de salida monofásicas o trifásicas.

12

Conversión de corriente alterna a corriente continua

12.1. Planteamiento del problema

Hay muchos aparatos, tales como magnetófonos, calculadoras, receptores de radio y de televisión, que funcionan con tensiones y corrientes continuas, pero se deben conectar a la red de alterna que hay disponible. Por tanto, se necesita cambiar la tensión alterna a tensión continua y, en la mayoría de los casos, reducir bastante el valor de la tensión.

Los transformadores pueden cambiar fácilmente el nivel de tensión alterna, por supuesto, pero para convertir la tensión alterna en tensión continua se necesita algún dispositivo que conduzca en un solo sentido y que elimine la mitad de la tensión alterna, suavizando después los altibajos que quedan en torno a un valor constante. El proceso completo se denomina *rectificación*.

12.2. Rectificación de media onda

El *diodo* es un elemento semiconductor que conduce la corriente eléctrica mucho más fácilmente en un sentido que en el otro (Aps. 4.3 y 19.3). La mayoría de los diodos son bastante pequeños, de 1 cm de largo aproximadamente y de 2 ó 3 mm de ancho, totalmente aislados herméticamente en cápsulas de las que salen dos contactos metálicos para poderlos conectar en los circuitos (Fig. 12.1).

La curva típica de conducción tensión-corriente de un diodo muestra que éste tiene una resistencia baja en el sentido directo,

pero posee una resistencia mucho más alta en el sentido inverso (Fig. 12.2). Obsérvese que hay diferentes escalas en el gráfico, que indican una resistencia directa de unos 10Ω y una resistencia inversa de unos $100 \text{ M}\Omega$.

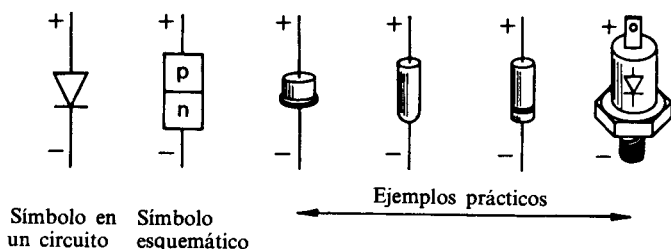


Figura 12.1.—Tipos de diodos y símbolos.

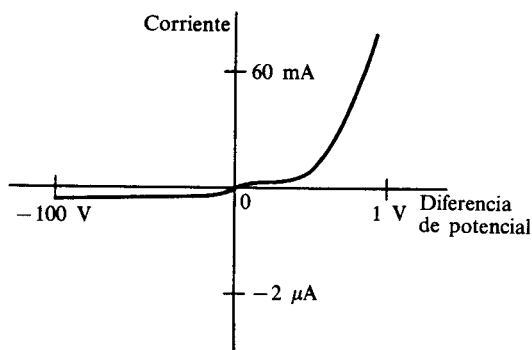


Figura 12.2.—Curva característica de conducción de un diodo.

Con un circuito sencillo donde se incluye un diodo se puede comprobar que éste conduce fácilmente en un sentido, pero que casi no conduce en el otro (Fig. 12.3).

El circuito rectificador más simple está formado por un transformador reductor, una resistencia y un diodo (Fig. 12.4) conectado a una carga de resistencia R , que puede ser un motor de corriente continua, por ejemplo.

En la figura 12.5 aparecen las tensiones de entrada y de salida

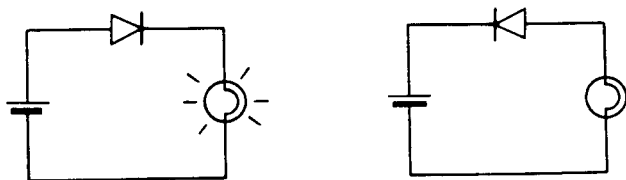


Figura 12.3.—El diodo conduce sólo en un sentido.

tal y como se verían en la pantalla de un osciloscopio. Sólo hay una diferencia de potencial en la resistencia cuando conduce el diodo en sentido directo, suprimiéndose casi completamente la mitad negativa de la tensión alterna original. Es cierto que la tensión de salida se encuentra por encima de la línea del cero, pero desde luego no es constante; se puede decir que es una mezcla de tensión alterna y continua, o que es una tensión continua fluctuante.

Este tipo de rectificador básico se podría utilizar como cargador de baterías o para un tren o un coche de juguete, donde lo único que se necesita es que la tensión sea unidireccional. Este sistema elimina la mitad de la entrada de alterna, bloqueándola. Por eso este sistema se denomina *rectificador de media onda*.

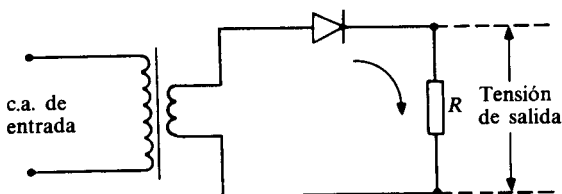


Figura 12.4.—Circuito rectificador básico.

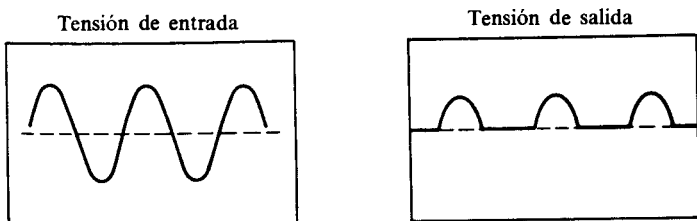
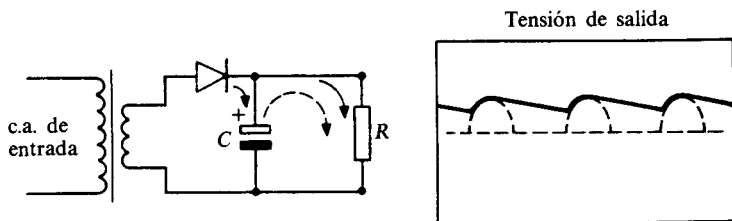


Figura 12.5.—Rectificación de media onda.

12.3. Rectificación de media onda con condensador

Si se coloca un «condensador» en paralelo con la resistencia (Figura 12.6) se puede obtener una tensión de salida más suave, incluso con un rectificador básico de media onda.

Cuando el diodo conduce, el condensador empieza a cargarse y después de unos ciclos alcanza una tensión cercana al valor de pico de la tensión alterna. Durante los tramos negativos, cuando el diodo no conduce, el condensador se va descargando haciendo circular una corriente a través de la resistencia y disminuyendo la tensión hasta el siguiente período positivo que empieza a cargarse de nuevo. El condensador actúa como un depósito, que se va rellenando periódicamente, pero que también se va vaciando, fluctuando el nivel en este depósito, pero muy suavemente. La diferencia de potencial en el condensador y en la resistencia es mucho más constante que en el caso de media onda únicamente. Lo que ocurre es que se vacía más lentamente que se rellena (véase también el capítulo 15).



- El diodo conduce a través de R y el condensador C se carga
- El diodo no conduce, pero la tensión en C hace que haya una corriente a través de R

Figura 12.6.—Rectificador de media onda con condensador.

12.4. Rectificación de doble onda

Para aprovechar totalmente la tensión de entrada alterna sería mejor, obviamente, si se pudiera utilizar la parte del ciclo negativo de igual forma que se utiliza la del ciclo positivo. En particular, sería deseable que la parte negativa se volviera positiva en vez de ser bloqueada, llenando los huecos que se producen con el circuito de media onda.



Hay dos formas de hacer esto (Fig. 12.7), una utilizando dos diodos y un transformador con toma media y la otra utilizando cuatro diodos. Las dos formas tienen como consecuencia que la corriente pase siempre en un solo sentido para la resistencia. En el último caso, que es el que más se utiliza, la corriente pasa alternativamente por *PABQ* y por *QABP*.

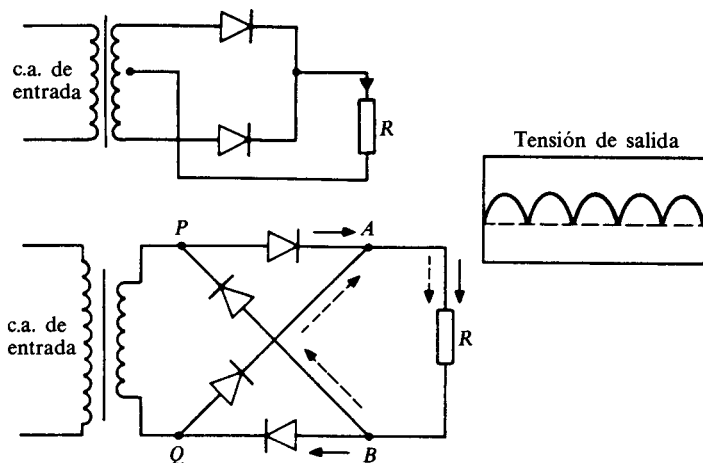


Figura 12.7.—Circuitos rectificadores de doble onda.

El circuito de los cuatro diodos se puede comprar como una única unidad, donde vienen marcados los contactos de entrada de tensión alterna y los de salida de continua (pone + y -).

12.5. Rectificación de doble onda con condensador

Si se añade un condensador al circuito rectificador de doble onda, tiene el mismo efecto que en el otro circuito de media onda, pero como ahora el efecto de rellenado ocurre dos veces en cada ciclo de la tensión alterna, la tensión rectificadora (y la corriente) es más constante que en el caso de la media onda (Fig. 12.8).

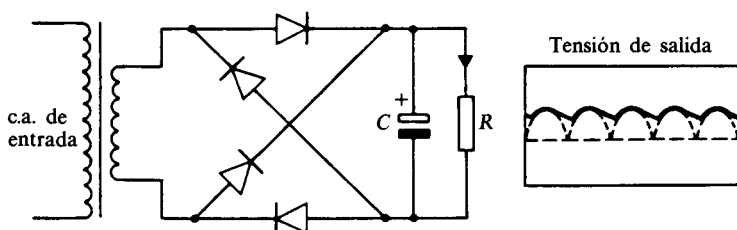


Figura 12.8.—Rectificador de doble onda con condensador.

12.6. Eliminación del rizado

Incluso utilizando un condensador en la rectificación de doble onda la salida no es muy constante, hay un «rizado» en el nivel de continua (de tensión y de intensidad).

En muchas aplicaciones esto no es importante; pero, por ejemplo, en los circuitos de radio o de televisión estos pequeños cambios en la tensión de alimentación rectificadas pueden ser amplificados y producir un zumbido molesto de 50 Hz o de 100 Hz (media onda o doble onda).

En la figura 12.9 se muestra una solución para eliminar casi completamente el rizado, utilizando dos condensadores y una bobina o *choke* (véase el capítulo 16). La bobina se opone al cambio de la corriente (Ap. 10.5) y ayuda a mantener el nivel de salida constante.

En aplicaciones de alta calidad se pueden utilizar filtros más elaborados que eliminan el rizado remanente hasta el punto de no ser detectados.

Obsérvese que este último circuito se ha dibujado con los componentes separados y conectados individualmente a las líneas de (+) y de (-). En la práctica, por supuesto, se pueden utilizar puntos de conexión comunes, siempre que sea posible o placas de circuito impreso donde ya hay algunas conexiones hechas y se pueden montar en ellas directamente los componentes.

En la figura 12.9 se muestran unos valores típicos de los componentes, dependiendo la elección de los valores exactos de la aplicación y de la corriente que se necesite obtener del rectificador. La tensión viene determinada al elegir el transformador.

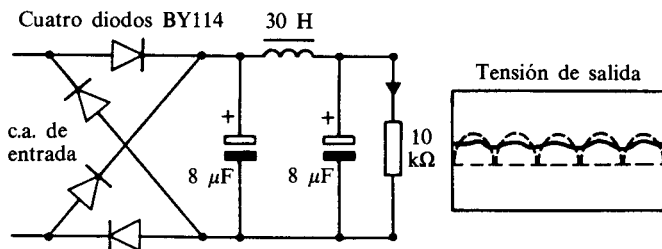


Figura 12.9.—Rectificador de doble onda con filtro.

El osciloscopio es un buen ejemplo de aplicación de los rectificadores. El cañón de electrones funciona con unos pocos voltios de alterna necesarios para calentar el filamento, pero el cátodo, la rejilla y los ánodos requieren voltajes que varían entre -30 V y 2.000 V . Para que funcione bien el instrumento se necesita un único transformador con varios bobinados separados, tanto elevadores como reductores, y circuitos rectificadores apropiados.

12.7. Adaptadores en lugar de pilas

En los equipos portátiles y transistorizados, que tanto desarrollo están teniendo actualmente, se utilizan pilas secas como sistema de alimentación eléctrica. Normalmente la tensión que se necesita se encuentra comprendida entre 3 V y 9 V , y la corriente no es muy grande, por lo cual las pilas secas constituyen una fuente de electricidad adecuada. Como producto opcional, muchos fabricantes ofrecen con la televisión portátil, el magnetófono o incluso la calculadora, un adaptador para enchufar a la red, eliminando el uso de las pilas cuando se desea. Este adaptador, por supuesto, se compone de un transformador y de un rectificador que van montados en una pequeña caja, y está diseñado para proporcionar la tensión adecuada (continua) por medio de un enchufe especial.

12.8. Resumen

— La rectificación es el proceso de conversión de corriente alterna a corriente continua (y tensión).

- En la rectificación de media onda se utiliza un único diodo.
- En la rectificación de doble onda se utilizan dos o cuatro diodos.
- Una tensión rectificada se puede suavizar utilizando un condensador.
- El rizado en una tensión rectificada se puede reducir por medio de una bobina o *choke*.

13

Distribución y utilización de la electricidad

13.1. Distribución de energía eléctrica

La energía eléctrica generada en las centrales eléctricas se distribuye, por medio de una red de líneas interconectadas, a las casas y a las fábricas. Esta distribución se realiza en alta tensión, a 220 kV o 380 kV (son tensiones normales en España). Después, estas tensiones se reducen a subestaciones transformadoras para dar servicio a los distintos usuarios; hay industrias que utilizan tensión a 20 kV, otras utilizan 15 kV, en las casas se utiliza actualmente 220 V y en la industria es normal utilizar 220 V/380 V. En la figura 13.1 se puede observar un esquema de cómo puede ser la red de distribución, aunque no es siempre así, pues depende de muchos factores.

La red se diseña con capacidad para suministrar energía cuando se producen fuertes demandas, apareciendo picos de consumo durante el día y la noche o durante inviernos muy fríos. Normalmente hay capacidad de sobra que permite continuar con el suministro aunque haya centrales eléctricas de la red que no estén en ese momento contribuyendo al sistema, por avería o mantenimiento. Hay un «despacho central» desde donde se observa constantemente la demanda, pudiendo asignar o cambiar distintas fuentes de suministro de un área a otra si es necesario. Por tanto, es bastante difícil que el suministro quede interrumpido.

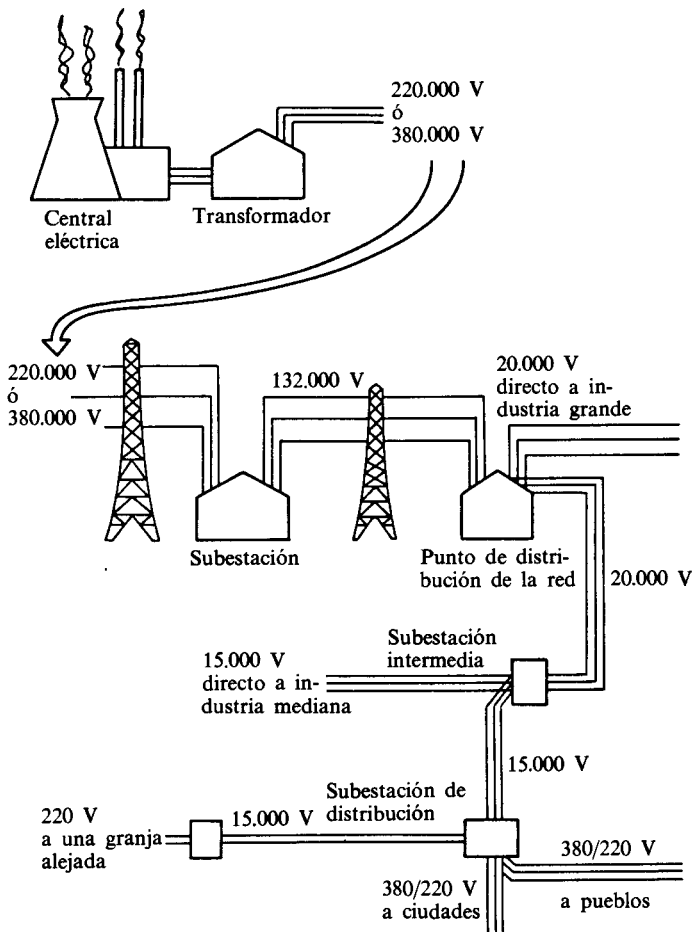


Figura 13.1.—Red de distribución de energía eléctrica.

13.2. ¿Por qué se utiliza tensión alterna en vez de utilizar tensión continua?

A primera vista puede parecer que es una complicación innecesaria utilizar tensión alterna en vez de continua en el suministro de energía eléctrica, puesto que en muchas aplicaciones lo primero

que se debe hacer es rectificarla. La razón principal está en el coste de la transmisión de electricidad a grandes distancias.

En la figura 13.2 se plantean dos casos en los cuales una central eléctrica debe proporcionar 1.000 kW, en un caso utilizando 10 kV y 100 A, y en otro 100 kV y 10 A, por medio de unos cables que tienen una resistencia de 10Ω . En el primer caso, la potencia disipada por calor en los cables (I^2R , Ap. 8.2) es de $100^2 \times 10 \text{ W} = 100.000 \text{ W}$, o 100 kW, quedando sólo 900 kW de potencia para el consumidor. En el segundo caso, la potencia calorífica disipada es sólo de $10^2 \times 10 = 1.000 \text{ W}$, o 1 kW, quedando 999 kW de potencia útil. Si hay menos intensidad de corriente, las pérdidas caloríficas son menores, pero se necesita tener una tensión elevada. Por tanto, es ventajoso utilizar alta tensión en la transmisión de electricidad a largas distancias. Además, si las corrientes son más pequeñas se pueden utilizar cables más finos.

Sin embargo, las tensiones muy altas pueden ser extremadamente peligrosas y no serían adecuadas para uso doméstico e industrial. Gracias a los transformadores, que pueden elevar o reducir las tensiones alternas (Ap. 10.7), se pueden utilizar tensiones diferentes sin pérdidas de potencia significativas. Puesto que no hay sistemas comparables para transformar las tensiones continuas, se elige la transmisión en alterna y a alta tensión.

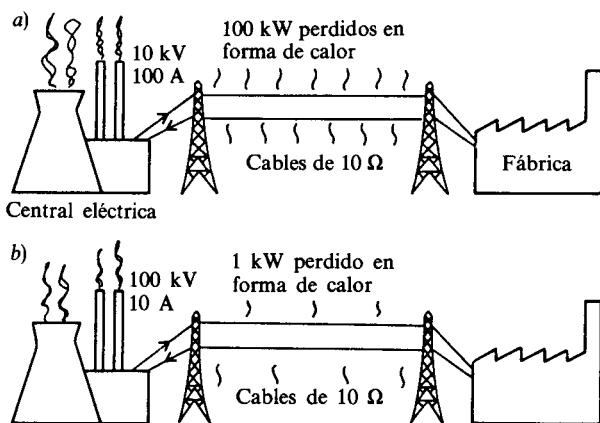


Figura 13.2.—La transmisión en alta tensión permite perder menor energía.

En la figura 13.3 se ilustra un pequeño modelo de laboratorio que sirve para comprobar la ventaja de la transmisión de electricidad a tensiones elevadas. En *a)* hay una fuente de tensión alterna de 12 V que alimenta dos lámparas, una directamente y otra por medio de unos cables que tienen una resistencia de unos pocos ohmios; la lámpara lejana luce muy tenuemente. En *b)* se eleva la tensión hasta 220 V y después se reduce a 12 V al final de los cables de transmisión; en este caso la lámpara lejana luce casi tanto como la otra.

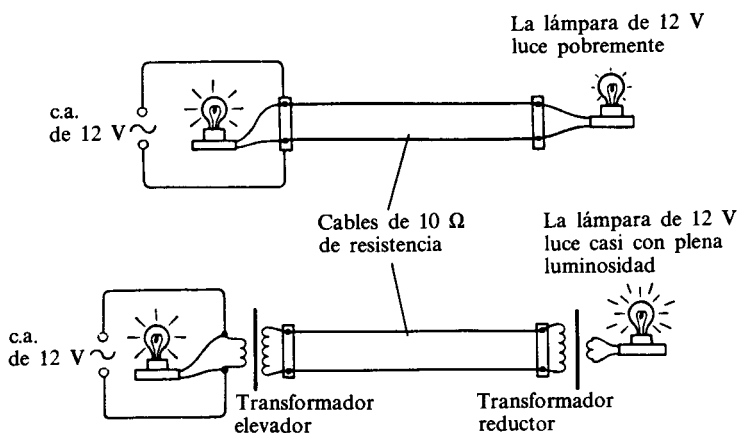


Figura 13.3.—Demostración de la ventaja de transmitir a alta tensión.

13.3. Electricidad en el hogar

La energía eléctrica llega a las casas a 220 V, después de haber pasado por pequeños transformadores locales, como el representado en la figura 13.4, que reducen el nivel de tensión de 380 a 220 V (en otros países se utilizan otros niveles de tensión en las casas). Las conexiones finales se realizan a través de cables enterrados o aéreos. En la casa entran dos cables, uno de una fase y el otro el neutro (F y N en la figura 13.5). A veces hay un tercer cable, el de tierra (T en la figura), que está conectado a un objeto metálico enterrado, proporcionando un potencial nulo.

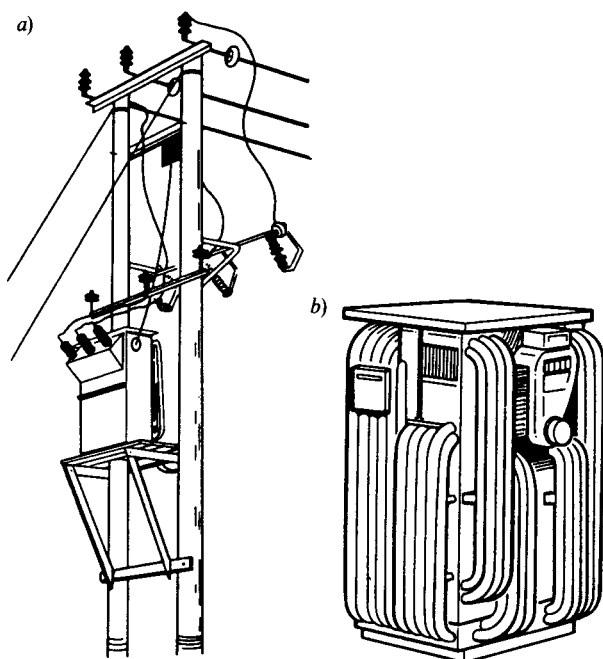


Figura 13.4.—Dos transformadores que se utilizan en distribución de energía eléctrica: a) utilizado para dar suministro a una granja aislada, y b) para dar servicio a un pueblo o a un barrio de una ciudad.

En los cables de fase se colocan fusibles (Ap. 13.4). La caja de distribución puede preceder a circuitos como el representado en la figura 13.5, que es un *circuito en anillo*, utilizados para obtener puntos de potencia, que pueden ser conectados en cualquier parte del anillo, y que tienen la ventaja de que se necesita menos cable que si estuvieran alimentados de forma separada. Una casa de dos pisos puede tener dos circuitos en anillo, uno para el piso de abajo y otro para el piso de arriba. Los enchufes que se utilizan para iluminación no necesitan tanta corriente como los puntos de potencia y normalmente se conectan simplemente en paralelo. Los circuitos especiales por los cuales circulan corrientes elevadas, como son los que alimentan calentadores de agua o cocinas eléctricas, por ejemplo, tienen sus propios cables separados.

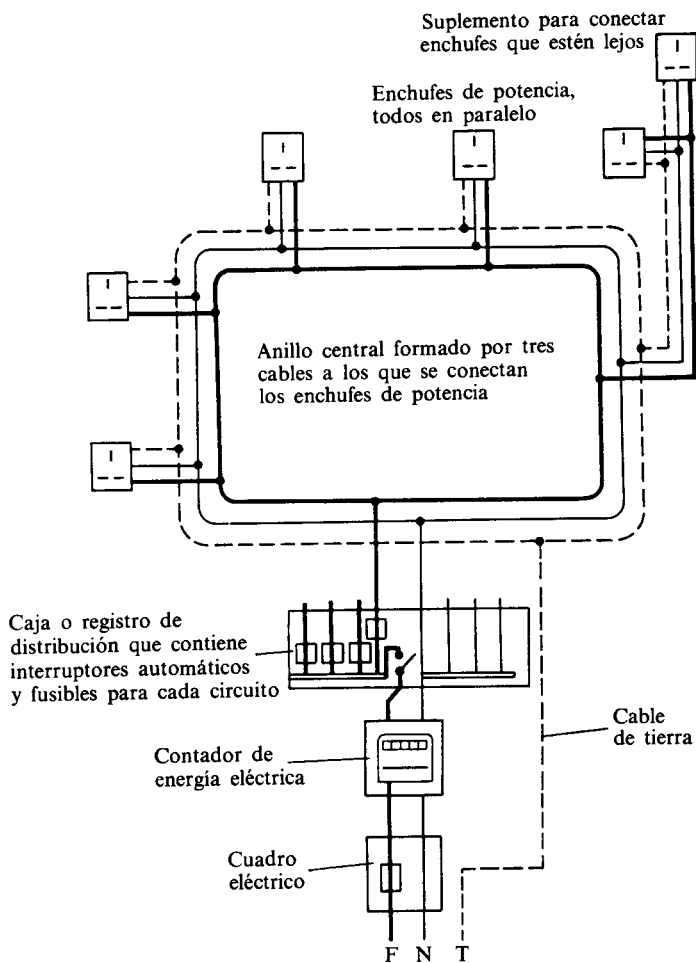


Figura 13.5.—Sistema de cableado eléctrico de una casa.

13.4. Fusibles

Todos los circuitos eléctricos, desde los grandes circuitos de la red de distribución hasta los circuitos de los equipos electrónicos portátiles, deben estar protegidos con *fusibles* o con *interruptores automáticos*. La electricidad es muy beneficiosa para la humanidad, pero también puede ser extremadamente peligrosa. Incluso una sobrecarga moderada puede dar lugar a incendios o a desprendimiento de humos tóxicos, por lo cual es vital que se eviten estos riesgos.

Un fusible es simplemente un trozo de cable o de metal que se funde cuando lo atraviesa una corriente de intensidad más elevada que un cierto valor establecido. Cuando forma parte de un circuito, si se sobrepasa la corriente para la que está diseñado se funde, abriendo el circuito y cesando, por tanto, la corriente.

En la figura 13.5 se puede observar que hay un fusible principal que pertenece al «cuadro eléctrico» y que desconecta toda la instalación eléctrica de la casa de la red externa si ocurre una sobrecarga seria. Este fusible puede ser de 60 A. Cada circuito que está conectado a la caja de distribución tiene su propio fusible, pudiendo ser éste de un valor que oscila entre 5 y 30 A; este valor de intensidad de la corriente es el máximo de seguridad permitido para los cables del circuito. En la figura 13.6 se representan los tipos de fusibles más comunes.

El fusible que consta solamente de un hilo desnudo tiene la ventaja de que es fácil ver si está fundido o no, pero tiene el inconveniente de que se necesita un destornillador (y también algo de paciencia) para reemplazarlo. El fusible encapsulado, por otra parte, es fácil de reemplazar, pero no siempre es fácil comprobar si está fundido, aunque se encuentre el hilo en una cápsula de vidrio.

Conviene tener todos los fusibles de la instalación en un sitio común y disponer de hilo desnudo o de fusibles encapsulados en todo momento. Los coches, al igual que las casas, también tienen caja de fusibles donde cada circuito tiene el suyo. Es sorprendente comprobar que los circuitos de los coches manejan corrientes muy elevadas (el fusible principal puede ser de 55 A, y hay otros de 10 y 15 A), pero sólo tienen tensiones de 12 V (exceptuando el sistema de encendido), que son suficientes para obtener la potencia eléctrica necesaria.

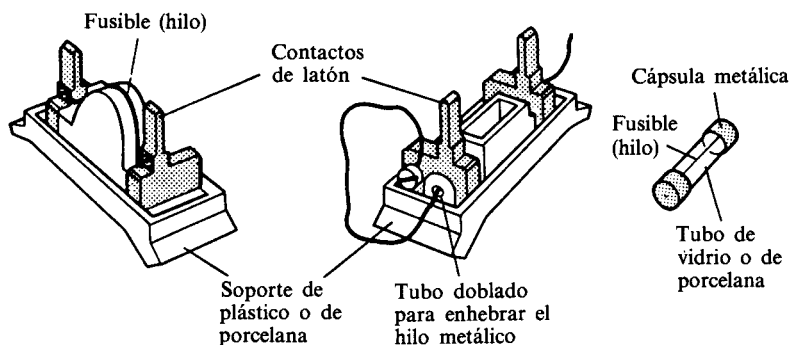


Figura 13.6.—Tipos de fusibles.

13.5. Interruptores automáticos

En la actualidad, y sobre todo en las casas, se utilizan interruptores automáticos en vez de fusibles. Estos interruptores llevan un sistema electromagnético que les hace «saltar» cuando la corriente que pasa a través de ellos alcanza un determinado valor abriendo, por tanto, el circuito. En la caja de distribución de una casa suele haber unos seis interruptores automáticos, uno para cada circuito de la casa, cada uno con la indicación de la intensidad de corriente que es capaz de cortar y con un color (no siempre) de acuerdo a un código estandarizado. También hay un interruptor automático principal. La gran ventaja que tienen sobre los fusibles es que, una vez que se ha arreglado la avería que les ha hecho saltar, se pueden poner en su situación original pulsando un botón de control, sin tener que poner fusibles nuevos. Además, los interruptores automáticos responden más rápidamente y son más fiables en su funcionamiento, incluso cuando el valor de la intensidad de corriente está sólo un poco por encima del valor preestablecido.

En el sistema de distribución de energía eléctrica se emplean muchos interruptores automáticos, donde aparecen corrientes de intensidad mucho más elevada de la que son capaces de manejar los fusibles.

13.6. Tamaño del fusible

Es muy importante elegir el tamaño de fusible separadamente para cada aparato o sistema, de forma que esté protegido individualmente. Si se produce una avería que provoca el paso de una corriente más grande de lo normal, es mejor que se funda el fusible que lleva el propio aparato en vez de fundirse algún fusible en la caja de distribución. De esta forma, se obtiene una protección ante corrientes de una intensidad lo más baja posible.

A veces los enchufes vienen ya con un fusible incorporado (suele ser de unos 13 A), independientemente de la aplicación que vaya a tener. Hay una gama muy variada de fusibles para enchufes (3 A, 5 A, 10 A, 13 A) y el adecuado se elige de un valor un poco mayor que el valor de la intensidad de corriente que vaya a circular por el aparato o sistema que se va a enchufar. Si el valor de la corriente no está indicado en el aparato por el fabricante, se debe calcular a partir del valor de la potencia (que sí se suele indicar) y de la tensión de la red. En la tabla 13.1 se indican algunos valores típicos, aunque no tienen por qué ser exactos (véase también el apartado 1.5).

| Electro-doméstico | Potencia (en vatios) | Voltaje (en voltios) | Corriente de funcionamiento (en amperios) | Fusible recomendado (en amperios) |
|-------------------|----------------------|----------------------|---|-----------------------------------|
| Lámpara | 100 | 220 | 0,4 | 3 |
| Receptor de TV | 195 | 220 | 0,8 | 3 |
| Secador de pelo | 400 | 220 | 1,9 | 5 |
| Plancha | 750 | 220 | 3,0 | 5 |
| Tostador | 1.500 | 220 | 6,3 | 10 |
| Cocina | 2.000 | 220 | 9,1 | 10 |
| Tetera | 2.750 | 220 | 12,5 | 13 |

Obsérvese en la tabla que la intensidad del fusible recomendado es mucho mayor que la de funcionamiento normal, en el caso del secador de pelo. Esto es debido a que la corriente necesaria para arrancar el motor puede ser mucho mayor que la corriente de funcionamiento en régimen (corriente nominal) (Apartado 10.13).

13.7. Tensión alterna trifásica

En el apartado 11.5 se dijo que en realidad las centrales eléctricas generan electricidad utilizando alternadores trifásicos (Figura 10.15), que producen tres tensiones de salida iguales en valor pero desfasadas unas respecto de otras. En la figura 13.7 se representan las tensiones que se generan utilizando tres pares de bobinas.

Las tres tensiones tienen la misma amplitud y la misma frecuencia, pero la f.e.m. máxima se alcanza en la bobina 2 ligeramente antes que en la bobina 1, y en la bobina 3 algo después que en la bobina 2. Se dice que están *desfasadas* una respecto de otra 120° , teniendo una vuelta completa (o ciclo) del alternador 360° , puesto que las tres curvas están espaciadas igualmente en un ciclo (véase también el capítulo 17).

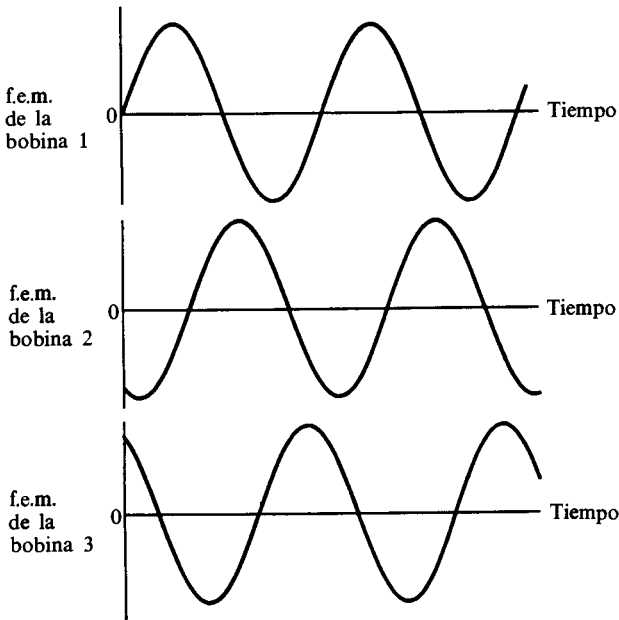


Figura 13.7.—Tensiones de salida de un generador trifásico.

Cada fase se transforma y se distribuye de forma separada por la red, y ésta es la razón por la cual hay a veces tres o seis

cables entre las torres de distribución y transporte. También hay un cable único sin aislar que une los extremos más elevados de las torres, llamado conductor neutro, que está conectado a tierra en la central eléctrica.

En la industria se utilizan las tres fases en muchos equipos que están diseñados para no tener que utilizar el neutro. En aplicaciones domésticas, sin embargo, son solamente dos cables los que entran en la casa, uno conectado a una fase y el otro al neutro (Fig. 13.8). La ventaja que tiene hacer esto así es que se va asignando una fase a cada casa alternativamente, como se indica en la figura, de forma que la corriente total que circula por el neutro es muy pequeña cuando las corrientes que circulan por cada fase son similares (en la figura 13.8, la suma de las tres tensiones en cualquier instante es cero). Por tanto, el cable del neutro puede ser mucho más fino (y más barato) que los otros cables, y de esta forma se reducirá el coste de distribución de energía eléctrica. Si se utilizara un sistema monofásico se necesitarían dos cables de más sección para cada casa para suministrar la misma potencia.

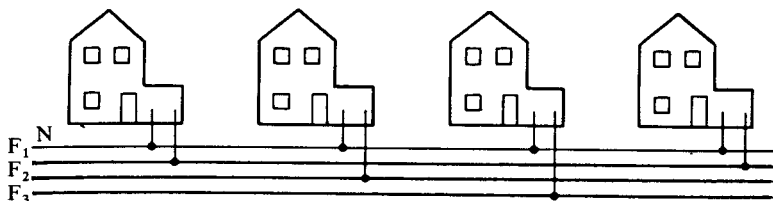


Figura 13.8.—Suministro eléctrico a casas contiguas utilizando una línea trifásica.

13.8. Precauciones. Enchufes, puestas a tierra, sobrecargas, prevención de descargas eléctricas y mantenimiento

Enchufes

La instalación de los enchufes de pared y de los enchufes de clavija no es difícil, pero hay que tomar algunas precauciones importantes que son fáciles de supervisar. En la figura 13.9 se muestra un enchufe típico de 13 A y se indican ciertos puntos a

considerar por cuestión de seguridad. Se deben tener precauciones similares cuando se instalan los enchufes de las lámparas y cuando se hacen otras conexiones parecidas que deben ser realizadas a mano.

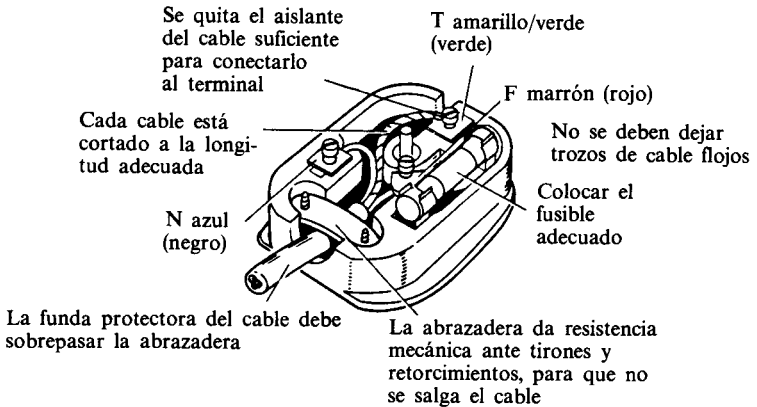


Figura 13.9.—Precauciones a tomar cuando se instala un enchufe a la red.

Puestas a tierra

Los aparatos que vienen en una estructura de plástico, sin partes metálicas accesibles que se puedan tocar, normalmente llevan cable doble sin tener ninguna conexión a tierra y son perfectamente seguros. Las licuadoras, los molinillos de café, los magnetófonos y muchos otros aparatos se fabrican de esta forma y no necesitan estar conectados a tierra. Sin embargo, las estructuras metálicas de algunos aparatos, que se pueden tocar con los dedos o que se utilizan para llevarlos de un sitio a otro, deben ponerse a tierra para evitar descargas eléctricas y posibles accidentes que pueden llegar a ser mortales. Esta puesta a tierra se realiza conectando la estructura metálica del aparato a la tierra del edificio, a través del enchufe de la casa. Si por casualidad se desconecta el cable de fase y toca en la estructura metálica, puede pasar una corriente elevada entre la fase y tierra, haciendo que el fusible del enchufe (si lo hay) se funda. Esto corta inmediatamente la corriente y la estructura metálica del aparato se puede tocar sin

peligro. Si no existe esta conexión a tierra, la estructura metálica puede tener tensión eléctrica respecto de tierra debido al contacto con el cable de fase, y si toca una persona el aparato puede recibir una descarga eléctrica muy desagradable, e incluso mortal.

Sobrecargas

Con un fusible adecuado se protege un aparato determinado sin poner otros fuera de servicio en caso de una avería, pero tan importante como esto es que los cables que van a los enchufes no soporten intensidades de corrientes mayores de las que se consideran como seguras para los mismos. Si, por ejemplo, se conecta una estufa eléctrica a un enchufe pensado para conectar una lámpara, se corre el riesgo de provocar un incendio por sobrecargar los cables del circuito diseñado para aparatos de iluminación. Puesto que la lámpara no consume más de 1 A, los cables utilizados pueden elegirse para soportar intensidades de corriente de hasta 5 A, pero una estufa eléctrica puede necesitar 8 ó 10 A. Una corriente tan alta fundiría inmediatamente los fusibles de 5 A del circuito de iluminación. Pero, si por error, se hubiera puesto un fusible de valor más elevado, los cables del circuito de iluminación se sobrecargarían.

Otra causa muy común de sobrecarga aparece con el uso de los adaptadores (ladrones), que permiten conectar varios aparatos a un mismo enchufe. Algunos de estos adaptadores tienen sus propios fusibles, de unos 13 A, para su autoprotección, y de esta forma no se puede sobrepasar el valor de la corriente total máxima establecida. Sin embargo, muchos adaptadores no llevan fusibles y el peligro surge cuando la suma de las corrientes que consumen los aparatos conectados al enchufe supera la corriente de seguridad. Cuando un enchufe o una clavija se calientan hay que revisar las conexiones internas que tiene y comprobar la carga total que está soportando. Los aparatos que sirven para calentar algo son los que más fácilmente pueden provocar sobrecargas, puesto que necesitan corrientes elevadas para funcionar.

Prevención de descargas eléctricas

Una descarga eléctrica de la red de 220 V puede ser una experiencia desagradable y espantosa. Es la corriente a través del

cuerpo, especialmente el pecho, la que produce daños y, en algunos casos, incluso la muerte. La corriente depende de la tensión, por supuesto, pero también depende de la resistencia del «circuito» que forma el cuerpo hasta llegar a tierra o desde una mano a otra. Las tensiones pequeñas, menores de 50 V, no producen corrientes lo suficientemente grandes como para considerarse peligrosas e incluso ni siquiera para ser apreciadas a veces, pero por encima de 100 V sí lo son. La tensión de red de 220 V puede ser muy peligrosa.

Cuando hay que desmontar equipos eléctricos lo mejor que se puede hacer es desconectarlos de la red sacando la clavija del enchufe y accionar el interruptor automático general de la casa. Cuando no hay más remedio que actuar en equipos eléctricos conectados a la red se debe tener la precaución de utilizar calzado bien aislado y guantes. También es útil disponer de un pequeño destornillador «buscapolos», para saber qué partes están conectadas a la fase.

En el hogar pueden ocurrir accidentes fatales, cuando se corren riesgos innecesarios con la electricidad. Se deben tener en cuenta las siguientes precauciones:

- No utilizar estufas eléctricas móviles en los cuartos de baño.
- Apagar la luz de una lámpara cuando se va a cambiar una bombilla.
- Nunca taladre un muro justo por encima o por debajo de un enchufe, a menos que usted sepa con certeza que por ahí no va ningún cable.
- Conecte siempre los cables de tierra en los aparatos con estructuras metálicas.
- No quite el panel trasero de un receptor de televisión para ajustarlo, mientras esté conectado a la red.
- No sobrecargar los circuitos utilizando adaptadores (ladrones).

Las descargas eléctricas producen efectos muy diferentes en distintas personas. Lo mejor es no correr ningún riesgo nunca (véase «Seguridad y trabajo práctico» en las páginas 17-19).

Mantenimiento

Una buena costumbre en cuestiones de seguridad es revisar periódicamente los equipos eléctricos, en especial los cables, clavijas y enchufes. Se deben examinar las conexiones, y si hay alguna floja, apretarla; los cables deshilachados se deben sustituir. Se deben tener fusibles de repuesto de tamaños apropiados disponibles, y si cualquier elemento se calienta se debe desconectar de la red y ser examinado. Incluso un simple cable, de una plancha eléctrica o de una máquina de afeitar, por ejemplo, puede tener después de algún tiempo alguna parte defectuosa y perder el aislamiento, pudiendo ser origen de problemas.

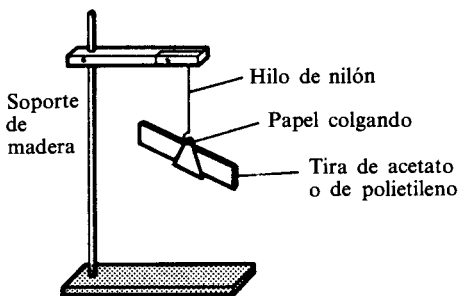
13.9. Resumen

- Si se transporta la energía eléctrica a alta tensión se reducen las pérdidas de energía en los cables.
- La tensión se eleva y se reduce con transformadores en varios puntos de la red de distribución y transporte de energía eléctrica.
- La distribución trifásica es más barata que la monofásica. T = tierra, N = neutro, F = fase.
- Los fusibles y los interruptores automáticos se utilizan para proteger los aparatos y los cables y para evitar descargas eléctricas.
- Las conexiones a tierra se utilizan en aparatos con estructuras metálicas a la vista.
- Para impedir sobrecargas se necesitan fusibles de tamaño adecuado.
- Es una buena costumbre de seguridad comprobar periódicamente los enchufes y los cables.

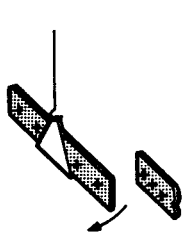
14.1. Carga positiva y negativa

Ya en el año 300 antes de Cristo se sabía que algunos materiales se podían «cargar» frotándolos con la piel o con la ropa. En aquellos tiempos se utilizaban resinas (como el ámbar) y sustancias cristalinas, pero con los plásticos modernos se pueden ilustrar los efectos mucho más fácilmente. Ámbar en griego se dice *elektron*, lo que explica el origen de la palabra «electricidad». Hacia el año 1600 de nuestra era se descubrió que existían dos tipos de «cargas», dependiendo de las sustancias que se utilizaran, y se dieron los nombres *positivo* y *negativo* arbitrariamente. (¡Fue una lástima que no se dieran al contrario! Véase el apartado 1.7.) La carga que aparecía en el cristal cuando se frotaba con seda se decía que era positiva, y la que aparecía en la ebonita cuando se frotaba con piel se decía que era negativa. El acetato de celulosa y el polietileno dan efectos similares pero mucho más grandes cuando se frotran con cualquier aislante.

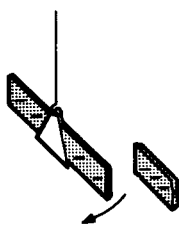
Con experimentos sencillos como los que se ilustran en la figura 14.1 se demuestra que dos cargas positivas o dos cargas negativas se repelen entre sí, mientras que una carga positiva y otra negativa se atraen. Sin embargo, no aparece una concentración de carga determinada, como ocurre con los polos de un imán; aquí toda la zona del plástico que ha sido frotada presenta los efectos de atracción o de repulsión.



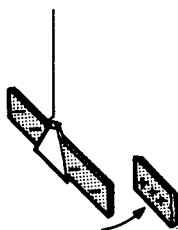
Situación antes de cargarse



Dos tiras de acetato cargadas se repelen una a otra



Dos tiras de polietileno se repelen una a otra.



Una cinta de acetato y una de polietileno se atraen mutuamente

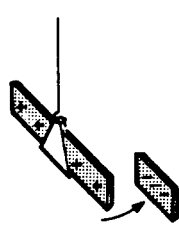


Figura 14.1.—Fuerzas entre materiales cargados.

14.2. Cargas por fricción

Debido al desarrollo de materiales aislantes muy buenos, actualmente es muy fácil generar cargas eléctricas entre dos superficies. Estas «cargas estáticas», como se denominan, pueden ser bastante divertidas, ligeramente incómodas o realmente peligrosas, dependiendo de las circunstancias. Algunos ejemplos pueden ser los siguientes:

- a) La carga de la superficie de un disco o de una cinta magnetofónica cuando están sonando, que atrae partículas de polvo en la zona de la aguja o de la cabeza.
- b) El crujido que se oye al quitarse una prenda de nilón o de otro material sintético cuando el ambiente es seco y frío.
- c) La descarga eléctrica que se experimenta cuando se toca el tirador de la puerta de un coche al bajarse del mismo.
- d) La forma en que las cintas adhesivas tienden a ser atraídas por el papel que tenían pegado detrás, después de ser preparadas para su utilización.
- e) El comportamiento desordenado del pelo recién lavado y secado después de peinarlo.
- f) Las cargas que se generan debido a las moquetas de las oficinas, que provocan ligeras descargas eléctricas en las personas cuando tocan objetos metálicos.
- g) El hecho de que los globos se peguen a las paredes después de haber sido frotados con la ropa.

Se fabrican ruedas para coches y aviones conductoras de la electricidad, especialmente para evitar problemas cuando los viajeros se bajan de estos medios de transporte; y en algunos procesos industriales donde se producen vapores inflamables hay que tener mucho cuidado para evitar incluso pequeños riesgos de chispas debidas a cargas estáticas.

Cuando se frota un material con otros hay una transferencia de electrones, y esto es lo que provoca la aparición de cargas en ellos. En un material cargado negativamente hay un exceso de electrones, más de lo normal, pero, sin embargo, en uno cargado positivamente hay escasez de electrones.

14.3. Campo eléctrico

Cuando se carga un objeto, como una regla de plástico, por frotamiento, puede atraer trocitos de papel a una distancia de uno o dos centímetros, y puede atraer hacia sí el pelo de una persona. Comprobando la atracción (y repulsión) magnética se llega a la idea de campo magnético, y de igual forma se puede decir que en torno a un objeto cargado hay un *campo eléctrico*.

No es tan fácil representar el campo eléctrico como lo es el campo magnético, pero las líneas de campo son similares en ambos casos: representan la dirección que adopta dentro del campo un objeto pequeño con carga positiva en un extremo y con carga negativa en el otro (denominado *dipolo*). Las líneas van de las cargas positivas a las cargas negativas, estando más cerca unas de otras en los puntos donde el campo es más intenso. Los campos eléctricos aparecen de forma natural siempre que los objetos estén cargados. La intensidad del campo se mide en voltios por metro. La intensidad del campo atmosférico normal es de unos 130 V/m, pero durante las tormentas el valor es mucho mayor. Para que aparezca una chispa entre unos electrodos próximos en aire seco se necesitan 30.000 V/cm o 3 MV/m (en el apartado 14.9 también se tratan algunos aspectos sobre los campos eléctricos).

14.4. Potencial eléctrico

En el capítulo 3 se ha descrito la diferencia de potencial y se puede considerar, para muchas aplicaciones, que es el «nivel» eléctrico. Se puede utilizar la tierra como potencial cero, y cualquier objeto puede tener potencial positivo o negativo. Puede sorprender el saber que se pueden obtener potenciales (o voltajes) muy grandes frotando unos materiales contra otros —miles de voltios en algunos casos—, aunque no suponen grandes peligros. Es un caso parecido al que sucede, por ejemplo, cuando se frotan dos piedras, que la chispa que se produce está a temperatura muy alta, pero contiene poca energía.

14.5. Capacidad

Otra importante magnitud eléctrica es la que se denomina *capacidad*. Esta magnitud mide el «tamaño» del conductor (algo parecido al volumen de un depósito) dando un valor de la carga necesaria para aumentar su potencial en una unidad más; por ejemplo, en un voltio. Un conductor tiene una capacidad alta si necesita una cantidad elevada de carga para aumentar su potencial en un voltio, igual que un vaso necesita una gran cantidad de agua para llenarse hasta un cierto nivel:

$$\text{Capacidad} = \frac{\text{Carga}}{\text{Potencial}}$$

La unidad de capacidad eléctrica es un culombio por voltio, llamado *faradio* (cuyo símbolo es F). El nombre proviene del físico inglés Michael Faraday (1791-1867). Un objeto que tenga una capacidad de 1 F necesita una carga de 1 C para aumentar su potencial 1 V. En la mayoría de las aplicaciones, el faradio es una unidad que resulta muy grande, por lo cual se utiliza el microfaradio, μF (la millonésima parte) o incluso el picofaradio, pF, que es un micro-microfaradio (la millonésima parte de la millonésima parte). En el capítulo 16 se trata el tema de los condensadores con más detalle.

14.6. Inducción electrostática

Existe un proceso relacionado con las cargas estáticas que se denomina *inducción*. Cuando se acerca un material conductor a un material cargado hay una atracción o una repulsión de algunos electrones móviles en el conductor que, por esta razón, se desplazan dentro del mismo influenciados por la carga externa. Algunos de los electrones del conductor son atraídos o repelidos por el objeto cargado, de forma que aparece una carga «inducida» opuesta en la zona más próxima al objeto. En la figura 14.2 se representan algunos casos sencillos. Obsérvese que en los anteriores ejemplos se utiliza una conexión a tierra para separar las cargas inducidas (+) y (-). En la práctica, esta conexión se puede es-

tablecer cuando toca el conductor una persona, siendo entonces el cuerpo humano el que enlaza con tierra.

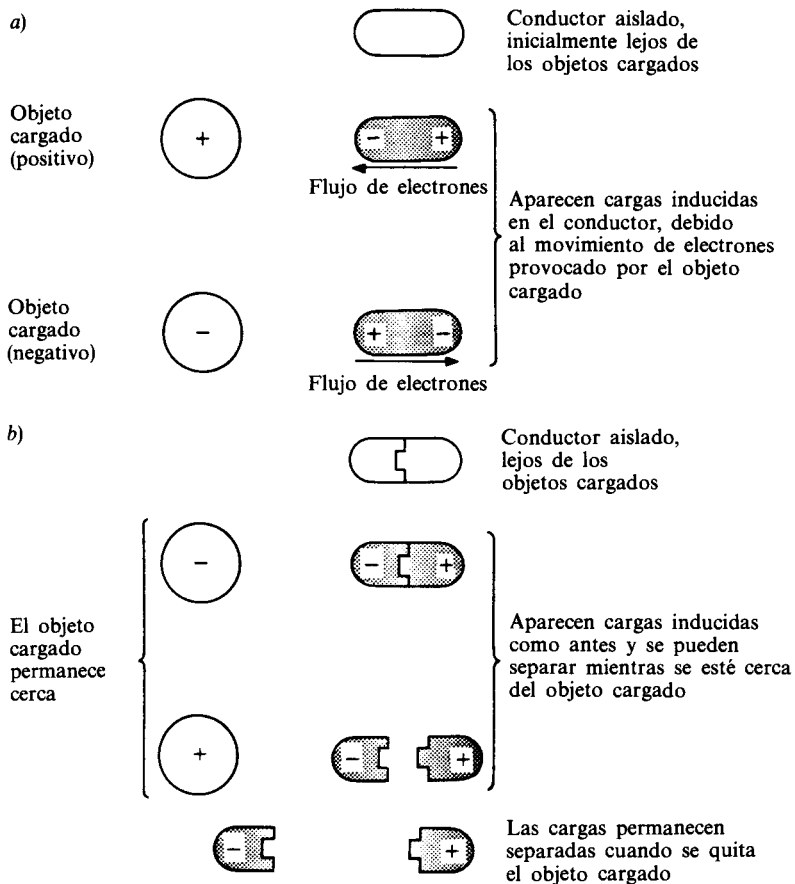


Figura 14.2.—Ejemplos de inducción electrostática.

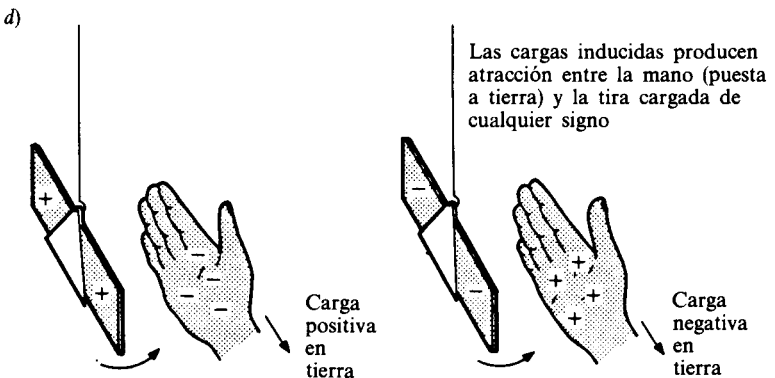
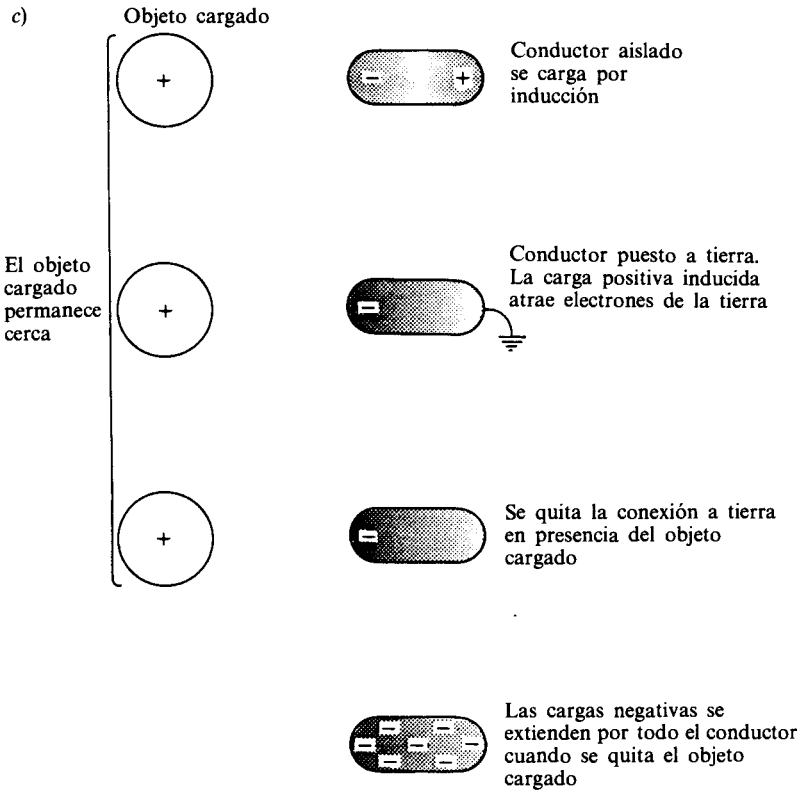


Figura 14.2.—(Continuación).

14.7. Electroscopios y electrómetros

Los instrumentos que responden ante la presencia de electricidad estática se conocen como *electroscopios* o *electrómetros*, dependiendo de si solamente dan información visual o si permiten realizar medidas. Con cualquiera de estos instrumentos se pueden analizar y estudiar los efectos de las cargas eléctricas en diversos tipos de conductores.

El electroscopio más sencillo se compone de una fina lámina de oro unida a una varilla que está dentro de una caja o recipiente (Fig. 14.3). Las desviaciones de la lámina con respecto a la varilla se pueden ver directamente o por proyección a través de los espejos que tienen las paredes de la caja.

Los electrómetros se componen de unos circuitos electrónicos y de un galvanómetro, de forma que se puede medir la carga en una escala, pudiendo seleccionar incluso la escala de medida (Figura 14.3). Cada tipo de instrumento tiene una placa metálica a la cual se le introduce la carga, la placa está aislada de la caja y ésta está conectada a tierra.

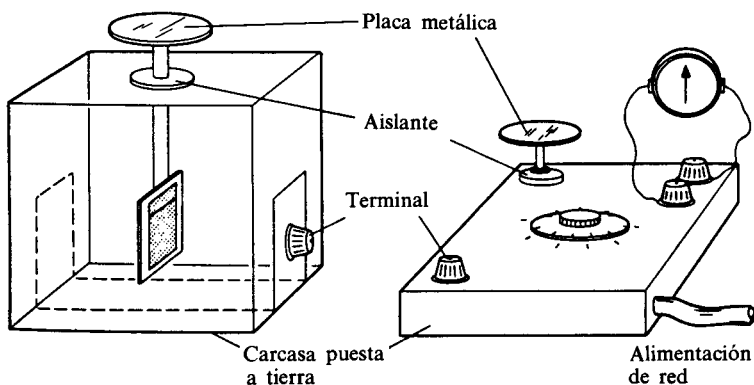


Figura 14.3.—Electroscopio y electrómetro.

Se puede pensar que estos instrumentos indican carga eléctrica, es decir, culombios, pero en realidad los dos tipos de instrumentos anteriores son voltímetros que miden o registran la diferencia de potencial que existe entre la placa (y lo que tiene unido a ella) y

la caja o recipiente. Lo que ocurre es que una carga determinada produce una diferencia de potencial dependiendo de la capacidad del sistema.

14.8. Efectos electrostáticos básicos

Utilizando un electroscopio (o un electrómetro) se pueden demostrar las siguientes propiedades de los objetos cargados eléctricamente (si se desean ver detalles prácticos de cómo se realiza esto, deben consultarse libros de texto de física donde se especifica):

- Los objetos con diferente capacidad alcanzan un potencial distinto cuando se les aplica la misma carga eléctrica. Cuanto más grande es la capacidad, menor potencial alcanzan.
- La desviación de un electroscopio cargado se reduce con la proximidad de un objeto conductor conectado a tierra, como, por ejemplo, la mano de una persona.
- Un objeto cargado con una carga igual a la de un electroscopio incrementa su desviación.
- Un conductor hueco cargado tiene toda su carga en la superficie exterior y dentro de él el campo eléctrico es cero (Ap. 14.9).
- Un conductor sólido cargado tiene una concentración de cargas más alta en las zonas más puntiagudas (Ap. 14.9).
- Los conductores puntiagudos se pueden utilizar para recoger cargas y para cambiarlas de sitio (Ap. 14.10).

14.9. Distribución de carga en los conductores

Un conductor cargado que sea esférico tiene una distribución de cargas uniforme sobre toda su superficie, como se podría esperar, pero con otras formas la carga se concentra en las zonas más puntiagudas. En la figura 14.4 se muestra la distribución para tres formas diferentes.

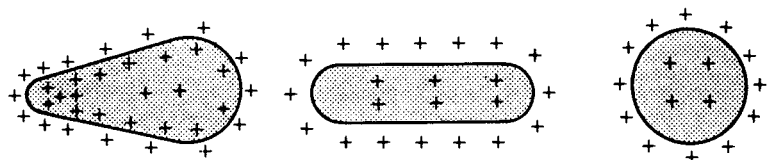
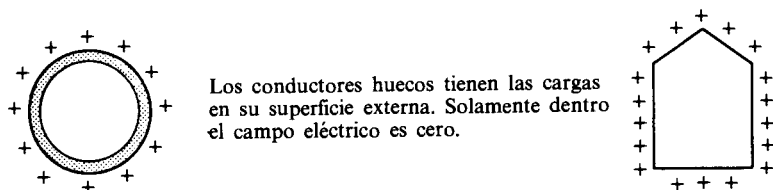


Figura 14.4.—Distribución de carga en conductores de formas variadas.

Las zonas más curvadas y puntiagudas son las que tienen mayor concentración de carga.

En los conductores huecos, en cambio, es en las caras internas donde no hay ninguna carga, pues toda la carga está fuera, lo cual implica que dentro del conductor el campo eléctrico es cero. En la figura 14.5 se ilustra este efecto.

Una aplicación práctica del comportamiento de los conductores huecos se encuentra en la utilización de cable coaxial para conectar la antena con el aparato de televisión o de radio de un coche. Las señales de intensidad muy pequeña recogidas por la antena pasan por un cable apantallado mediante un conductor trenzado que protege de posibles campos eléctricos externos (Figura 14.6). Dentro del conductor trenzado no puede haber campos eléctricos que afecten a la señal que va por el cable.



Los conductores huecos tienen las cargas en su superficie externa. Solamente dentro el campo eléctrico es cero.

Figura 14.5.—Distribución de cargas en conductores huecos.

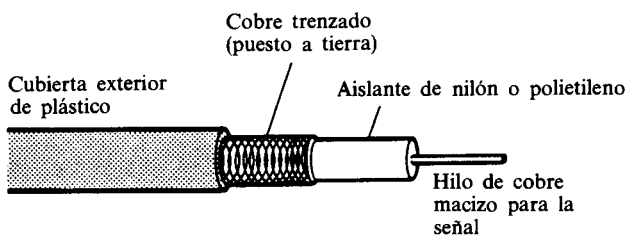


Figura 14.6.—Estructura de un cable coaxial.

En los circuitos electrónicos se emplea también este mismo principio: cuando hay circuitos muy sensibles se introducen en una caja metálica conectada a tierra para apantallarlos de campos eléctricos externos.

14.10. Efectos producidos por las cargas eléctricas en objetos puntiagudos

Cualquier objeto cargado pierde con el tiempo su carga debido a que en el aire que hay a su alrededor siempre hay iones positivos y negativos. Si se acerca un conductor puntiagudo al objeto cargado, la pérdida de carga es mucho más rápida, debido a la ionización tan fuerte que se produce por existir una concentración de carga grande en la punta (Fig. 14.7). La punta del objeto atrae a los iones negativos y repele a los iones positivos, con lo cual el efecto total es como si salieran cargas positivas desde el punto cuya carga se neutraliza. Si se pone una aguja en la placa de un electroscopio cargado, éste se descargará rápidamente debido al efecto anteriormente explicado.

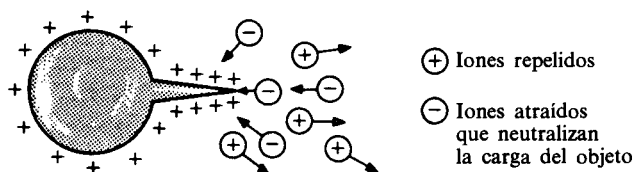


Figura 14.7.—Descarga de un objeto puntiagudo.

Por un mecanismo similar pueden llegar cargas a una punta por inducción provenientes de un objeto cercano, a través del movimiento de iones que hay entre los dos objetos (Fig. 14.8).

14.11. Generador de Van der Graaff

El generador de Van der Graaff es un sistema que utiliza tanto el efecto que consiste en recoger cargas como el que consiste en expulsarlas por medio de una punta (de un objeto). En la figu-

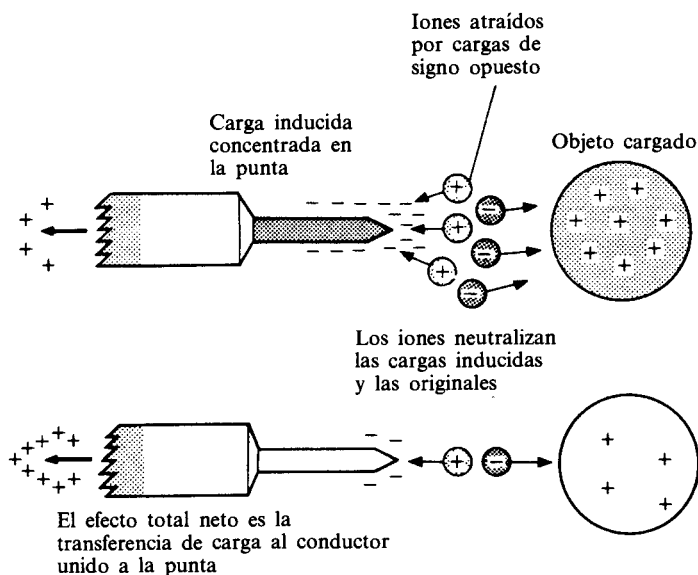


Figura 14.8.—Atracción de cargas desde una punta.

ra 14.9 se ilustran sus características principales. Se utiliza una fuente de tensión moderadamente alta, y se puede generar una tensión mucho más elevada transportando cargas por medio de una cinta sin fin desde la fuente de tensión hasta una gran esfera metálica hueca. La magnitud del voltaje que se puede generar dependerá fundamentalmente de la rugosidad de la esfera y de la cantidad de polvo que haya en el aire (ionización). Las máquinas de laboratorio de este tipo con la esfera rodeada de nitrógeno a alta presión pueden generar hasta diez millones de voltios. Incluso los modelos pequeños de laboratorio alcanzan cientos de miles de voltios. Si se pone cerca de la esfera otra esfera pequeña conectada a tierra, se producirá una chispa espectacular (por descargarse la grande) cada pocos segundos, cuando se alcance la tensión de ruptura del aire.

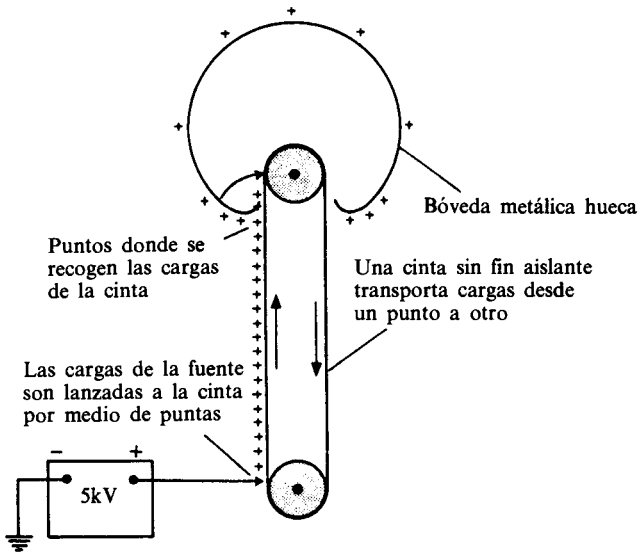


Figura 14.9.—El generador de Van der Graaff.

14.12. El pararrayos

Los efectos de los conductores puntiagudos se utilizan para reducir el riesgo de daños causados por los rayos que se producen en las tormentas. Los edificios altos están provistos de una ancha tira de metal, normalmente de cobre, que se conecta a un conductor situado en la parte más alta del edificio y a una placa enterrada debajo del mismo. De esta forma hay continuas e inofensivas descargas a través de los conductores, en vez de ocurrir efectos desastrosos por la caída de rayos (Fig. 14.10). El mismo efecto se puede demostrar utilizando un generador de Van der Graaff para simular el nubarrón.

14.13. Electricidad estática y corriente eléctrica

Es importante darse cuenta de que la corriente eléctrica se produce al moverse la electricidad estática. Ambos fenómenos tienen que ver con portadores de carga (electrones e iones) y con los efectos

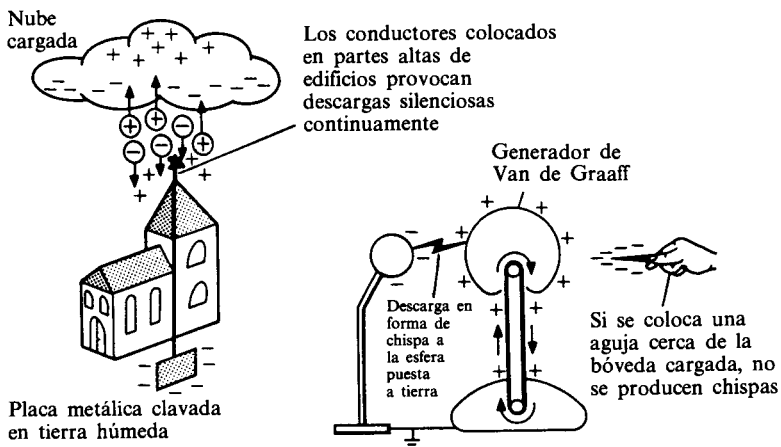


Figura 14.10.—Cómo actúa el pararrayos.

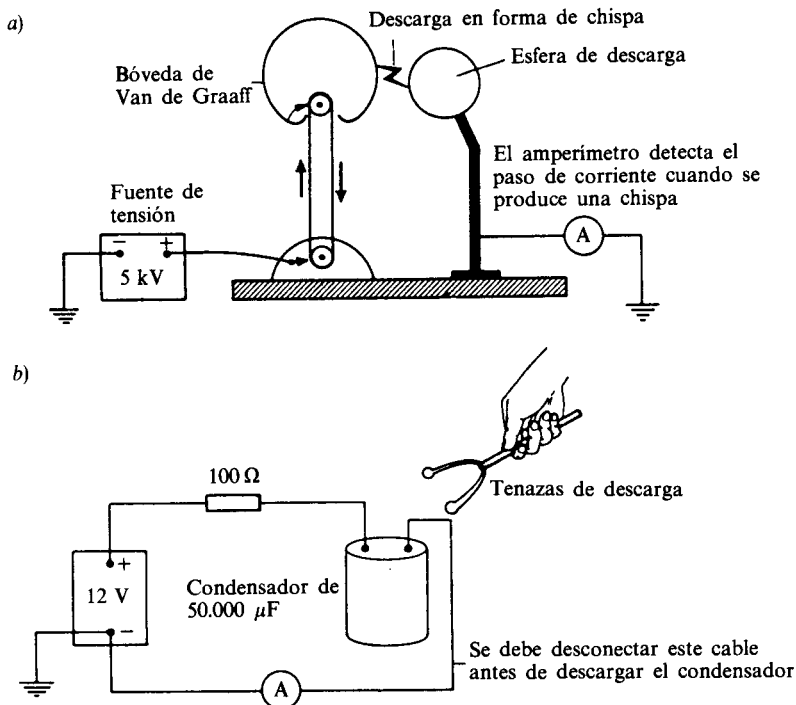


Figura 14.11.—Relación entre electricidad estática y corriente eléctrica.

que producen en objetos aislados o en movimiento a través de conductores.

En la figura 14.11 se muestran dos experimentos que establecen explícitamente la conexión entre electricidad estática y corriente eléctrica. En la figura 14.11a el amperímetro detecta corriente cada vez que se produce una chispa en el generador de Van de Graaff. En la figura 14.11b el amperímetro marca una corriente eléctrica mientras se está cargando el condensador. Tras desconectar el borne conectado a tierra se puede descargar el condensador mediante el uso de unas tenazas aisladas, produciéndose una chispa en los contactos cuando se realiza esta operación. En cada uno de estos casos se demuestra que hay una equivalencia entre la corriente eléctrica y el movimiento de cargas.

14.14. Resumen

- Las cargas eléctricas pueden ser (+) o (-).
- Las cargas de igual signo se repelen y las cargas de distinto signo se atraen.
- Los objetos se pueden cargar por frotamiento, lo cual implica una transferencia de cargas desde un material a otro.
- En torno a los objetos cargados hay un campo eléctrico.
- La capacidad se mide en faradios.
- Un faradio es un culombio por voltio:

$$C = \frac{Q}{V}, \quad Q = CV, \quad V = \frac{Q}{C}$$

- Para evitar que haya chispazos grandes se puede utilizar un condensador.
- Los objetos pueden cargarse eléctricamente por inducción.
- Los electroscopios y los electrómetros se utilizan para indicar las propiedades de los objetos cargados eléctricamente.
- Las cargas eléctricas se concentran en los bordes afilados y en las zonas puntiagudas de los conductores cargados, donde la intensidad del campo es más grande.

- Dentro de un conductor hueco no hay cargas eléctricas y el campo eléctrico tiene valor nulo.
- Los objetos puntiagudos pueden perder o coger cargas. Los generadores de Van de Graaff utilizan este efecto.
- La corriente eléctrica se produce al moverse la electricidad estática.

15

Capacidad

15.1. Condensadores

El concepto de capacidad se introdujo en el apartado 14.5, y se definió como la carga necesaria para que un conductor aumente su potencial en una unidad más, es decir, en un voltio. Por tanto:

$$\text{Capacidad} = \frac{\text{Carga}}{\text{Potencial}}$$

o lo que es lo mismo:

$$C \text{ (faradios)} = \frac{Q \text{ (culombios)}}{V \text{ (voltios)}}$$

Esto se puede escribir de la forma

$$Q = CV \quad \text{y} \quad V = Q/C$$

La unidad de capacidad, el *faradio*, es, por tanto, un *culombio por voltio*.

Un componente con capacidad se denomina *condensador* y este tipo de elementos se utiliza mucho en casi todos los circuitos electrónicos y en muchas otras aplicaciones. La fabricación de condensadores es bastante compleja, pero fundamentalmente se componen de dos materiales conductores separados por una capa de

material aislante. Toda carga que se aplica al condensador produce una diferencia de potencial entre los dos conductores. La mayoría de los condensadores se puede conectar en los circuitos, independientemente de la posición en que se coloque, pero hay un tipo —los condensadores electrolíticos— que se debe conectar teniendo en cuenta los signos (+) y (–) que vienen indicados. Todos los condensadores tienen una diferencia de potencial máxima, por encima de la cual se corre el riesgo de ruptura eléctrica.

En la figura 15.1 se muestran varios tipos de condensadores de los que hay en el mercado (no están dibujados a escala), junto con sus símbolos.

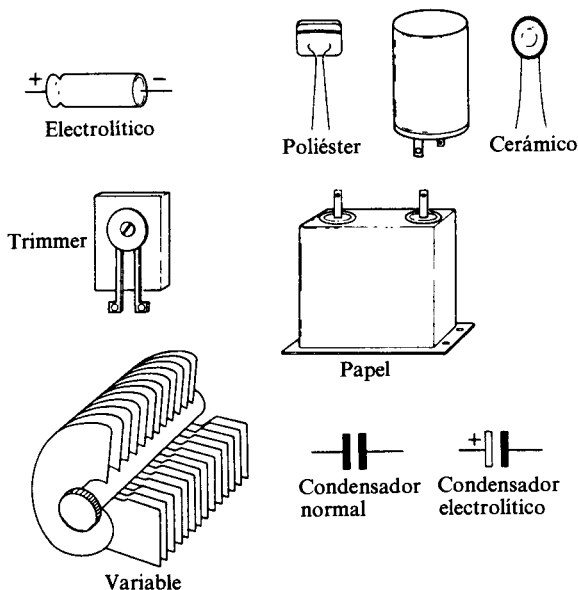


Figura 15.1.—Tipos de condensadores y símbolos.

15.2. Condensadores en serie y en paralelo

La fórmula para obtener la capacidad equivalente de varios condensadores conectados en serie o en paralelo es la contraria que la correspondiente a las resistencias. (En cualquier libro de

texto de física se puede estudiar o consultar cada caso.) La razón por la que son diferentes es que en una conexión en paralelo la capacidad total es mayor que la de un único condensador, mientras que en una conexión en serie la capacidad total es menor que la de un condensador solo.

Si tenemos tres condensadores de capacidad C_1 , C_2 y C_3 conectados en paralelo, la capacidad equivalente C se calcula de la siguiente forma:

$$C = C_1 + C_2 + C_3$$

Si tenemos tres condensadores de capacidad C_1 , C_2 y C_3 conectados en serie, la capacidad equivalente C se calcula de la siguiente forma:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}$$

15.3. Carga y descarga de los condensadores

Un condensador se puede cargar conectándolo a una fuente de tensión continua. Desde el terminal negativo de la fuente pasan electrones a una de las placas del condensador, mientras que de la otra placa hay una fuga de electrones hacia el terminal positivo de la fuente (Fig. 15.2).

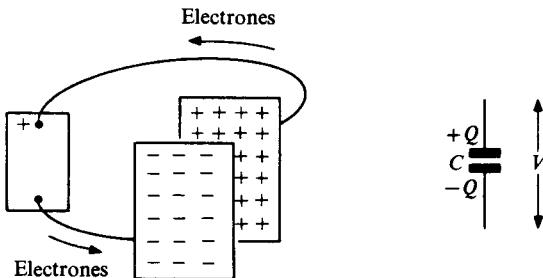


Figura 15.2.—Cargas eléctricas en un condensador cargado.

El efecto que se produce es que se generan cargas iguales y opuestas en el condensador con una diferencia de potencial entre ellas. Si se colocara un amperímetro en el circuito indicaría que hay un paso momentáneo de corriente que cesa rápidamente cuando la diferencia de potencial en el condensador se iguala a la que tiene la fuente de tensión. En la figura 15.3 se indica el proceso.

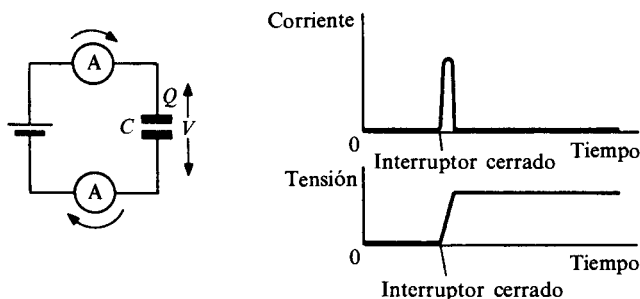


Figura 15.3.—Carga de un condensador.

Después de ser cargado, el condensador mantendrá su carga durante bastante tiempo, aunque no indefinidamente, puesto que siempre hay una pequeña fuga a través del material aislante o a través de la humedad del aire circundante. Cuando se juntan sus terminales, el condensador se descarga y el amperímetro indica el paso de una corriente de corta duración y en sentido inverso al anterior (Fig. 15.4).

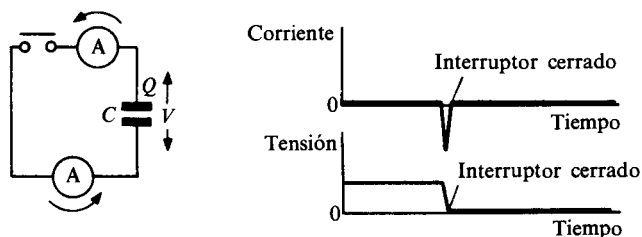


Figura 15.4.—Descarga de un condensador.

NOTA: Los condensadores deben ser descargados cuando no se van a utilizar para prevenir posibles descargas eléctricas si alguien toca sus terminales o intenta cogerlos.

15.4. Carga y descarga a través de una resistencia. Constante de tiempo

En la práctica no es posible cargar o descargar un condensador de forma instantánea, puesto que siempre existe alguna resistencia en el circuito, bien en la fuente de tensión (resistencia interna, Ap. 5.5) o bien en los cables mismos. El dibujo se mejora por ser más real incluyendo una resistencia tanto en el circuito de carga como en el circuito de descarga del condensador (Figura 15.5). El efecto que produce la resistencia es alargar el proceso de carga y descarga durante un período de tiempo, como se muestra en la figura, aumentando o disminuyendo la diferencia de potencial y la carga de forma gradual. La corriente es la «velocidad» del flujo de cargas, y en ambos casos es alta cuando empieza el proceso, para ir decreciendo su valor (la corriente negativa en el gráfico que representa la descarga significa que circula en sentido opuesto).

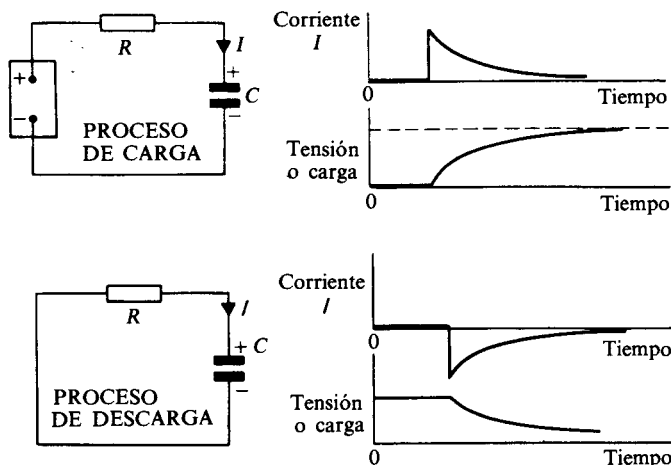


Figura 15.5.—Carga y descarga de un condensador.

Estrictamente hablando, la corriente, la diferencia de potencial y la carga no alcanzarán nunca sus valores finales. La forma de la curva es la misma que la que describe la desintegración radiactiva, creciendo o decreciendo en la misma fracción en intervalos iguales.

los de tiempo iguales (matemáticamente hablando, se trata de curvas de tipo exponencial, siendo I proporcional a $e^{-t/RC}$ y V proporcional a $(1 - e^{-t/RC})$). La característica principal de este tipo de curvas es el tiempo que tarda en aparecer o desaparecer (carga o descarga) una cierta parte de la carga, una magnitud similar a la vida media de un núcleo radiactivo que indica el tiempo que tarda en reducirse a la mitad su nivel de radiactividad. El producto RC , llamado *constante de tiempo*, representa el tiempo que tarda el circuito en alcanzar el 63 por 100 de la carga final en el condensador, cuando se está cargando, o el tiempo que tarda el circuito en alcanzar el 37 por 100 de la carga que tenía el condensador, en un circuito de descarga (Fig. 15.6).

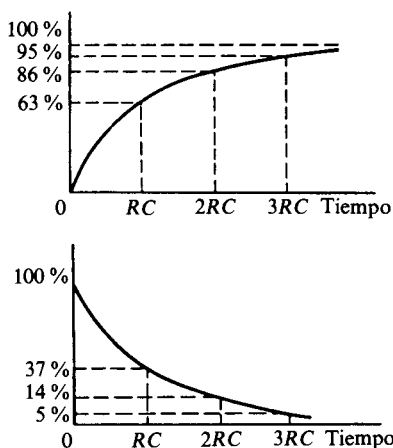


Figura 15.6.—Significado de la constante de tiempo RC .

Después de unos cuantos intervalos de tiempo iguales a una constante de tiempo hay muy poca diferencia entre los valores alcanzados y los valores finales, como indica la tabla 15.1.

TABLA 15.1

| Número de intervalos RC | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---------------------------|----|----|----|----|----|
| Crecimiento (%) | 63 | 86 | 95 | 98 | 99 |
| Decrecimiento (%) | 37 | 14 | 5 | 2 | 1 |

Después de tres constantes de tiempo se considera que se ha alcanzado el 95 por 100 de la situación final. Por ejemplo, si $R = 10 \text{ k}\Omega$ y $C = 100 \text{ }\mu\text{F}$:

$$RC = 10.000 \times \frac{100}{1.000.000} = 1 \text{ s}$$

por lo que después de 3 s sólo faltaría el 5 por 100 restante para acabar, y después de 5 s sólo faltaría un 1 por 100.

15.5. El condensador ante corrientes continuas

Del apartado anterior se puede deducir que los condensadores no permiten la circulación de corrientes continuas a través de ellos: los electrones no pueden pasar a través del condensador desde un terminal a otro porque hay una capa aislante en medio. Solamente mientras se está cargando o se está descargando existe una corriente que se puede registrar con un amperímetro, y dura poco tiempo. Para valores normales de resistencia y de capacidad, unos $100 \text{ }\Omega$ y $10 \text{ }\mu\text{F}$, la constante de tiempo RC tiene un valor

pequeño: $\left(100 \times \frac{10}{1.000.000} = \frac{1}{1.000} \text{ s}\right)$ y según esto se comprueba

que la gráfica del apartado 15.3 representa un caso normal.

Por tanto, se produce un pico de corriente, pero no constituye lo que se conoce por corriente continua. Aplicando este efecto en un circuito donde hubiera una fuente de tensión continua que cambiara alternativamente su polaridad (utilizando un conmutador giratorio, por ejemplo), se produciría un pico de corriente en cada carga y en cada descarga (Fig. 15.7).

Se puede comprobar la importancia que tiene la constante de tiempo del circuito introduciendo una resistencia en el circuito de carga. Dependiendo del valor de RC comparado con el tiempo de conmutación de polaridad, variará la forma de la gráfica, como se aprecia en la figura 15.8. Compárense estas gráficas, que se pueden visualizar en un osciloscopio, con lo representado en la figura 12.6, en la cual se utiliza un condensador para alisar

una tensión continua rectificadada. En el último caso se necesita un valor RC grande comparado con el tiempo de repetición de $1/50$ segundos de la fuente.

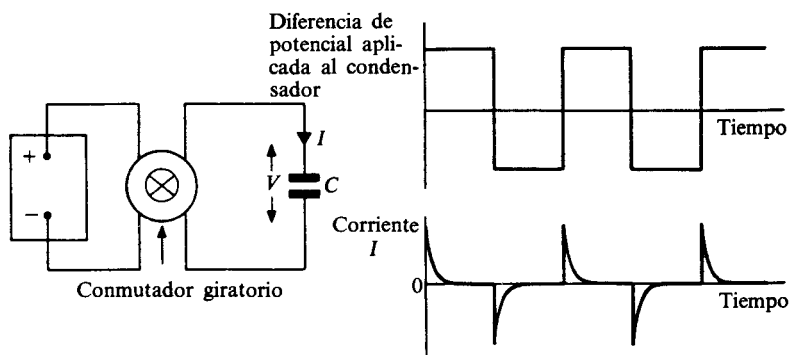


Figura 15.7.—Corriente en un condensador.

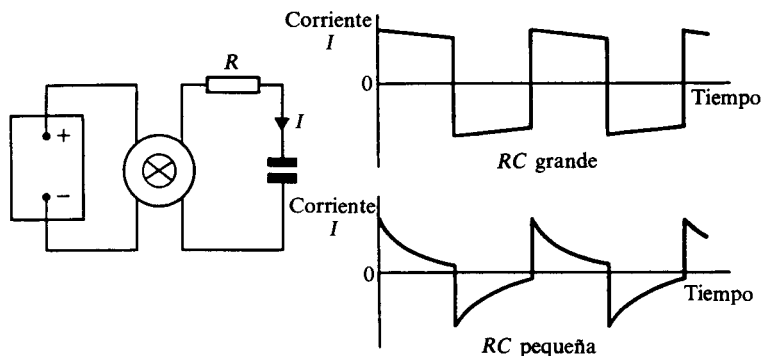


Figura 15.8.—Corriente con diferentes constantes de tiempo.

15.6. El condensador ante corrientes alternas

El sistema de conmutación de la fuente de tensión continua del apartado anterior no es muy diferente de un sistema con tensión alterna, donde la polaridad de la tensión cambia suavemente, en lugar de hacerlo de forma instantánea. Se puede pensar que

bajo la influencia de una tensión alterna debe pasar algún tipo de corriente alterna por el condensador, pero ¿qué relación hay entre estas dos magnitudes? En el capítulo 18 se entra en detalle, pero podemos decir que la corriente será más elevada cuanto más rápidamente cambie la tensión, y será cero cuando la tensión sea totalmente constante, pues esto se puede deducir del caso en que había una fuente de tensión continua que conmutaba su polaridad. En la figura 15.9 se representa el caso en que hay una capacidad «pura» con una resistencia despreciable en el circuito (pero la situación representada corresponde a unos instantes después de conectar el circuito, cuando ya está en régimen permanente).

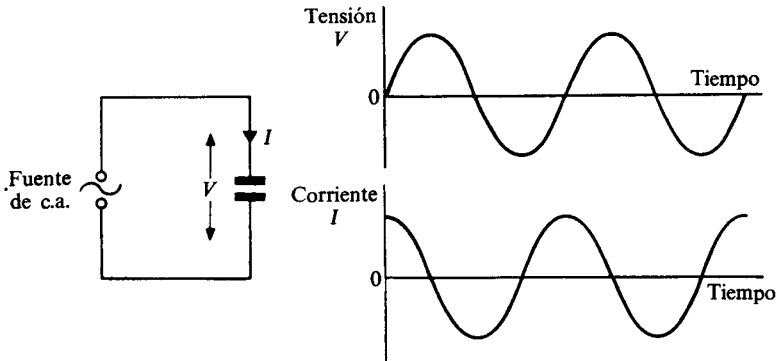


Figura 15.9.—Circulación de corriente alterna a través del condensador.

Una observación rápida de estas curvas conduce a la obtención de tres conclusiones claras:

- La curva de corriente tiene la misma forma que la curva de la tensión, lo cual quiere decir que hay una circulación de corriente alterna a través del condensador.
- La corriente máxima está relacionada de forma proporcional con la tensión máxima, lo cual quiere decir que existe una «resistencia en alterna» de funcionamiento.
- La curva de corriente está desfasada con respecto a la curva de la tensión en un cuarto de ciclo.

En el capítulo 17 veremos que esa «resistencia en alterna» depende de la frecuencia, por lo cual los condensadores tienen una propiedad muy interesante cuando están en circuitos de alterna.

15.7. Energía almacenada en un condensador

Cuando un condensador está cargado tiene un exceso de electrones en su terminal negativo y una falta de electrones en su terminal positivo, existiendo una diferencia de potencial entre ellos. Por tanto, tiene almacenada una energía eléctrica dentro de él, que puede utilizarse descargándolo parcial o totalmente.

La energía almacenada proviene del trabajo realizado por la fuente eléctrica para cargar el condensador. Al principio es muy fácil para las cargas eléctricas colocarse en el condensador, puesto que la diferencia de potencial es cero, pero a medida que va aumentando la carga más trabajo se debe realizar para añadir más carga en contra del aumento de la diferencia de potencial, hasta que en un cierto tiempo el condensador se carga totalmente y su diferencia de potencial se iguala a la de la fuente. Si toda la carga Q se hubiera llevado en contra de una diferencia de potencial constante V , el trabajo realizado sería QV (Ap. 3.4), pero puesto que la diferencia de potencial aumenta gradualmente desde 0 hasta V , el trabajo realizado será sólo $(1/2)QV$.

La energía almacenada en un condensador W es, por tanto, $(1/2)QV$, y su valor estará en julios si Q está en culombios y V en voltios.

Energía almacenada:

$$W = \frac{1}{2} QV$$

o, utilizando $C = Q/V$,

$$W = \frac{1}{2} CV^2$$

o bien

$$W = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C}$$

Cuando se utilicen expresiones donde aparezca C , se debe recordar que esta magnitud debe estar en faradios; por ejemplo, si un condensador de $10 \mu\text{F}$ está cargado a 100 V :

$$\begin{aligned} W &= \frac{1}{2} CV^2 \\ &= \frac{1}{2} \times \frac{10}{1.000.000} \times (100)^2 \text{ J} \\ &= \frac{1}{20} \text{ J} \end{aligned}$$

Es interesante considerar la potencia desarrollada si esta energía se libera de forma esporádica por medio de una chispa, en $1/1.000$ segundos. Potencia = Energía por segundo; por tanto, en este caso:

$$P = \frac{1/20}{1/100} = 5 \text{ W}$$

Si el mismo condensador de antes estuviera cargado a 1.000 V tendría una energía cien veces mayor, es decir, tendría 5 J , desarrollando una potencia de 500 W si se descargara de forma repentina. La intensidad del chispazo, o el efecto que se produciría en una persona que tocara los dos terminales del condensador a la vez, mostrarían claramente la diferencia entre estos dos casos.

15.8. Aplicaciones de los condensadores

Ya se han descrito dos aplicaciones de los condensadores en los apartados 12.4 y 14.5, para suprimir chispazos entre los contactos de los interruptores y para alisar (filtrar) las tensiones rectificadas. Se aplican también mucho en amplificadores electrónicos, receptores de radio y de televisión, sistemas de radar y de microondas, circuitos para controlar los semáforos, etc., y de hecho normalmente en todos los equipos transistorizados, órganos elec-

trónicos, osciladores, sintetizadores, etc.; la lista es interminable. Los condensadores, junto con las resistencias, tienen gran cantidad de aplicaciones en aparatos tanto del hogar como de la industria. (En el capítulo 19 se verán condensadores utilizados en circuitos electrónicos sencillos.)

15.9. Resumen

Capacidad = Carga/Voltaje

— Para condensadores conectados en paralelo:

$$C = C_1 + C_2 + C_3$$

— Para condensadores conectados en serie:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}$$

- Cuando un condensador se descarga o se carga a través de una resistencia, es la constante de tiempo RC la que determina el tiempo necesario para alcanzar un valor determinado.
- Los condensadores se utilizan para bloquear el paso de la corriente continua.
- Los condensadores dejan pasar la corriente eléctrica alterna, pero con un desfase con respecto a la tensión.
- La energía almacenada en un condensador cargado es

$$\frac{1}{2}CV^2, \text{ o bien } \frac{1}{2}QV, \text{ o bien } \frac{1}{2}\frac{Q^2}{C}$$

16

Inductancia

16.1. Autoinducción. Bobina o «choke»

El concepto de autoinducción ya se introdujo en el apartado 10.12. En la figura 10.17 se representa la f.e.m. que se genera cuando empieza o deja de circular una corriente en un circuito en el cual hay una inducción magnética apreciable. Una bobina de cable arrollado en un núcleo de hierro produce estas condiciones, y se dice que tiene una inductancia y que es una bobina o un *choke* (palabra anglosajona algo antigua).

Una bobina inductora se fabrica de forma muy parecida a un transformador de una sola bobina (Fig. 16.1), formando un circuito magnético casi cerrado utilizando chapas en forma de U y de T, con la bobina arrollada en la columna central de la T. El número de espiras (vueltas de hilo) y la cantidad de hierro del núcleo determinan el valor de su inductancia. Queda un pequeño hueco con aire entre la parte de arriba de la T y la parte de abajo de las chapas en U, con lo cual se asegura que haya efecto

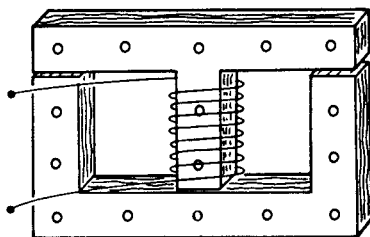


Figura 16.1.—Estructura de una bobina de inducción.

de inducción sobre una variedad razonable de corrientes. Incluso los componentes normales de los circuitos y los cables sencillos tienen pequeñas inductancias, pero generalmente son de pequeño valor para ser significativas en la práctica (excepto a frecuencias muy altas).

16.2. El efecto «choke»

Una inductancia en un circuito produce una f.e.m. contraria, o fuerza contraelectromotriz, siempre que se produzca una variación de la corriente, es decir, que el efecto tiende a contrarrestar el aumento o disminución de corriente (esto es un ejemplo de la ley de Lenz, Ap. 10.5). Cuando se conecta un circuito fuertemente inductivo se comprueba muy bien que la corriente aumenta lentamente (Figura 16.2).

Cuanto más grande sea la inductancia, más tiempo tardará la corriente en alcanzar su valor final, pero en todos los casos el valor final es el mismo que alcanzaría si no hubiera ninguna inductancia; o sea, la corriente tendrá el valor E/R al final. La f.c.e.m. simplemente alarga el tiempo que tarda en alcanzar su valor normal.

NOTA: En la práctica, la bobina de inducción tiene una resistencia propia que se debe incluir en el valor R .

16.3. El henrio

La inductancia se mide en henrios, cuyo símbolo es H (se debe al científico americano Joseph Henry, 1797-1878) y su valor determina la razón entre la f.c.e.m. y la velocidad con que cambia la corriente:

$$\text{Inductancia} = \frac{\text{f.c.e.m.}}{\text{Velocidad de cambio de la corriente}}$$

$$1 \text{ henrio} = \frac{1 \text{ voltio}}{1 \text{ amperio por segundo}}$$

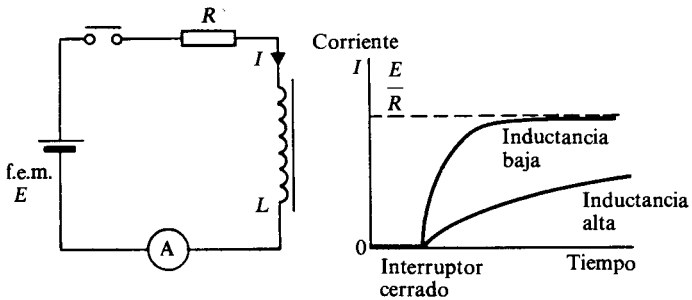


Figura 16.2.—Crecimiento lento de la corriente en una bobina inductora.

Esto quiere decir que una bobina tiene una inductancia de un henrio si una corriente que varía a la velocidad de un amperio por segundo provoca una f.c.e.m. de un voltio. Cuanto más rápidamente varía la corriente, mayor es la f.c.e.m. que se opone al aumento de la corriente.

Una inductancia de 1 H es bastante grande, por lo cual en la práctica se suele utilizar más normalmente el mH (milihenrio).

16.4. Constante de tiempo en los circuitos inductivos

La rapidez con que crece una corriente en un circuito depende tanto de la inductancia como de la resistencia. La gráfica en función del tiempo es similar a la vista en el apartado 15.4 para el aumento de la diferencia de potencial en un condensador (Figura 15.6). En la figura 16.3 se representa la curva correspondiente a la corriente en función del tiempo, y también aquí existe una constante de tiempo L/R que se utiliza para describir la forma de la curva, de forma análoga a como se hace en el caso de los condensadores cuando se están cargando o descargando (la razón por la cual la constante de tiempo es L/R se sale del objetivo de

este libro, pero la ecuación de la curva es $I = \frac{E}{R}(1 - e^{-(R/L)t})$. Por tanto, si tenemos $L = 10$ H y $R = 2$ Ω , la constante de tiempo sería $L/R = 5$ s, dando lugar a un crecimiento muy lento de la corriente,

mientras que para $L = 10 \text{ mH}$ y $R = 1 \text{ k}\Omega$ la constante de tiempo sería:

$$\frac{L}{R} = \frac{10}{1.000 \times 1.000} \text{ s} = 10 \text{ }\mu\text{s}$$

y esto daría lugar a una subida prácticamente instantánea del valor de la corriente, alcanzando el valor E/R .

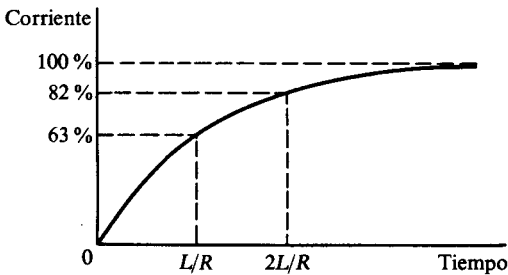


Figura 16.3.—Constante de tiempo en circuitos inductivos.

Cuando se abre un circuito inductivo se produce una f.e.m. muy grande (Aps. 10.4, 10.12 y 10.13), y esto puede ser una ventaja o una desventaja, produciéndose un retraso en la caída de la corriente con una constante de tiempo similar de valor L/R (Fig. 16.4) (el interruptor se debe proteger contra chispazos mediante un condensador). En este caso, la f.e.m. mantiene la corriente, es decir, evita que la corriente desaparezca bruscamente haciéndolo suavemente.

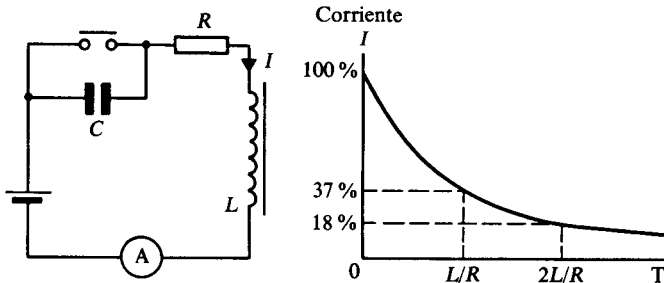


Figura 16.4.—Descenso de la corriente cuando se abre el circuito.

16.5. Conmutación repetitiva para conectar y desconectar

Si dispusiéramos de un conmutador mecánico (compárese con la figura 15.8) que invirtiera la polaridad de la fuente (de la pila, en este caso), como se indica en la figura 16.5, se podrían obtener gráficas de corriente como las que hay en la figura, variando la constante de tiempo. Esas curvas se pueden ver en la pantalla de un osciloscopio conectado a la resistencia R . (¿Por qué se necesita un condensador en este caso?)

Por la forma como se comporta una bobina o *choke* ante los cambios en cualquier dirección se explica su utilidad en filtrado de las tensiones alternas rectificadas (Ap. 12.6).

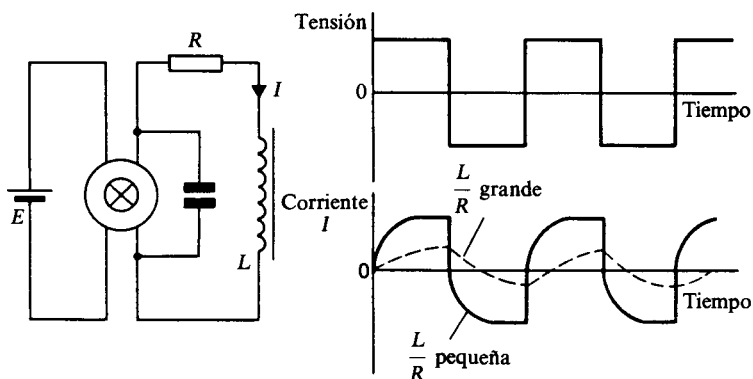


Figura 16.5.—Corriente con diferentes constantes de tiempo.

16.6. Bobinas de inducción en circuitos de corriente alterna

En vez de utilizar un sistema de corriente continua que conmuta mecánicamente para cambiar el sentido de la corriente, se puede aplicar una tensión alterna a la bobina para producir el efecto cambiante que se pretende. Puesto que la bobina de inducción es simplemente una bobina de cable arrollado en un núcleo de hierro, conducirá muy bien la corriente eléctrica, pero el efecto *choke* ten-

derá a impedir que varíe el valor de la intensidad de la corriente, intentando evitar que aumente la corriente cuando aumenta la tensión aplicada, e intentando mantener la circulación de corriente cuando el valor de la tensión decrece. Esto tiene como consecuencia que la variación de corriente siempre llega con un retraso con respecto a la variación de la tensión (Fig. 16.6). (La curva correspondiente a la corriente en este diagrama muestra cómo está la situación un poco tiempo después de conectar el circuito, cuando ya se ha establecido el régimen permanente.)

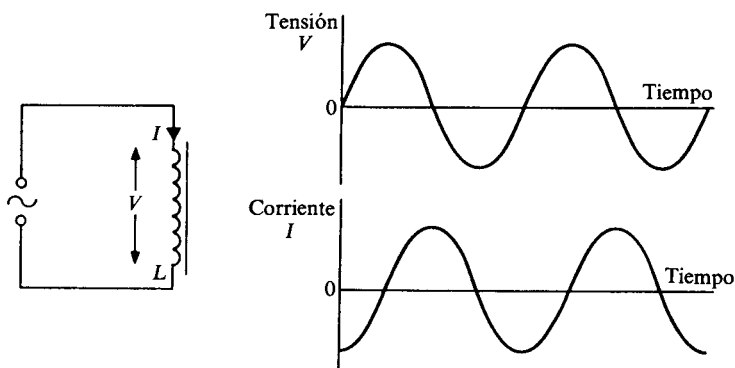


Figura 16.6.—Tensión y corriente en una bobina en un circuito de alterna.

Como en el caso del condensador (Ap. 16.7), estas curvas muestran que:

- La curva de la corriente tiene la misma forma que la curva de la tensión.
- La corriente máxima está relacionada proporcionalmente con la tensión máxima; esto quiere decir que existe una cierta «resistencia en alterna».
- La curva de la corriente está desfasada con respecto a la curva de la tensión en un cuarto de ciclo.

En el capítulo siguiente se ven más características del comportamiento de las corrientes eléctricas.

16.7. Energía almacenada en una bobina

Al igual que en el caso de las resistencias y de los condensadores, hay una transferencia de energía cuando circula una corriente a través de una bobina. Utilizando corriente continua es fácil ver que se necesita una energía para cambiar el estado magnético del núcleo de hierro de la bobina de inducción. La expresión que se utiliza para calcular este trabajo es $(1/2)LI^2$ (que se parece a la utilizada para un condensador: $(1/2)CV^2$). Por tanto, si tenemos un *choke* de 1 H por el cual circula una corriente de 2 A, la energía que tiene almacenada es $(1/2) \times 1 \times 4 = 2$ J. Hay que resaltar un detalle: la cantidad de energía depende del cuadrado de la corriente, de igual forma que en un condensador la energía depende del cuadrado de la diferencia de potencial.

16.8. Aplicaciones de las bobinas de inducción

En el apartado 14.6 aparece un *choke* como parte del circuito de suavizado o filtrado en un rectificador. Para esta aplicación se necesita una inductancia bastante grande para que se produzca un rizado pequeño y que la disminución de corriente sea mínima en el intervalo de tiempo de repetición (1/100 s) del rectificador de onda completa. En la práctica, el valor de la inductancia sólo se puede aumentar teniendo en cuenta las limitaciones que ofrece el tamaño de la bobina y, por tanto, no puede ser todo lo grande que se desee.

En los osciladores y en los receptores de radio y de televisión tienen aplicaciones importantes las bobinas. En ambos casos se utiliza el comportamiento que tienen las bobinas y los condensadores en circuitos donde hay corrientes que varían en el tiempo. En el capítulo 18 se tratan algunos de estos efectos.

16.9. Resumen

- Una bobina de inducción es como un transformador de una sola bobina.
- La inductancia es la razón entre la f.e.m. opuesta y la velocidad de cambio de la corriente, y se mide en henrios.

- Un henrio es un voltio por (amperio por segundo).
- La constante de tiempo de un circuito inductivo es L/R .
- Una bobina en un circuito de corriente continua se opone al aumento o disminución de la corriente.
- En un circuito de alterna donde haya una bobina, la corriente eléctrica circula, pero desfasada con respecto a la tensión.
- La energía almacenada en una bobina por la que circula una corriente es $(1/2)LI^2$.

17

Circuitos de corriente alterna (c.a.)

17.1. Algunos términos básicos

Cuando se trata de corriente o tensión continua sólo se necesitan saber dos cosas para que queden determinadas: el valor que tienen y la dirección. Por ejemplo, 5 A o 12 V, y la dirección que tienen es suficiente para determinar la corriente o la diferencia de potencial. En corriente o tensión alterna hay más cosas que se deben conocer: amplitud, valor eficaz, frecuencia o período, fase y algunas veces la forma. Es muy sencillo obtener estos factores a partir de un gráfico en función del tiempo de la intensidad o tensión en cuestión (Fig. 17.1).

Amplitud: Es el máximo valor alcanzado en cualquier dirección; por tanto, se mide en voltios o amperios.

Valor eficaz: En una forma de onda senoidal, es el valor máximo dividido por $\sqrt{2}$, o el 71 por 100 del valor máximo, aproximadamente (Ap. 17.6).

Período: Es el tiempo que tarda la onda en realizar un ciclo; se mide en segundos o milisegundos.

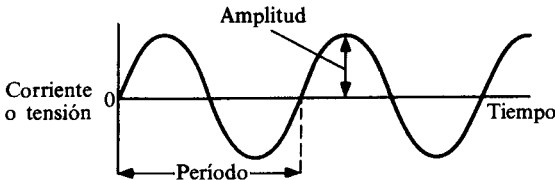


Figura 17.1.—Características de la corriente o de la tensión alterna.

Frecuencia: El número de ciclos completos por unidad de tiempo, es decir, por segundo, es la inversa del periodo y se mide en hertzios (en honor del físico alemán Heinrich Rudolf Hertz, 1857-1894). Un hertzio es un ciclo por segundo. La tensión de red de las casas tiene una frecuencia de 50 Hz y un periodo de $1/50$ s.

Fase: La idea ya se comentó en el apartado 13.7 cuando se trató de los generadores de alterna; se utiliza mucho para describir el desfase que hay entre unas tensiones (o intensidades) y otras. El desfase entre dos ondas es la diferencia de fase que existe entre ellas (Ap. 17.3).

Forma: Es el aspecto que tiene el diagrama de la magnitud en cuestión en función del tiempo; normalmente se utiliza la onda senoidal, que varía suavemente en el tiempo, pero también aparecen en casos más complicados formas de onda cuadradas, triangulares o pulsatorias.

17.2. Frecuencia y período

Cualquiera de estos términos se puede emplear para indicar la rapidez de variación de la onda de tensión o de corriente, de igual forma que, hablando del servicio de autobuses, decimos que pasan tres cada hora o uno cada veinte minutos ($1/3$ de hora).

En la mayoría de los países se utilizan 50 ó 60 Hz como frecuencia de la tensión de red en las casas. Pero en radio, televisión, radar, radioastronomía, sistemas de microondas, etc., se utiliza una gama de frecuencias muy amplia, desde unos pocos kilohertzios hasta megahertzios o incluso gigahertzios (mil millones).

17.3. Fase y diferencia de fase

El concepto de fase no se suele utilizar de forma absoluta, sino que se emplea para describir la diferencia de fase o el desfase que existe entre dos ondas de tensión o de intensidad. En la figura 17.2 se representan dos corrientes alternas de la misma frecuencia, primeramente en fase y después desfasadas.

Dos ondas que se encuentran en fase alcanzan su valor máximo

(amplitud) al mismo tiempo y pasan por cero también a la vez. Si están desfasadas no alcanzan el valor máximo o no pasan por la línea de cero al mismo tiempo. En el caso especial en que están en contrafase, se mueven en sentidos contrarios pero pasan por cero al mismo tiempo.

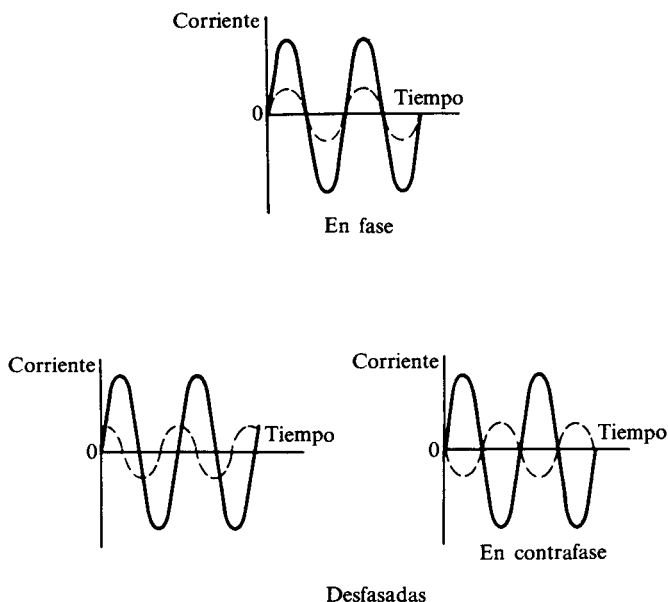


Figura 17.2.—Ondas de corriente alterna en fase y desfasadas.

La diferencia de fase mide la cantidad en que están desfasadas dos ondas. Normalmente se expresa como un ángulo en grados, entre 0° y 360° , que representa una división de un ciclo completo (Fig. 17.3).

Por tanto, 90° equivale a $1/4$ de ciclo, 180° equivale a $1/2$ ciclo, y así sucesivamente. El desfase entre dos ondas es la parte de un ciclo o el ángulo que existe entre puntos análogos o correspondientes de las dos ondas; por ejemplo, cuando pasan por cero o cuando alcanzan sus valores máximos. En la figura 17.4 se muestran algunos ejemplos.

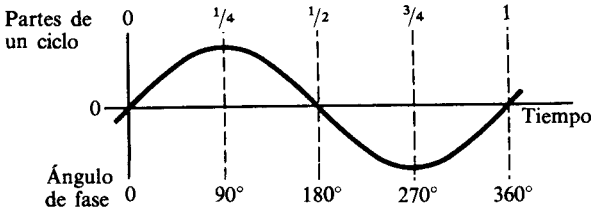


Figura 17.3.—Ángulos de fase en un ciclo completo.

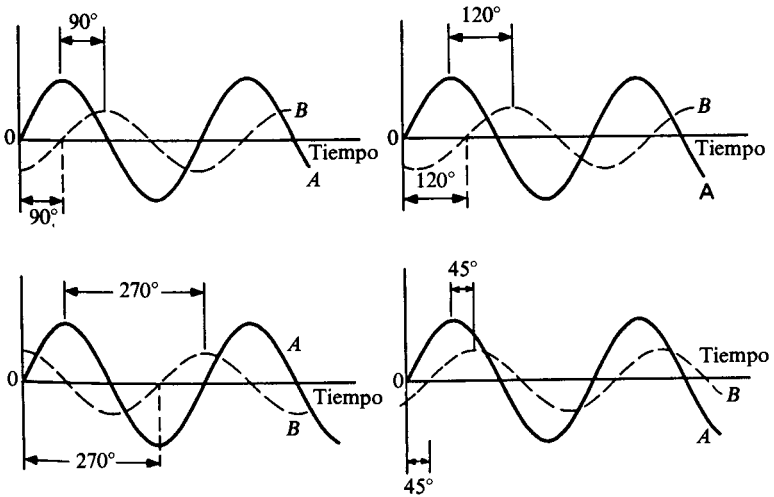


Figura 17.4.—Desfases entre dos ondas alternas.

17.4. Retraso y adelanto

En cada una de las curvas de la figura 17.4 se indica la diferencia de fase o el desfase con respecto a la curva *A*, así como los ángulos de adelanto que llevan. Es igualmente válido utilizar la curva *B* como referencia porque es la diferencia lo que importa, pero si se hiciera así en el primer ejemplo, el ángulo sería de 270° en vez de ser de 90° . Para evitar este tipo de confusión es necesario decir qué curva está por delante o por detrás de la otra, surgiendo así los conceptos de adelanto y retraso.

Refiriéndonos al primer ejemplo, la curva *A* está 90° adelantada con respecto a la curva *B*, puesto que alcanza su máximo antes que la *B* alcance el suyo, y en el segundo ejemplo está adelantada 120° . En el tercer ejemplo sería tan fácil como decir que la curva *B* está adelantada 90° respecto de *A*, o que *A* está 270° retrasada con respecto a *B*. Para que no sea ambiguo se debe decir el desfase como un ángulo y además añadir qué curva está adelantada o atrasada (para una diferencia de fase de 180° , da igual qué curva está adelantada o atrasada, puesto que están en contrafase).

17.5. Desfase con diferentes frecuencias

Con dos corrientes alternas de diferente frecuencia ya no es útil la idea de desfase porque, como se muestra en la figura 17.5, las dos ondas están unas veces en fase y otras no. En los instantes *P* y *T* las dos ondas están en fase, en *R* están desfasadas y en los instantes intermedios tienen diferentes desfases (por ejemplo, en *Q* y en *S*).

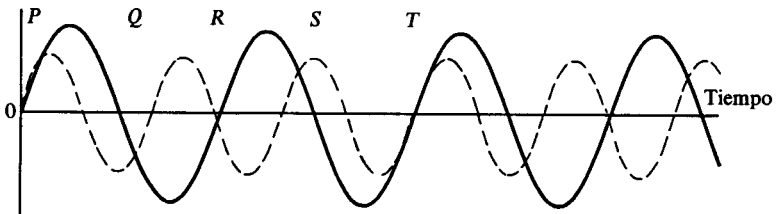


Figura 17.5.—Relación de fase con frecuencias diferentes.

17.6. Valor de la corriente alterna. Valores eficaces

Si se utiliza un amperímetro o un voltímetro de bobina móvil en un circuito de alterna, no se obtiene ningún resultado válido, puesto que el movimiento es demasiado rápido para que pueda seguirlo la bobina, resultando que la aguja marca el valor medio,

que es cero. A pesar de esto, debe haber una forma de medir y describir el valor de una corriente o tensión alterna.

Tanto la corriente continua como la corriente alterna hacen que se caliente el cable cuando pasan a través de él. Este efecto de calentamiento se utiliza, por tanto, para indicar el valor de una corriente alterna, de forma que una corriente de 5 A produce el mismo efecto tanto si es continua como si es alterna. Sabemos, por lo visto en el capítulo 8, que en el cálculo de la transferencia de calor es necesario introducir el valor de la corriente elevado al cuadrado (o de la tensión), por lo cual en corriente alterna lo que importará es el valor medio de estos valores elevados al cuadrado, dando lugar a lo que se llama *valor cuadrado medio*. Pero no se habla de una corriente alterna de 25 amperios cuadrados, sino que se calcula la raíz cuadrada del valor cuadrático medio, dando lugar al *valor eficaz* (*root mean square*, en inglés).

Supongamos que pudiésemos medir los valores instantáneos de una corriente alterna en un ciclo; obtendríamos 0, 1, 2, 3, 2, 1, 0, -1, -2, -3, -2, -1 amperios.

Obviamente, la media aritmética de estos valores es cero, pero elevando estos valores al cuadrado antes de hacer la media se obtiene el valor cuadrático medio: 0, 1, 4, 9, 4, 1, 0, 1, 4, 9, 4, 1 suman en total 38, calculando el valor cuadrático medio $38/12 = 3,17$. La raíz cuadrada de este valor es $\sqrt{3,17} = 1,78$ A (lógicamente se necesitan muchos más valores para calcular el valor eficaz con exactitud, pero esto ilustra la idea). En este ejemplo, la corriente alterna produciría el mismo efecto de calentamiento en los cables que una corriente continua de 1,78 A, por lo cual se dice que la corriente alterna es de 1,78 A.

Se puede demostrar matemáticamente que para una onda senoidal el valor eficaz es igual al valor de pico dividido por $\sqrt{2}$, o el 70,7 por 100 del valor de pico (Fig. 17.6). Por tanto, si tenemos una corriente alterna de 5 A (valor eficaz) realmente alcanza $5 \times \sqrt{2} = 7,07$ A en cada dirección, pero tendría el mismo efecto calorífico que una corriente continua de 5 A. De forma análoga, la tensión de red que hay en las casas es de 220 V, pero varía entre $220 \times \sqrt{2} = 311$ V y -311 V.

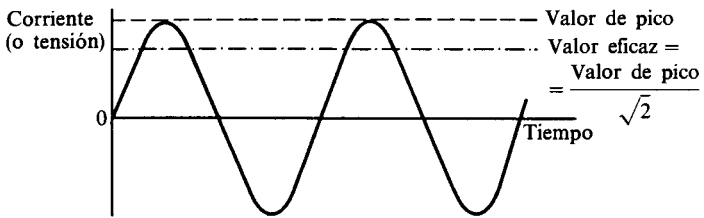


Figura 17.6.—Valor de pico y valor eficaz de una corriente alterna senoidal.

17.7. Resistencia en corriente alterna

Si tenemos un circuito de alterna con una resistencia, se cumple siempre la ley de Ohm (Fig. 17.7). Los cambios de tensión producen cambios de corriente en fase con ellos, y el valor de la corriente siempre es $I = V/R$ en cada instante.

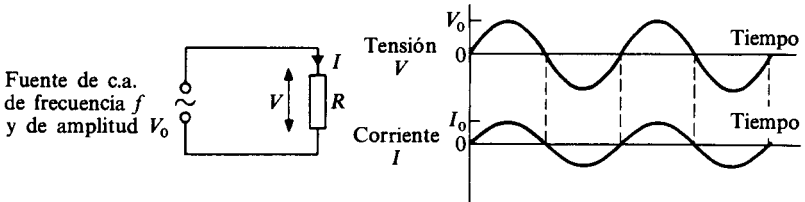


Figura 17.7.—Circuito de alterna con resistencia.

17.8. Condensadores en corriente alterna. Reactancia

Cuando se aplica una tensión alterna a un condensador (Apartado 15.7) hay un desfase de 90° entre la corriente y la tensión, estando adelantada la corriente (Fig. 17.8). Un análisis detallado demuestra que las amplitudes de la corriente y de la tensión están relacionadas de la siguiente forma:

$$I_0 = \frac{V_0}{\frac{1}{2\pi f C}}$$

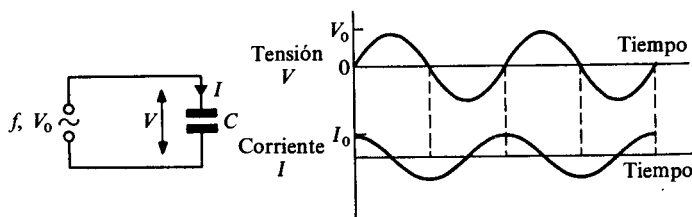


Figura 17.8.—Circuito de alterna con una capacidad.

Esto indica que el condensador tiene una *reactancia* que vale $1/2\pi fC$. Esta cantidad sólo aparece en alterna y se mide en ohmios si f está en hertzios y C en faradios. Por tanto, si tenemos un condensador de $1 \mu\text{F}$ a 50 Hz , su reactancia sería $\frac{1}{2\pi 50 \cdot 10^{-6}} \Omega = 3,2 \text{ k}\Omega$.

El símbolo de la reactancia capacitativa es X_C .

La propiedad más interesante de la reactancia es que varía con la frecuencia de la corriente alterna; por tanto, si tuviéramos una frecuencia de 5.000 Hz , el mismo condensador de antes de $1 \mu\text{F}$ tendría una reactancia de sólo $3,2 \Omega$. Esto quiere decir que los condensadores conducen mejor a altas que a bajas frecuencias, y por esta razón se utilizan como filtros para separar señales de frecuencias diferentes.

17.9. Resistencias y condensadores. Impedancia

Si en el circuito hay una resistencia y un condensador, como se muestra en la figura 17.9, el efecto general es similar, pero algunos detalles cambian. Sigue habiendo un desfase entre la corriente y la tensión, pero menor de 90° , y la relación entre sus amplitudes es más compleja. La corriente está adelantada con respecto a la tensión en un valor que depende del producto CR . La amplitud de la corriente viene dada por la siguiente expresión:

$$I_0 = \frac{V_0}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{2\pi fC}\right)^2}} = \frac{V_0}{\sqrt{R^2 + X_C^2}}$$

El denominador completo, $\sqrt{R^2 + X^2}$, se denomina *impedancia* del circuito, se representa por una Z y se mide en ohmios. La impedancia Z tiene dos componentes, una resistiva y otra reactiva, correspondientes a los elementos del circuito R y C .

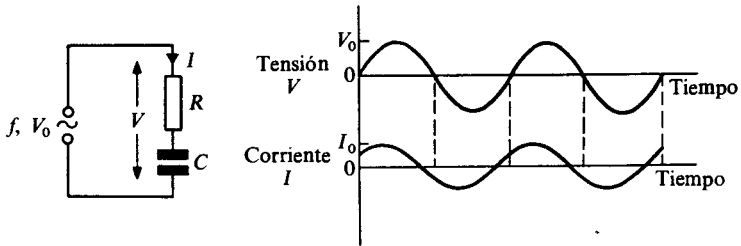


Figura 17.9.—Circuito de alterna con resistencia y condensador.

Algo curioso de este circuito es que las tensiones que caen en R y en C están desfasadas en 90° . Si se conecta un voltímetro de alterna (que mide valores eficaces sin tener en cuenta la fase) entre los terminales de R y de C , la suma de los dos valores medidos será más grande que la tensión aplicada.

17.10. Bobinas en circuitos de alterna. Reactancia

En el apartado 16.6 vimos que cuando hay una bobina de inducción en un circuito de alterna, la corriente está retrasada con respecto a la tensión en 90° (Fig. 17.10). Un análisis detallado de este caso demuestra que la amplitud de la corriente viene dada por la siguiente expresión:

$$I_0 = \frac{V_0}{2\pi fL}$$

donde $2\pi fL$ es la reactancia X_L de la bobina (comparémosla con la reactancia de un condensador, Ap. 17.8). Una bobina de 1 H a 50 H tiene una reactancia de $2\pi 50 = 314 \Omega$, pero, a diferencia de la reactancia capacitativa, la reactancia inductiva aumenta con la frecuencia (a 5.000 Hz, la misma bobina tendría una reactancia de 31,4 k Ω). Por tanto, se puede utilizar una bobina para filtrar frecuencias altas y separarlas de otras.

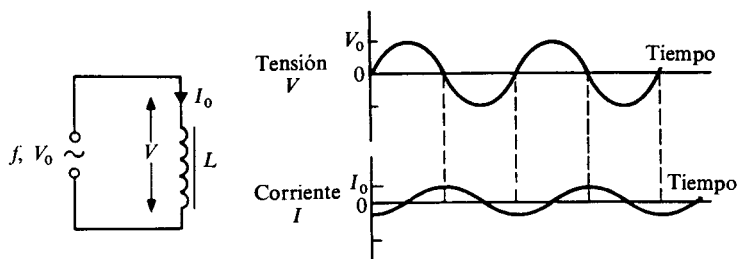


Figura 17.10.—Circuito de alterna con inductancia.

17.11. Resistencias y bobinas

Todas las bobinas tienen una resistencia propia, por lo cual es un caso más real si se considera una bobina en serie con una resistencia (Fig. 17.11). En este caso el retraso es menor de 90° , dependiendo del factor L/R , y la amplitud de la corriente es:

$$I_0 = \frac{V_0}{\sqrt{R^2 + (2\pi fL)^2}} = \frac{V_0}{\sqrt{R^2 + X_L^2}}$$

Igual que en el caso de los condensadores, el término $\sqrt{R^2 + X_L^2}$ se denomina impedancia del circuito y tiene un elemento resistivo y otro reactivo. Aquí también se cumple que la suma de las tensiones en R y en L es aparentemente mayor que la tensión aplicada.

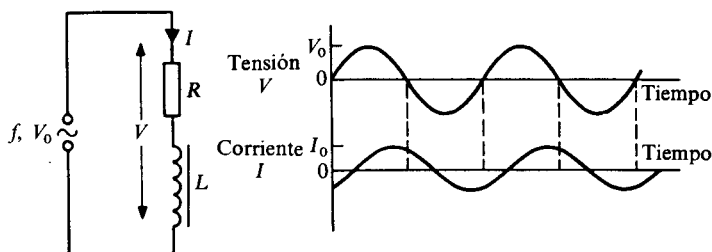


Figura 17.11.—Circuito de alterna con resistencia y bobina.

17.12. Condensadores y bobinas. Resonancia

Los circuitos más importantes de este capítulo son los que contienen condensador y bobina simultáneamente (Fig. 17.12). Se ha dibujado también una resistencia, puesto que es inevitable que la bobina tenga su propia resistencia.

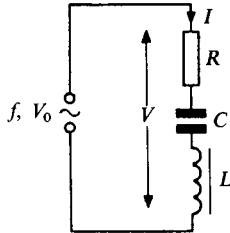


Figura 17.12.—Circuito de alterna con R , L y C .

En este caso la corriente puede estar adelantada o retrasada con respecto a la tensión, dependiendo de los valores de R , L y C .

La amplitud de la corriente viene dada por la siguiente expresión:

$$I_0 = \frac{V_0}{\sqrt{R^2 + \left(2\pi fL - \frac{1}{2\pi fC}\right)^2}} = \frac{V_0}{\sqrt{R^2 + X^2}}$$

Lo más interesante de este circuito aparece cuando se cumple que $2\pi fL = \frac{1}{2\pi fC}$. Hay una frecuencia para la cual se cumple la igualdad anterior, y cuando ocurre esto se anulan las reactancias de L y de C , dependiendo la corriente que circula por el circuito exclusivamente de R . Además, en estas condiciones la corriente y la tensión están en fase y la impedancia Z es mínima e igual a R . En la figura 17.13 se muestra una gráfica para ver cómo varía I_0 cuando varía la frecuencia por debajo y por encima de un valor especial de frecuencia llamado *frecuencia de resonancia*.

El valor de la frecuencia de resonancia se puede calcular a partir de la expresión:

$$2\pi f_r L = \frac{1}{2\pi f_r C}$$

resultando que

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Con $L = 1 \text{ H}$ y $C = 1 \mu\text{F}$, f_r vale 160 Hz, mientras que para 10 mH y 100 pF el valor de f_r es de 0,16 MHz.

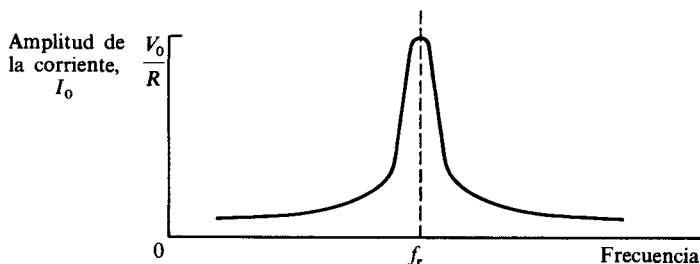


Figura 17.13.—Variación de la amplitud de la corriente con la frecuencia.

En sistemas mecánicos y acústicos muy variados se pueden encontrar ejemplos de resonancia:

- El golpeteo de parte de la carrocería de un coche a ciertas revoluciones por minuto del motor.
- La respuesta más potente de un altavoz de poca calidad ante ciertas notas musicales.
- La gran amplitud del columpio de un niño que se consigue empujando en determinados momentos apropiados.
- La historia real de que un vaso se puede romper cuando un cantante emite una nota alta.
- La rotura catastrófica de un puente colgante provocada por las vibraciones del viento a una cierta velocidad.

En todos estos casos se produce una amplitud grande de la vibración sólo a una determinada frecuencia, que coincide con la frecuencia a la cual vibraría el sistema de forma natural si no existiesen perturbaciones. La amplitud correspondiente a la frecuencia de resonancia de la figura 17.13 llega a ser mucho mayor que cualquier otra, y en el caso del circuito bobina-condensador este valor depende del valor de la resistencia; es decir, cuanto menor es la resistencia, más puntiagudo es el pico en la curva y mayor es su valor.

17.13. Circuito bobina-condensador

Si se carga un condensador y después se descarga a través de una bobina (Fig. 17.14), la corriente circula primero en un sentido y después en el otro, hacia atrás y hacia delante a una frecuencia determinada que coincide con la frecuencia de resonancia descrita en el apartado 17.12.

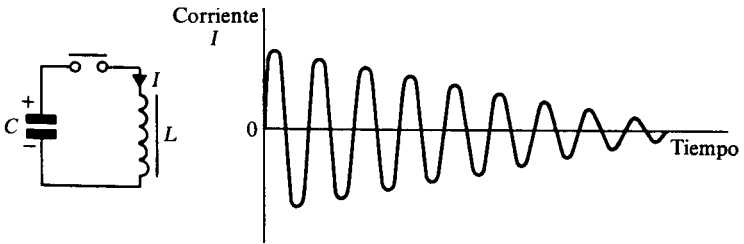


Figura 17.14.—Corriente oscilante en un circuito L - C .

Si no hubiera resistencia, estas corrientes oscilantes se mantendrían durante mucho tiempo, pero realmente se está disipando calor en la resistencia y esto reduce gradualmente la energía del sistema. Esto es muy parecido a la oscilación de un péndulo, que decrece gradualmente debido al efecto del rozamiento, pero que si se le da un golpe en el momento apropiado, se puede mantener con una amplitud constante y a su frecuencia natural. Se puede realizar un circuito paralelo L - C que funcione también de esta forma utilizando las señales débiles que capta una antena de radio o de televisión (Fig. 17.15).

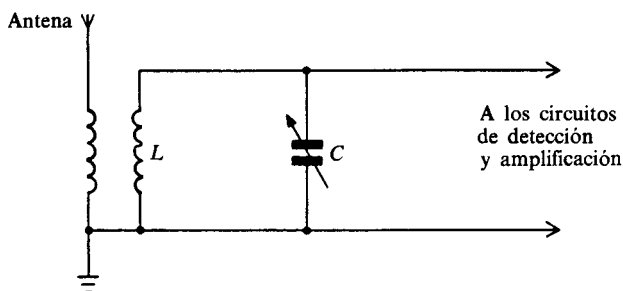


Figura 17.15.—Circuito L - C con antena de radio.

Cada combinación L - C seleccionará una frecuencia determinada, que coincida con su frecuencia natural de oscilación, por dar una respuesta mucho más acusada que las demás frecuencias captadas por la antena, sintonizando de esta forma con una emisora de radiodifusión determinada. Con un condensador variable se puede elegir la emisora, pues la frecuencia de resonancia puede variar dentro de una gama determinada.

17.14. Osciladores

Una aplicación importante de los circuitos L - C es la generación de oscilaciones eléctricas dentro de una gama de frecuencias determinada. Los circuitos que realizan esta función se denominan *osciladores*, y se basan en las propiedades de resonancia que tienen los acoplamientos L - C . Para que funcione un circuito de éstos se necesita primeramente que empiece a oscilar el sistema L - C , y después hay que suministrar energía suficiente a su frecuencia natural para mantener las oscilaciones. Sin entrar en detalles, el circuito con transistor de la figura 17.16 realiza estas funciones.

Las oscilaciones empiezan en L - C_1 al conectar a la fuente de +9 V, pero posteriormente son mantenidas por efecto del transistor. Variando C_1 se puede cambiar la frecuencia de oscilación. Se pueden obtener formas de ondas senoidales muy buenas utilizando circuitos que contienen componentes L - C .

Una aplicación evidente de los osciladores electrónicos se encuentra en la generación de sonidos para órganos electrónicos y sintetizadores.

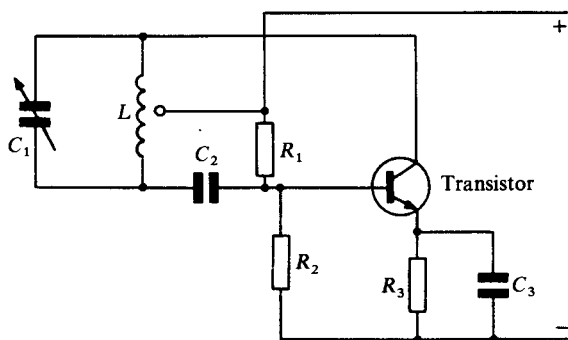


Figura 17.16.—Oscilador de Hartley.

17.15. Resumen

- Los parámetros característicos de la tensión e intensidad alternas son: amplitud, valor eficaz, período, frecuencia, fase y forma.
- Los desfases se describen como adelantos o atrasos medidos en partes de un ciclo de 360° .
- El valor eficaz de una corriente alterna es el que tiene una corriente continua equivalente que produzca el mismo efecto calorífico.
- En una onda senoidal, el valor eficaz es el 70,7 por 100 del valor de pico.
- En una resistencia no hay desfase entre la tensión y la intensidad.
- En un condensador hay un desfase de 90° entre la tensión y la intensidad alternas, estando adelantada la intensidad.
- La reactancia de un condensador es $X_C = \frac{1}{2\pi fC}$.
- La impedancia de un circuito es $Z = \sqrt{R^2 + X^2}$.
- En una bobina, la tensión y la intensidad alternas están desfasadas en 90° , estando la corriente atrasada.
- La reactancia de una bobina es $X_L = 2\pi fL$.
- Cuando en el circuito está incluida una resistencia, el desfase es menor de 90° .

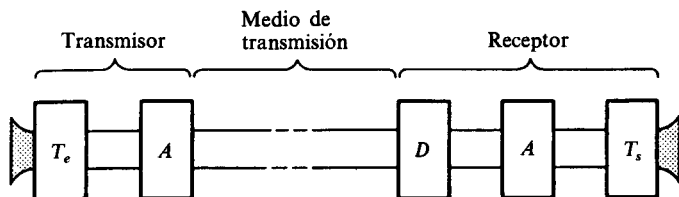
- En un circuito L - C , la corriente alterna alcanza la resonancia a una frecuencia de $f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$.
- Los circuitos L - C se utilizan para seleccionar unas frecuencias determinadas.
- Los circuitos L - C son la base de los osciladores.

18

Comunicación con electricidad

18.1. Elementos de la comunicación

Todos los sistemas eléctricos de comunicación a larga distancia tienen ciertas características comunes que en la práctica pueden ser bastante simples o muy complejas (Fig. 18.1).



T_e : Transductor de entrada, que convierte la información que se va a transmitir en señales eléctricas.

A : Amplificadores para aumentar la intensidad de las señales pequeñas, sin distorsión ni pérdida de información, siempre que sea posible.

D : Detector/decodificador, que capta las señales transmitidas y separa las partes esenciales de las mismas.

T_s : Transductor de salida, que convierte las señales eléctricas en una forma apropiada para su uso.

Figura 18.1.—Componentes de un sistema de comunicación.

Este modelo está muy simplificado, pero indica las partes principales de cualquier sistema de comunicación. Un ejemplo muy simple donde no se utiliza la electricidad es el teléfono de juguete hecho con dos botes metálicos y un trozo de cuerda (Fig. 18.2).

En este caso, el metal puede convertir el sonido en vibraciones mecánicas que se transmiten por la cuerda (la cual debe mantenerse tensa para que funcione) y en el otro extremo el bote vuelve a convertir las vibraciones en sonido. Los botes también ejercen un cierto efecto de amplificación y, si la cuerda no roza con nada por el camino, el «teléfono» funciona sorprendentemente bien.

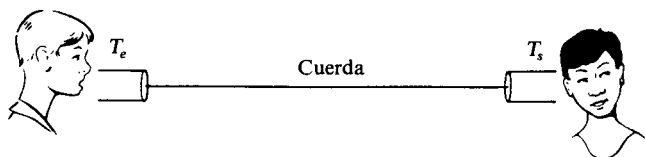


Figura 18.2.—Teléfono hecho con una cuerda.

18.2. Algunas aplicaciones prácticas

El tema de las telecomunicaciones se ha desarrollado muchísimo, existiendo sistemas muy sofisticados cuya descripción se sale del objetivo de este libro, pero podemos mencionar algunos ejemplos sencillos básicos. El teléfono constituye un sistema relativamente sencillo: el transductor de entrada es un micrófono, hay un transformador que actúa como un amplificador sencillo, los cables son el medio de transmisión y el altavoz es el receptor y el transductor de salida. Los circuitos de conexión y de comunicación se utilizan realmente para mejorar el servicio, pero no forman parte del sistema básico. Puesto que hay una conexión física por medio de cables desde el transmisor hasta el receptor, existe en la red telefónica un número de enlaces máximo que se pueden establecer simultáneamente.

Los sistemas de radio y de televisión son más complejos, puesto que el medio que se utiliza no es sólido, sino que se usan ondas electromagnéticas que se transmiten a largas distancias (incluso astronómicas). La información sonora y visual se debe convertir en señales eléctricas que son transportadas por medio de otras señales desde las emisoras de radio o de televisión. Por tanto, el receptor necesita una antena para captar las señales, y además debe tener circuitos electrónicos muy complicados para decodificar la información original y amplificarla hasta que se pueda disponer de ella.

Los teletipos son similares a los sistemas de radio, pero la información se obtiene de material escrito, se codifica según un código y se transmite a bastante distancia utilizando señales de onda corta, con estaciones repetidoras que retransmiten la información de un lugar a otro. Se necesita una maquinaria decodificadora especial en la salida que escribe automáticamente.

El código Morse (así denominado en honor del inventor estadounidense Samuel Finley Breese Morse, 1791-1872) constituye una de las formas más simples de codificar la información. Las técnicas digitales, que utilizan *scanners* electrónicos, constituyen un desarrollo moderno de la idea original de utilizar impulsos separados para representar distintos elementos de información.

18.3. Micrófonos

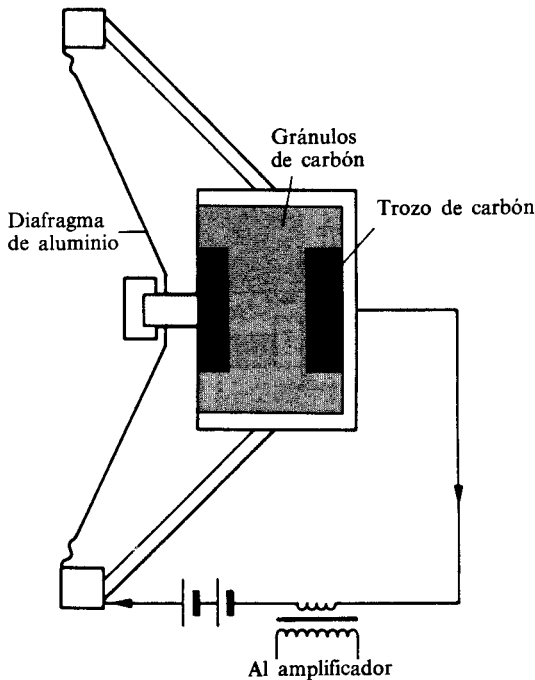


Figura 18.3.—Micrófono de carbón.

Gránulos de carbón. La resistencia de los gránulos de carbón contenidos en un recipiente sellado varía según la presión que se aplique; esta presión puede ser ejercida por una onda de sonido. En la figura 18.3 se representa un elemento como el descrito anteriormente, por el cual circula una corriente eléctrica. Cuando varía la resistencia, varía la corriente, y ésta pasa a través de un transformador que se encarga de transmitirla al exterior (siempre que no sea una corriente constante).

En este tipo de micrófono se necesita una fuente de continua que suministre la potencia necesaria para producir la componente de alterna que constituye la señal de información. Los primeros teléfonos llevaban este tipo de micrófonos, y la fuente de continua estaba constituida por baterías que se encontraban en la centralita.

Bobina móvil. Hay otro tipo de micrófono que utiliza una pequeña bobina unida directamente al diafragma, que vibra bajo la influencia de las vibraciones del sonido entre los polos de un imán (Fig. 18.4).

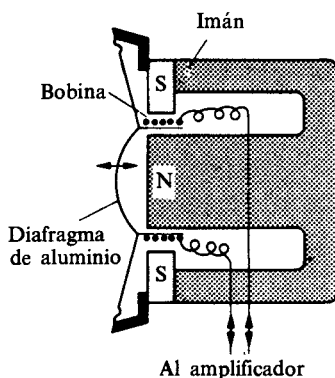


Figura 18.4.—Micrófono de bobina móvil.

En este micrófono no se necesita ninguna fuente de electricidad puesto que se induce una f.e.m. debido al movimiento de la bobina, y la señal puede ir directamente a un amplificador.

Condensador. En otro diseño distinto se utiliza el diafragma mismo como una placa de un condensador, cuya capacidad varía

en función del movimiento del diafragma. Utilizando este efecto en un circuito de continua (Fig. 18.5), estos movimientos producen pequeños cambios de tensión que se pueden amplificar posteriormente.

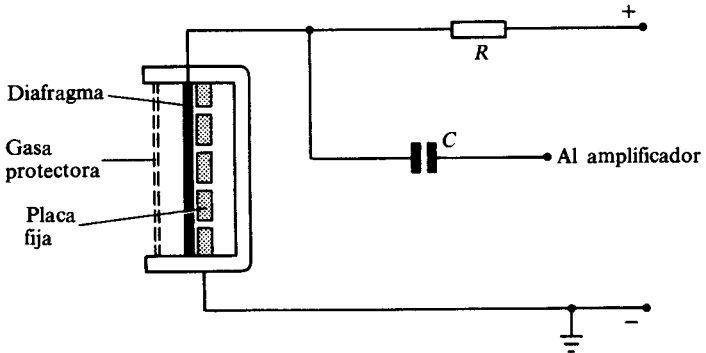


Figura 18.5.—Micrófono de condensador.

El condensador C bloquea la componente de continua de la tensión que hay entre los terminales del micrófono, dejando pasar sólo los cambios de tensión. Este tipo de micrófono se utiliza a veces en los magnetófonos portátiles.

Cinta. Hay una cinta de aluminio ondulada situada entre los polos de un imán (Fig. 18.6) y cuando vibra bajo la influencia de un sonido se genera una f.e.m. inducida que se puede amplificar y transmitir.

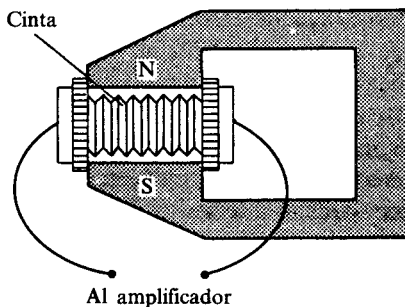


Figura 18.6.—Micrófono de cinta.

18.4. Altavoces

Existen varios tipos de micrófonos que se utilizan en aplicaciones muy diversas, pudiendo obtenerse con los mejores una excelente fidelidad, pues se obtienen reproducciones muy fieles de sonidos mediante señales eléctricas. Los altavoces, sin embargo, son mayoritariamente de un solo tipo, el altavoz de bobina móvil descrito en el apartado 9.9, que esencialmente es el mismo aparato que el micrófono con un gran cono flexible en lugar de tener un diafragma (Fig. 9.16, compárese con la figura 18.4).

Para obtener una reproducción de sonido de alta calidad, algunos altavoces se fabrican para funcionar sólo en una gama de frecuencias determinada, desde 20 Hz hasta 20 kHz. Por ello, si se escucha una orquesta sinfónica utilizando el altavoz de un receptor de televisión, se obtiene una impresión pobre del sonido real.

18.5. Transmisión por cable

Además de las señales del código Morse, que son impulsos de corriente, se utilizan señales eléctricas formadas por tensiones o intensidades alternas. Cuando empieza a circular una corriente eléctrica sus efectos parecen ser instantáneos, aunque por rápida que parezca, la velocidad más grande que se puede alcanzar es la de la luz, 3×10^8 metros por segundo. Esto quiere decir que en el caso de transmisión de corrientes alternas a largas distancias, puede ocurrir que la corriente invierta su sentido en un extremo del cable antes de que se note el efecto de la misma en el otro extremo. Supongamos que se transmite a una frecuencia de 10 kHz: en 1/10.000 de segundo realiza un ciclo completo, cambiando en un sentido y en otro, pero en ese tiempo y viajando a la velocidad de la luz sólo se desplaza 30 km.

Si se transmite a altas frecuencias y con cables largos, las señales viajan por los cables como una serie de ondas, de igual forma que las ondas que se transmiten por una cuerda cuando se hace vibrar a la misma con la mano desde un extremo. Los cables de transmisión se deben diseñar de forma que se minimicen los efectos de resonancia (Ap. 17.12), puesto que incluso los simples cables tienen cierta capacidad e inductancia. Otro problema es que la corriente

alterna de alta frecuencia tiene la tendencia a moverse sólo por el exterior de los conductores (en libros de texto más avanzados se trata este tema con profundidad, si se quiere consultar algo).

18.6. Transmisión sin cable

La transmisión sin cables se hizo posible en 1865, cuando el físico británico James Clerk Maxwell (1831-1879) estableció la relación que existía entre los campos eléctricos y los campos magnéticos (que cada uno de estos campos puede ser generado cuando existe una variación en el otro, independientemente de la presencia de sustancias materiales (véanse los capítulos 7 y 19). La demostración práctica de la transmisión fue realizada por Heinrich Hertz en 1888 utilizando un transmisor y un receptor (Fig. 18.7) en un laboratorio.

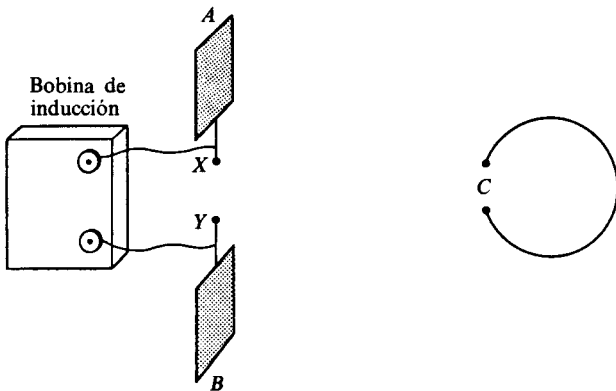


Figura 18.7.—Experimento para realizar la primera transmisión por radio.

La bobina de inducción (Ap. 10.4) produce un impulso intermitente de electricidad cada vez que se abre su circuito primario por medio de un interruptor, que va cargando de forma gradual las placas metálicas A y B. Cuando se alcanza una diferencia de potencial suficientemente alta salta una chispa entre X e Y. La impresión debió ser grande cuando se comprobó que aparecía una chispa mucho más pequeña entre los extremos de un cable doblado en forma

circular C que actuaba como receptor. Hertz había intentado con muchos experimentos anteriores demostrar que se podía producir el efecto que él estaba esperando. Se demostró entonces que existían unas ondas electromagnéticas (ondas de radio, en este caso) que transportaban energía desde el transmisor hasta el receptor sin necesidad de cables.

En el experimento de Hertz, las ondas de radio estaban formadas por ondas de muchas frecuencias, de igual forma que un sonido se compone de una mezcla de frecuencia de ondas de radio deseada para transmitir señales a larga distancia. Se necesitan antenas apropiadas para enviar y para recibir. El tamaño de las antenas varía dependiendo de la frecuencia: para frecuencias bajas se necesitan antenas más grandes que para frecuencias altas.

18.7. Modulación de ondas de radio

La finalidad de la transmisión por radio, por ejemplo, es llevar sonidos desde un lugar a otro. Si se convirtieran las ondas de sonido en ondas de radio de la misma frecuencia, simplemente, para transmitir las por todo el país, se necesitarían antenas de cientos de metros o más de longitud. Por esta razón se utiliza una onda de radio de una frecuencia mucho más elevada para transportar la señal sonora. El receptor de radio está diseñado para poder captar la onda de radio, separar las frecuencias y amplificar sólo las frecuencias de sonido. La onda de radio se modula con la onda de sonido en el transmisor para que funcione el sistema descrito. Otra ventaja que tiene este sistema es que el receptor de radio puede seleccionar una frecuencia determinada correspondiente a una emisora de radio, en vez de tener que captar todo en el aire al mismo tiempo.

Modulación de amplitud (AM, siglas en inglés). En este tipo de modulación se hace variar la amplitud de la onda de radio (llamada portadora) a la frecuencia de la onda de sonido. En la figura 18.8 se muestra el principio de este sistema, aunque la escala no es real, puesto que la frecuencia de radio puede ser de 1 MHz, mientras que la frecuencia de audio es sólo de 1 kHz; es decir, que

habría mil oscilaciones de la onda de radio en el tiempo que habría una de la onda de sonido.

El receptor de radio debe captar la onda de frecuencia de radio y después responder ante los cambios de su amplitud para obtener la información de sonido que lleva consigo. La modulación de amplitud (AM) se utiliza en sistemas de radio de onda corta, media y larga.

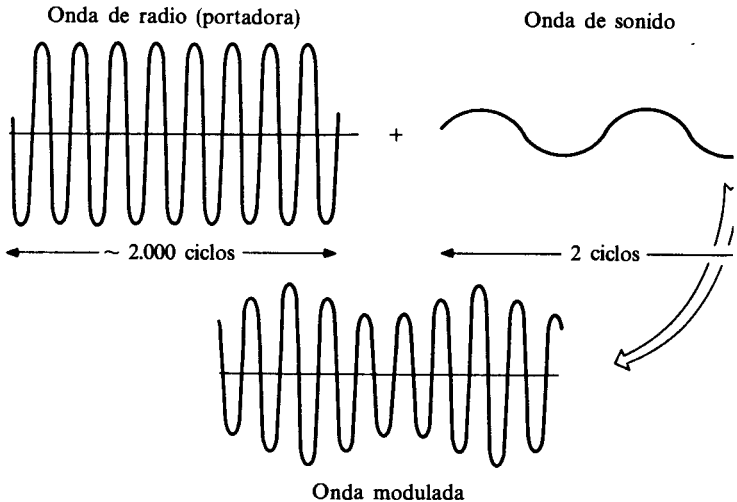


Figura 18.8.—Modulación de amplitud.

Modulación de frecuencia (FM, siglas en inglés). Otra forma para mezclar la información de sonido con la frecuencia de radio consiste en modular la frecuencia de la onda de radio en vez de modular su amplitud. En la figura 18.9 se representa este sistema, aunque de nuevo la escala no es real.

En modulación de frecuencia, el receptor debe ser capaz de responder ante los cambios de frecuencia para poder separar la información de audio de la onda de radio. Este sistema se utiliza en la transmisión de televisión y en la banda de VHF.

Si el lector desea información más detallada sobre la detección y decodificación de señales de radio y de los circuitos electrónicos asociados, puede consultar libros que tratan específicamente sobre recepción en AM y en FM.

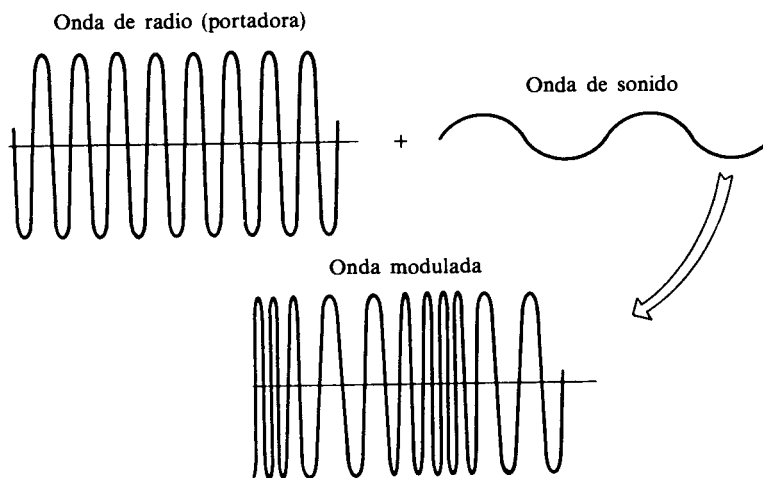


Figura 18.9.—Modulación de frecuencia.

18.8. Resumen

- Un sistema de comunicación se compone de un transductor de entrada, un medio de transmisión y un transductor de salida.
- Los micrófonos de diversos tipos son transductores que convierten la energía sonora en energía eléctrica.
- La transmisión por cables tiene limitaciones a altas frecuencias y en grandes distancias.
- La transmisión sin cables utiliza ondas electromagnéticas.
- Las frecuencias de audio (sonido) se transmiten modulando en amplitud o en frecuencia las ondas de radio.

19.1. El crecimiento de una industria

El desarrollo de la electrónica moderna empieza con el descubrimiento de los materiales semiconductores y con la invención del transistor a finales de los años cuarenta. Desde entonces se ha producido una verdadera revolución electrónica, debida a que se pueden producir grandes cantidades de sustancias necesarias para fabricar componentes semiconductores y a que cada vez se diseñan circuitos más pequeños que utilizan esos componentes. El progreso que se ha experimentado desde 1950 ha sido creciente, y de tal forma que hoy día los productos se diseñan, se fabrican, se prueban y se producen en un período de tiempo tan corto que hay poca gente que se pueda mantener al día, a no ser en un área muy especializada.

Actualmente es muy normal encontrar sistemas o aparatos electrónicos en la industria, en el hogar, en locales comerciales, en la educación, en máquinas de recreo, etc. Es normal encontrar aparatos electrónicos como receptores de radio transistorizados, juegos electrónicos, ordenadores personales, registradores de vídeo, cajas registradoras automáticas, procesos de fabricación donde se utilizan robots, temporizadores electrónicos, relojes digitales, calculadoras, órganos electrónicos, sintetizadores, láseres, cámaras de infrarrojos, marcapasos para el corazón, etc. La lista representa sólo una pequeña parte de todas las aplicaciones en que se utiliza la electrónica. Este capítulo es sólo una introducción a los elementos básicos de que constan muchos sistemas electrónicos.

19.2. Semiconductores: tipo-*n* y tipo-*p*

La mayoría de los metales, especialmente el cobre y la plata, conducen la electricidad muy fácilmente, mientras que los materiales plásticos como el plexiglás y el PVC se utilizan como aislantes porque no conducen en absoluto la electricidad. Las sustancias que eléctricamente se encuentran entre los conductores y los aislantes se denominan semiconductores: su resistencia eléctrica normalmente es alta y variable. El germanio y el silicio son ejemplos de materiales semiconductores cuyas resistividades son altas, pero que decrecen de forma muy apreciable si se calientan.

Se puede obtener un material mucho más útil si se añaden pequeñas cantidades de otros elementos tales como el fósforo, el arsénico o el boro al germanio o al silicio, reduciéndose notablemente sus resistencias. De esta forma se pueden realizar dos tipos de semiconductores, denominados tipo-*n* y tipo-*p*: por ejemplo, el germanio con fósforo como impureza es de tipo-*n* y el silicio con arsénico como impureza es de tipo-*p*. (Las denominaciones *n* y *p* se refieren a los portadores de carga negativos y positivos que conducen la electricidad, predominando los portadores negativos en los de tipo-*n* y los portadores positivos en los de tipo-*p*.) En la figura 19.1 se ilustran las propiedades básicas de los dos tipos de semiconductores.

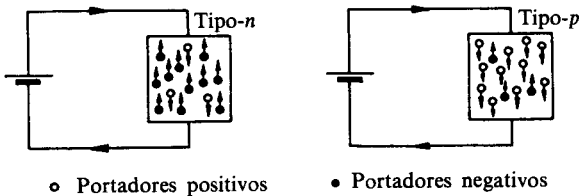


Figura 19.1.—Materiales de tipo-*n* y de tipo-*p*.

19.3. La unión *pn*

El funcionamiento de los componentes semiconductores depende de cómo estén unidos los materiales de tipo-*p* con los de tipo-*n*. Sin entrar demasiado en el mecanismo, el efecto principal que se produce es que la conducción es mucho más fácil en un sentido que en el otro (Fig. 19.2). La aplicación directa de esta propiedad

da lugar al diodo, que es un componente que sólo conduce en un sentido (Cap. 12).

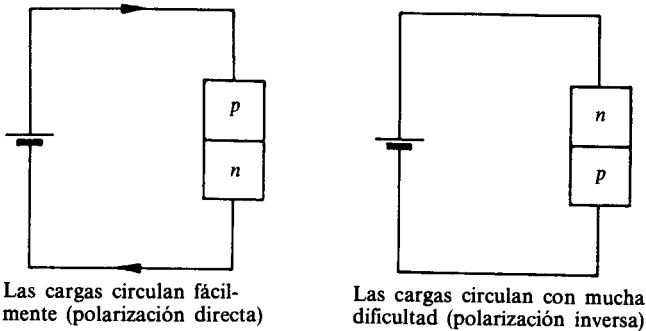


Figura 19.2.—Circulación de corriente en una unión *pn*.

19.4. El diodo

Una unión *pn* realizada con material de tipo *p* y de tipo *n*, con dos terminales de conexión y encapsulada apropiadamente constituye un diodo. El terminal marcado con (+) se denomina ánodo y el marcado con (-) es el cátodo. En la figura 19.3 se representan las curvas características de conducción de una unión *pn* (un diodo) (Figs. 4.3 y 12.2) (observemos que los ejes (+) y (-) están a diferente escala).

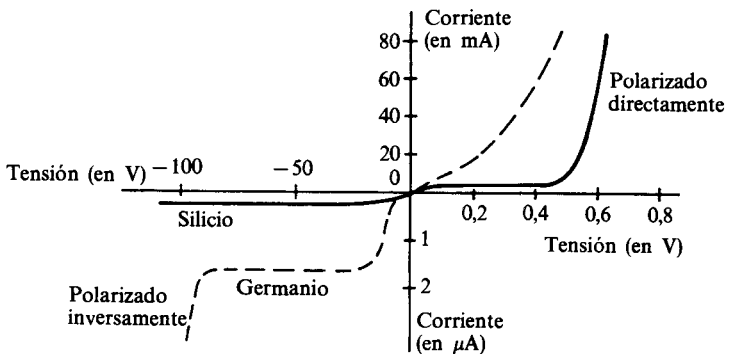


Figura 19.3.—Curvas características de un diodo.

Un diodo se caracteriza por su corriente directa media (1 A, por ejemplo) y por su tensión inversa máxima (50 V, por ejemplo), y ninguna de estas dos se debe sobrepasar en condiciones normales. Normalmente se prefieren los diodos de silicio para realizar rectificadores debido a que tienen estas dos magnitudes de valores muy altos.

19.5. Otros diodos

En los libros de electrónica aparecen otros tipos de diodos diseñados para aplicaciones específicas. A continuación se citan algunos de ellos:

Diodo zener: Se utiliza como estabilizador en las fuentes de alimentación, funcionando con tensión inversa en un punto donde la variación de corriente no afecta a la tensión en diodo; esta tensión de referencia (tensión zener) se puede elegir entre una amplia gama de valores, entre 3 y 200 V aproximadamente.

Diac: Está formado por dos diodos zener conectados en anti-serie y conduce en cualquier dirección a una tensión establecida.

Fotodiodo: Tiene un encapsulado transparente por el cual penetra la luz; la intensidad de la luz (y su color) influyen sobre la corriente inversa; se utiliza en contadores rápidos, en lectores de cinta perforada y en medidores de luz.

Diodo emisor de luz (LED, siglas en inglés): Se fabrica con un compuesto formado por galio, arsénico y fósforo que emite luz cuando conduce en sentido directo; se utiliza en luces indicadoras en circuitos digitales, como es el caso de los *displays* (pantalla) de las calculadoras.

Diodo varicap: Es una combinación de diodo y de condensador con una gama de capacidades que depende de la tensión inversa.

Célula fotovoltaica: Se trata de una unión *pn* que produce una f.e.m. cuando incide la luz sobre ella; se utiliza en paneles para satélites artificiales y para alimentar equipos electrónicos pequeños, como pueden ser relojes electrónicos o calculadoras.

19.6. El transistor

La base de la tecnología moderna fue el desarrollo del transistor, que se compone de tres partes y que es una combinación *pnp* o *nnp*. Las principales aplicaciones de los transistores utilizan su posibilidad de funcionar como amplificadores y como interruptores; es decir, que son componentes activos a diferencia de las resistencias o los diodos, que son pasivos. Son muy útiles en circuitos de control, sistemas lógicos y equipos de radio, puesto que es posible agrupar miles de transistores con otros elementos de circuito en pequeños *chips* de silicio de unos 5 mm^2 (Ap. 19.17).

El transistor, como unidad separada, está disponible en tamaños y formas muy diferentes, con tres terminales de conexión (Fig. 19.4).

Hay dos tipos básicos de transistores, el transistor de unión (el normal) y el transistor de efecto de campo (FET, siglas en inglés).

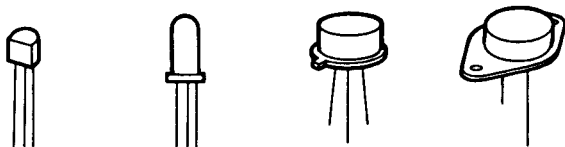


Figura 19.4.—Tipos de transistores.

19.7. El transistor de unión

En la figura 19.5 se muestran las dos posibles disposiciones, *pnp* y *nnp*, junto con sus símbolos. En ambos casos hay una parte central de un tipo de semiconductor determinado, que constituye la base y que se encuentra entre otras dos partes de material semiconductor de otro tipo y que constituyen el colector y el emisor. El transistor *nnp* se hace normalmente de silicio, mientras que el *pnp* suele ser de germanio. La flecha indica la dirección de la corriente entre la base y el emisor.

NOTA: La construcción de un transistor es mucho más complicada que una simple doble unión, siendo de gran importancia la cantidad de impurezas que haya en cada parte y la anchura de la base.

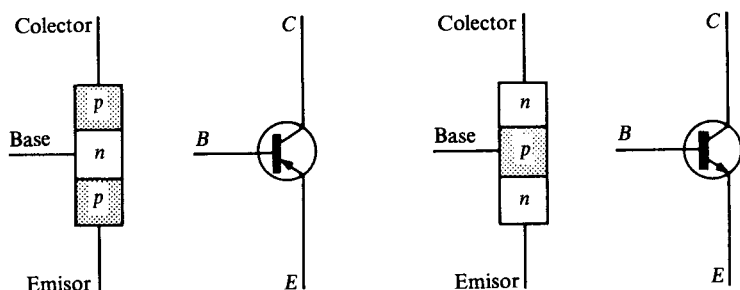


Figura 19.5.—Transistores de unión.

19.8. El efecto transistor

Para que funcione el transistor, las dos uniones deben estar polarizadas de una forma determinada: la unión base-emisor debe estar polarizada directamente y la unión colector-base debe estarlo inversamente, como se muestra en la figura 19.6 (aunque se dibuja una pila para suministrar la diferencia de potencial necesaria entre base y emisor, en la práctica la tensión se produce de forma diferente).

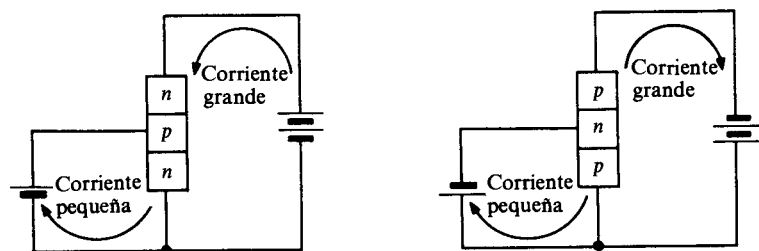


Figura 19.6.—El efecto transistor básico.

El efecto que tiene lugar es que con una corriente pequeña entre la base y el emisor se puede controlar una corriente mucho más grande entre el colector y la base, incluyendo la apertura y el cierre del circuito. En la figura 19.7 se indican los valores de algunas corrientes típicas. (Fijémonos en la resistencia R , de 1 k Ω más o menos, que se utiliza para limitar la corriente en la base.)

Si se interrumpe la corriente de base (0,05 mA), también se interrumpe la del colector.

El transistor de unión es un componente controlado por corriente que puede activar y desactivar, o alterar el valor de corrientes mucho más grandes, a veces entre diez y mil veces más grandes, dependiendo del transistor que sea. Las magnitudes más importantes son el valor de cada corriente, la relación que hay entre ellas y, por cuestiones de seguridad, la corriente de base máxima.

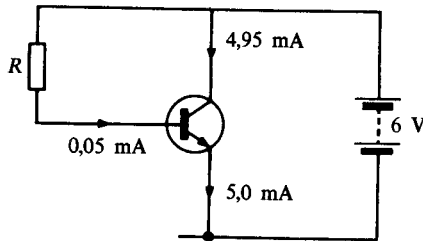


Figura 19.7.—Valores típicos de corriente.

19.9. El transistor de efecto de campo (FET)

En este tipo de transistor, que también tiene tres terminales, es la tensión de la puerta, G , la que controla la corriente que circula entre el drenaje, D , y la fuente, S . El comportamiento diferente del FET se debe a que las partes semiconductoras de tipo n y de tipo p están dispuestas de otra forma.

En la figura 19.8 se muestra el símbolo del FET y algunos valores típicos de corrientes y tensiones. La característica principal es el cambio que se produce en la corriente de drenaje cuando cambia la tensión de puerta.

La forma de funcionamiento del FET indica que se trata de un componente controlado por tensión, lo cual le hace muy útil, por ejemplo, en el manejo de la tensión de salida de un fonocaptor de un tocadiscos. Una propiedad que tienen algunos FET es que se pueden fabricar en gran número y de forma relativamente fácil en un *chip* muy pequeño de silicio, para formar una única unidad que se denomina *circuito integrado* (un microprocesador es un caso de circuito integrado) (Ap. 19.17).

Hay dos tipos diferentes de FET, que se utilizan normalmente: el FET de puerta de unión (o JUGFET) y el FET semiconductor de óxido metálico (MOSFET).

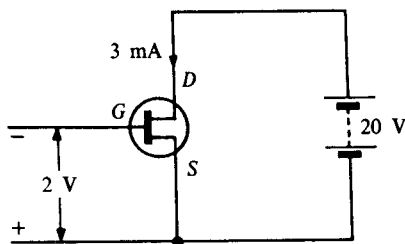


Figura 19.8.—Valores típicos en un FET.

19.10. El transistor como interruptor

En la figura 19.9 se puede ver el principio de utilización del transistor como interruptor en un circuito.

Las resistencias de 1 y 10 k Ω actúan como un divisor de tensión, poniendo la base del transistor a 10/11 de 6 V en (a) y a 1/11 de 6 V en (b). En el primer caso hay una corriente en la base que satura el transistor, permitiendo el paso de corriente a través del colector y del emisor (como en la figura 19.7). En (b) sólo pasa una pequeñísima corriente por la base, no siendo suficiente para

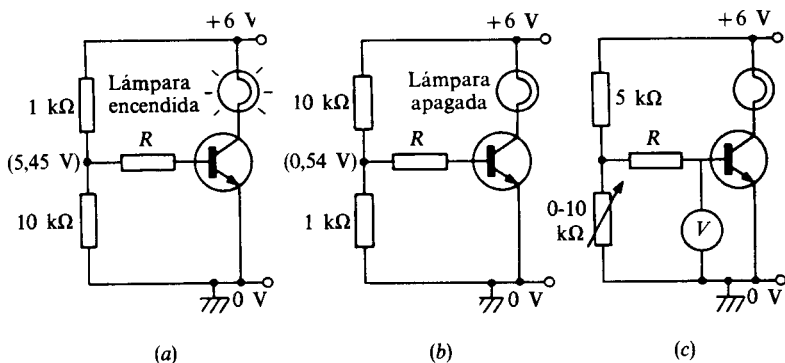


Figura 19.9.—El transistor como interruptor.

permitir que conduzca el colector y, por tanto, el transistor está cortado (se incluye la resistencia R para evitar corrientes demasiado grandes en la base que pueden dañar al transistor). Para averiguar el punto exacto en el cual el transistor pasa de estar en saturación a estar en corte, se puede utilizar el circuito de la figura 19.9c, donde el voltímetro V indica la tensión en la base cuando se varía la resistencia desde $10\text{ k}\Omega$ hasta cero.

19.11. Interruptores controlados por luz

En la figura 19.10 se muestran dos circuitos de alarma controlados por luz, que se pueden realizar utilizando una resistencia variable con la luz (LDR), que tiene una resistencia alta en la oscuridad y una resistencia baja cuando está expuesta a la luz.

En el primer circuito, la lámpara lucirá cuando haya oscuridad, mientras que en el segundo circuito sólo lucirá si hay luz incidiendo en la LDR (compárese con el circuito de la figura 19.9). Si un intruso enciende las luces de la habitación se produce un aviso al encenderse la lámpara; también se puede utilizar un sistema de luz que dispare el circuito cuando sea interrumpido el rayo por algún intruso. La lámpara de alarma se colocaría a cierta distancia de la LDR, si fuera necesario, y se podrían utilizar rayos de luz infrarroja.

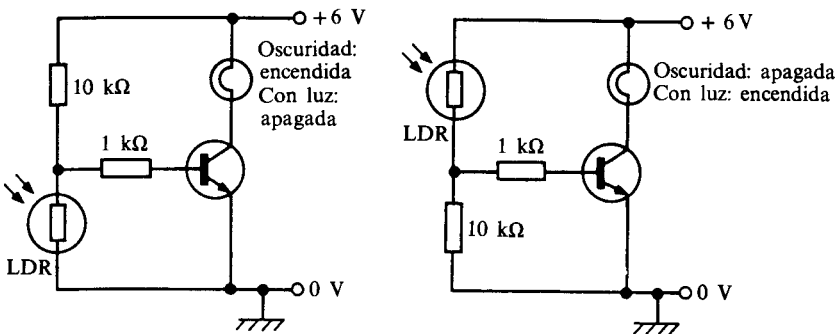


Figura 19.10.—Circuitos para alarmas controladas por luz.

El mismo circuito se podría utilizar para detectar incendios o congelaciones si se sustituye la LDR por un termistor (un material

semiconductor cuya resistencia varía apreciablemente con la temperatura, Ap. 19.18), y en vez de una lámpara se utilizase un zumbador o un diodo emisor de luz (LED). De la misma forma se podría utilizar un relé en lugar de utilizar la lámpara (Fig. 19.11). Los relés son interruptores electromagnéticos en los cuales una corriente pequeña activa un electroimán que atrae un contacto de hierro, el cual es parte de un interruptor en un circuito separado, como puede ser un circuito de alarma de incendio. La alarma podría estar alejada del resto del circuito (en un circuito de este tipo sería necesario un diodo *D* para proteger al transistor de la f.e.m. contraria generada por la bobina en el relé cuando es desactivado por el transistor. Véase el apartado 10.12).

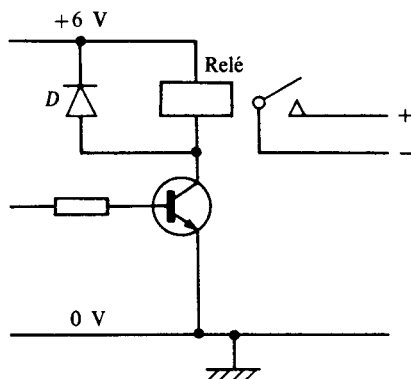


Figura 19.11.—Uso de un relé en un circuito de conmutación con transistor.

19.12. Los transistores y las puertas lógicas. El sistema binario

Una aplicación importante de los transistores es la construcción de circuitos integrados (Ap. 19.17), que a su vez constituyen uno de los componentes básicos de los ordenadores (un microprocesador es un ejemplo de circuito integrado). Estos elementos constituyen máquinas de calcular electrónicas muy rápidas que pueden realizar millones de pequeñas operaciones matemáticas en un tiempo mucho más corto que el empleado por cualquier ser humano. Sin

embargo, aunque nosotros utilizamos el sistema decimal para contar, que está basado en diez dígitos o cifras distintas, los ordenadores funcionan en el sistema binario, que se basa en dos dígitos.

El sistema decimal utiliza diez dígitos (0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 y 9), con los cuales se forman todos los números. La posición que ocupa un dígito en un número es tan importante como el valor del dígito mismo, de forma que 43 implica 4 decenas y 3 unidades, 618 representa 6 centenas, 1 decena y 8 unidades. Cuando se utilizan números fraccionarios también se aplica el mismo sistema, cuando se escribe 0,27 quiere decir 0 unidades, 2 décimas y 7 centésimas. (Cuando se enseñan matemáticas a los niños pequeños se da tanta importancia al lugar que ocupan las cifras como al valor de los dígitos mismos.)

En el sistema binario solamente hay dos dígitos, el 0 y el 1. El valor de la posición es tan importante como en el sistema decimal, pero aquí las posiciones valen 1, 2, 4, 8, 16, etc., en vez de 1, 10, 100, 1.000. En este sistema, por tanto, el número 1011 equivale a 1 ocho, 0 cuatro, 1 dos y 1 uno, que será el número 11 en el sistema decimal. La razón por la cual se pueden utilizar los transistores para contar en números binarios es que tienen esencialmente dos estados, de corte o de saturación, dando lugar a una tensión de salida «alta» o «baja». Si estos dos estados se hacen corresponder con 1 y 0, el transistor se puede considerar un componente binario. Se pueden realizar circuitos que pueden realizar todas las operaciones matemáticas normales, pero en binario en vez de hacerlo en decimal. (Se debe disponer, por supuesto, de formas para convertir los números de decimal a binario, y viceversa.)

Una puerta lógica es un circuito de conmutación que tiene salidas a nivel alto o bajo, dependiendo de la señal de entrada, y puede utilizarse como circuito binario básico. Se pueden realizar distintos tipos de puertas utilizando las propiedades de conmutación de los transistores, algunas de las cuales ya se han descrito anteriormente.

Puerta NOT. Su salida está en nivel alto cuando su entrada no está en nivel alto; o está en nivel bajo cuando su entrada no está en nivel bajo.

En la figura 19.12, si la entrada está en nivel alto (supongamos 5 V), el transistor estará saturado y circulará una corriente de co-

lector grande a través de la resistencia R_L , cayendo en ella una diferencia de potencial que provoca que la tensión de salida sea baja (muy cerca de 0 V). Si la entrada está en nivel bajo (supongamos 0,5 V), no puede circular ninguna corriente por el colector puesto que el transistor está cortado, cayendo una pequeña tensión en R_L ; la tensión de salida es, por tanto, algo menor de 6 V, es decir, está en nivel alto.

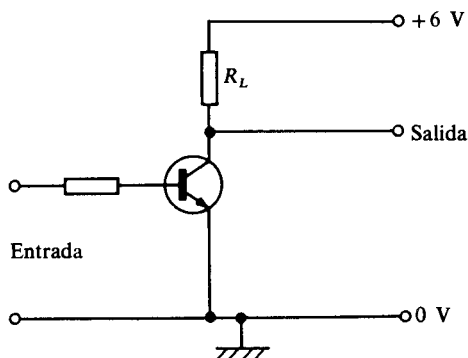


Figura 19.12.—Puerta NOT.

El funcionamiento se puede resumir en una tabla de verdad en la cual se representa con un 1 el nivel alto y con un 0 el nivel bajo. El circuito entero se representa con el símbolo que aparece en la figura 19.13.

| Entrada | Salida |
|---------|--------|
| 0 | 1 |
| 1 | 0 |

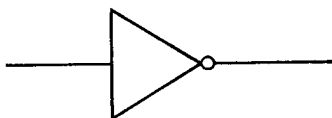


Figura 19.13.—Puerta NOT: tabla de verdad y símbolo.

Puerta NOR. Esta puerta tiene dos entradas (o más) y su salida está en nivel alto sólo si no hay ninguna entrada en nivel alto. El circuito, la tabla de verdad y el símbolo se representan en la figura 19.14. (Observando la figura 19.12 se puede deducir que la puerta NOT es una puerta NOR de una única entrada.)

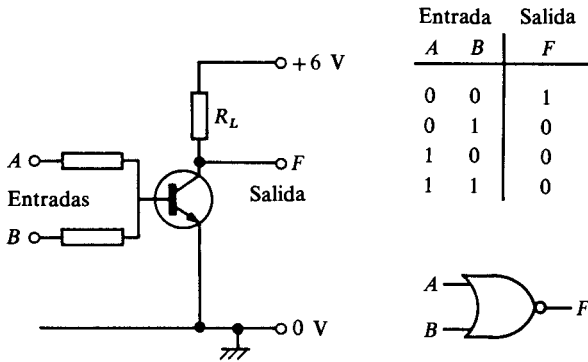


Figura 19.14.—Puerta NOR: circuito, tabla de verdad y símbolo.

Puerta OR. Se trata de una puerta cuya salida está en nivel alto si cualquiera de las entradas o todas están en nivel alto. El circuito es una puerta NOR seguida de una puerta NOT (Fig. 19.15).

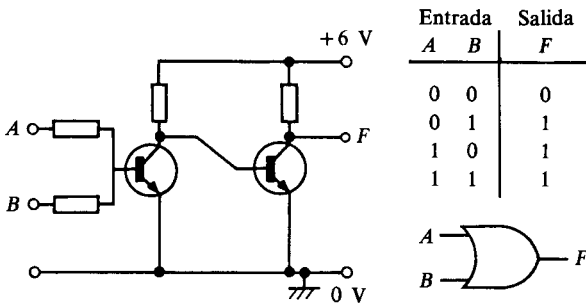


Figura 19.15.—Puerta OR: circuito, tabla de verdad y símbolo.

Puerta NAND. Se trata de una puerta cuya salida F no está en nivel alto cuando ambas entradas A y B están en nivel alto (Fig. 19.16).

Puerta AND. Su salida F está en nivel alto cuando ambas entradas A y B se encuentran en nivel alto (Fig. 19.17). (Se trata de una puerta NAND seguida de una puerta NOT.)

Puerta OR exclusiva. Se trata de una puerta cuya salida F está en nivel alto si cualquiera de las entradas está en nivel alto,

pero no todas; es decir, sólo si las entradas son diferentes (Figura 19.18).

| Entrada | | Salida |
|---------|---|--------|
| A | B | F |
| 0 | 0 | 1 |
| 0 | 1 | 0 |
| 1 | 0 | 0 |
| 1 | 1 | 0 |



Figura 19.16.—Puerta NAND: tabla de verdad y símbolo.

| Entrada | | Salida |
|---------|---|--------|
| A | B | F |
| 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 0 |
| 1 | 0 | 0 |
| 1 | 1 | 1 |



Figura 19.17.—Puerta AND: tabla de verdad y símbolo.

| Entrada | | Salida |
|---------|---|--------|
| A | B | F |
| 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 1 |
| 1 | 0 | 1 |
| 1 | 1 | 0 |

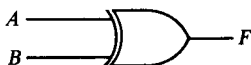


Figura 19.18.—Puerta OR exclusiva: tabla de verdad y símbolo.

Sólo se han incluido los circuitos de las puertas más simples, y no se trata de añadir siempre circuitos elementales para conseguir otro más complejo, pero la tabla de verdad es muy útil para decidir qué secuencia de puertas se utilizaría en la práctica. Por ejemplo, si se analiza el conjunto de puertas NAND de la figura 19.19 utilizando las tablas de verdad correspondientes, se puede comprobar que se trata de una puerta OR exclusiva.

En la práctica, todas las puertas NAND separadas se pueden construir dentro de un único circuito integrado (Ap. 19.17), pudiendo interconectarlas de diferentes formas.

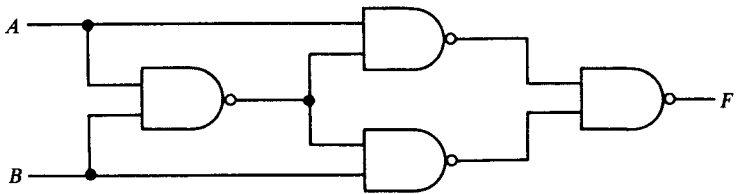


Figura 19.19.—Cuatro puertas NAND conectadas para formar una puerta OR exclusiva.

19.13. Aplicaciones de las puertas lógicas

A partir de las ideas descritas anteriormente se pueden realizar circuitos muy complicados, cuya descripción se sale del objetivo de este libro. Baste decir que la combinación de puertas lógicas se utiliza en muchos sistemas electrónicos digitales tales como ordenadores, convertidores decimales, circuitos de control, codificadores y decodificadores, sumadores, multiplexadores, circuitos de memoria y muchos más.

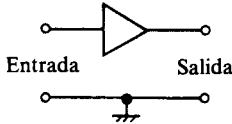
19.14. El transistor como amplificador


En el apartado 19.8 se dijo que el transistor se utiliza con dos funciones principales: como interruptor y como amplificador. Esta última aplicación se basa en el control de una corriente grande de colector por medio de una corriente de base mucho más pequeña. Los amplificadores electrónicos generan una salida igual que la entrada en su forma, pero de mayor tamaño, pudiendo ser la magnitud amplificada la corriente, la tensión o la potencia y a frecuencias de audio (desde 20 Hz hasta 20 kHz) o a frecuencias de radio (desde 20 kHz hasta 10.000 MHz o más).

Los transistores se utilizan en la mayoría de los aparatos electrónicos, en una etapa o en otra. Mientras que los transistores necesitan fuentes de potencia baja para funcionar, la salida del altavoz o del tubo de televisión puede ser mucho más grande. Hay muchas señales de distintos tipos que deben amplificarse para que se puedan utilizar: por ejemplo, las señales de radio o de televisión que capta

la antena deben ser amplificadas antes de decodificarse y ser convertidas en sonido o imagen, recibiendo incluso después una amplificación adicional.

El símbolo general de un amplificador es:



aunque normalmente se dibuja sólo  con referencia a un nivel de tensión cero, que no se dibuja.

19.15. Amplificador sencillo con transistor (frecuencia de audio)

El circuito de la figura 19.20 constituye el ejemplo más simple de amplificador de tensión.

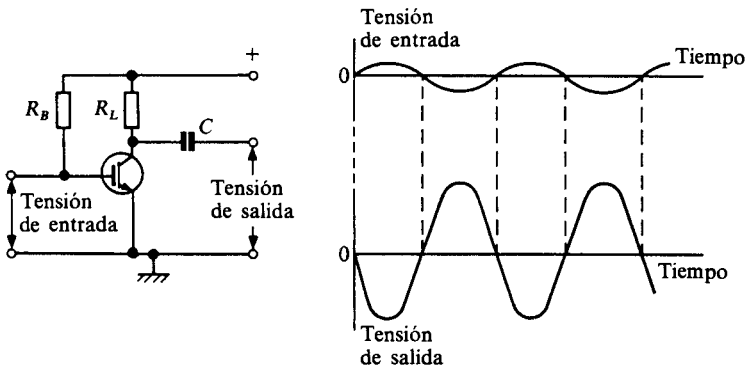


Figura 19.20.—Amplificación de tensión utilizando un transistor.

Si se aplica una pequeña tensión alterna a la entrada, aparece en la salida una tensión más grande pero invertida y de la misma frecuencia que la tensión de entrada. Con un osciloscopio (Ap. 6.8) conectado a los terminales de entrada y de salida se podrían ver

las curvas que aparecen en la figura 19.20. Con este circuito se puede obtener un factor de amplificación de hasta 70. Observemos que las resistencias R_B y R_L son similares a las que aparecen en las figuras 19.7 y 19.12. El condensador C sirve para que la tensión de salida sea simétrica respecto del nivel cero.

19.16. Amplificadores estabilizados y de dos etapas

En las figuras 19.21 y 19.22 aparece un circuito amplificador estabilizado ante diferencias de temperatura y un circuito amplificador de tensión de dos etapas. Con este último circuito se puede obtener un factor de amplificación de varios miles. En la práctica, los condensadores que aparecen en ambos circuitos son electrolíticos. La salida del amplificador de dos etapas no está invertida, como ocurre en el amplificador de una sola etapa.

19.17. Circuitos integrados

Las técnicas de fabricación de componentes para circuitos electrónicos permiten hoy día acoplar miles de elementos de circuito —resistencias, diodos, transistores, condensadores—, con su interconexión completa, en un *chip* de silicio de unos 5 mm^2 y de $0,5 \text{ mm}$ de espesor. Se parte de una barra de silicio de unos 10 cm de ancha, en la cual la pureza del silicio es de una parte en diez mil millones. De la barra se cortan obleas y se forman unos doscientos circuitos iguales, que se forman mediante un proceso repetitivo, en cada oblea de $0,5 \text{ mm}$ de anchura. Los circuitos que pasan todos los controles se introducen en cápsulas de plástico con hilos de oro conectados a los *pines* externos. El circuito integrado completo es de unos 2 cm de largo (Fig. 19.23). El número de *pines* de conexión externos varía entre ocho y veinticuatro, dependiendo de los circuitos contenidos en el *chip*.

Las ventajas de un circuito integrado son su tamaño, su relativamente bajo precio y su fiabilidad.

Se pueden desarrollar sistemas electrónicos utilizando circuitos integrados y circuitos prefabricados, en vez de utilizar y conocer en detalle elementos individuales.

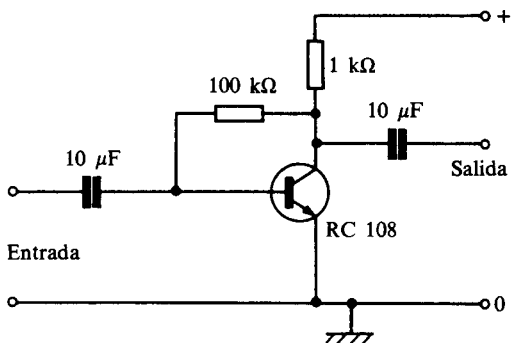


Figura 19.21.—Amplificador estabilizado ante cambios de temperatura.

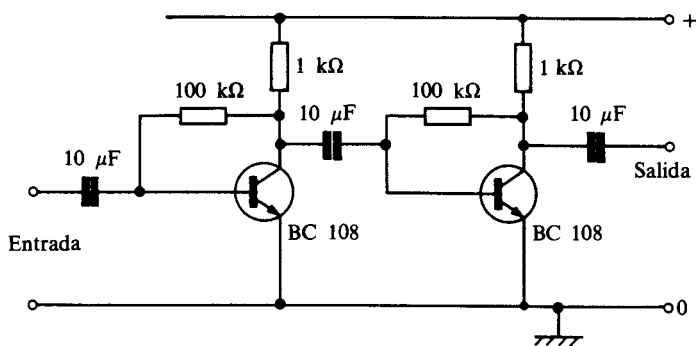


Figura 19.22.—Amplificador de dos etapas.

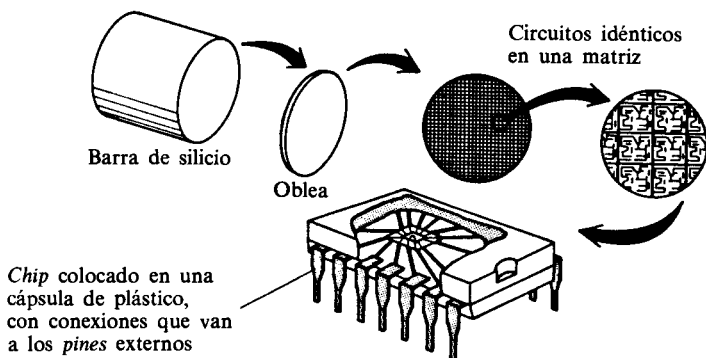


Figura 19.23.—Etapas de fabricación de un chip.

Los circuitos integrados son la base del desarrollo en el diseño de ordenadores, haciendo posible, tanto por coste como por tamaño, que los ordenadores lleguen a los hogares y que se utilicen en el comercio y en la educación. Parece no haber límites en la industria de la microelectrónica para colocar en un *chip* de silicio cualquier circuito que se necesite. El incremento de potencia que se ha desarrollado en los grandes ordenadores es otra evidencia de las ventajas de la miniaturización de los componentes básicos. Sin embargo, no cabe duda de que las técnicas futuras harán parecer estos desarrollos antiguos, de igual forma que la válvula se quedó obsoleta frente al transistor, y que éste se está quedando antiguo comparándolo con los circuitos integrados.

19.18. Otros componentes semiconductores

Termistor. Los conductores metálicos aumentan su resistencia eléctrica cuando se calientan (Ap. 4.13), aunque el efecto no es demasiado grande (se duplica con un aumento de unos 300 °C). En el caso de los semiconductores (por ejemplo, el silicio) se produce un efecto mucho más grande, pero en el sentido opuesto, es decir, su resistencia baja cuando se calientan, y a veces en una gran medida. El termistor Th3, por ejemplo, tiene una resistencia de 380 Ω a 25 °C, pero sólo tiene 30 Ω cuando está caliente. Se utilizan principalmente en termómetros eléctricos donde los cambios de resistencia se pueden aplicar directamente para medir directamente los cambios de temperatura, con la ventaja de que se pueden fabricar en tamaños muy pequeños y se pueden colocar en sitios de difícil acceso o peligrosos, lejos del resto del circuito y del usuario. También se aprovecha su reducido tamaño para medir temperaturas en puntos muy localizados. Asimismo, se pueden fabricar termistores que aumenten mucho su resistencia con la temperatura, pudiéndose utilizar para proteger los circuitos de los sobrecalentamientos.

Tiristor. Se compone de cuatro capas con la disposición *pnpn*, con tres contactos, ánodo, cátodo y puerta. Conduce siempre que esté polarizado directamente y tenga tensión de puerta positiva, y cuando empieza a conducir permanece conduciendo aunque la tensión de puerta deje de ser positiva, hasta que la tensión de ánodo

se haga nula o negativa. En el circuito de la figura 19.24, la lámpara lucirá cuando S_1 y S_2 estén cerrados, pero permanecerá luciendo aunque se abra S_2 .

En los circuitos de alterna se puede disparar un tiristor en cualquier tensión positiva. El efecto que se produce es que el tiristor conduce sólo en una parte del ciclo de la tensión alterna, como se representa en la figura 19.25, y con los impulsos de puerta se decide en qué puntos empieza la conducción.

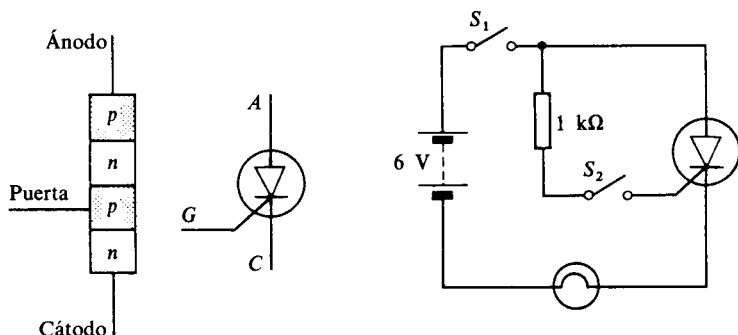


Figura 19.24.—Tiristor: símbolo y circuito.

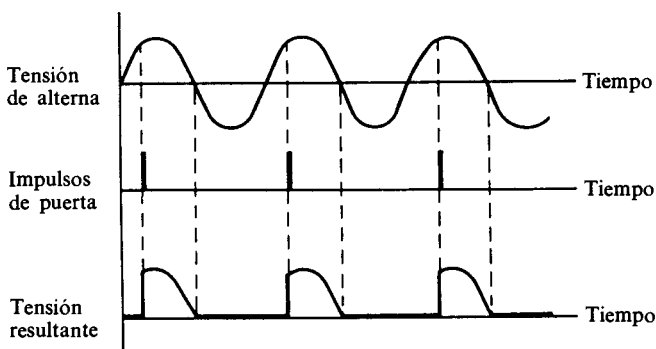


Figura 19.25.—El tiristor conduce sólo en una parte del ciclo de alterna. La conducción se controla con los impulsos de tensión en la puerta.

Si se utiliza un componente llamado *triac* (equivale a dos tiristores conectados en antiparalelo) se permite la conducción también en la parte negativa del ciclo (véase rectificación de media onda y

de doble onda, Ap. 12.4). Este tipo de control de corriente es mucho más eficiente que utilizando una resistencia variable, puesto que no hay casi pérdida de energía cuando los tiristores están cortados. Las luces del teatro, por ejemplo, se pueden controlar utilizando tiristores sin generar gran cantidad de calor en los *dimmers*. En la figura 19.26 se representa el circuito básico para realizar esta función; la resistencia variable controla la proporción del ciclo de alterna durante la cual hay conducción.

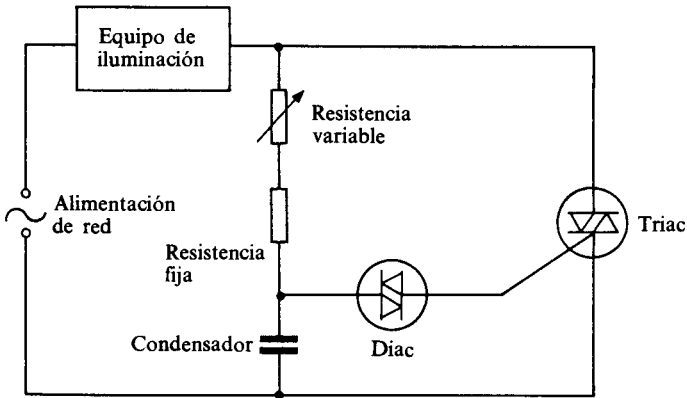


Figura 19.26.—Circuito de control utilizando un tiristor.

Resistencia dependiente de la luz (LDR). También llamada célula fotoconductor, es una resistencia hecha de sulfuro de cadmio cuyo valor decrece cuando se ilumina externamente. La ORP12, por ejemplo, tiene una resistencia de unos 10 mΩ en la oscuridad, pero sólo de 1 kΩ a la luz del día —un factor de diez mil. En el apartado 19.11 se muestra una aplicación.

19.19. Códigos de los diodos y de los transistores

Existen algunos códigos para identificar los cientos de modelos diferentes de diodos y transistores que hay en el mercado. Los más comunes son los sistemas continental y americano. En el primero, la primera letra indica el material semiconductor utilizado (A = germanio, B = silicio), una o dos letras representan el uso apropiado

do para el cual está diseñado el componente (A=diodo de señal; Y=diodo rectificador; Z=diodo zener; C=amplificador de frecuencia de audio; F=amplificador de frecuencia de radio; S=transistor de conmutación), y también hay un número que indica las características eléctricas. El BY118, por ejemplo, es un diodo rectificador de silicio.

En el sistema americano, todos los diodos tienen en el código 1N y todos los transistores 2N, seguido de un número de cuatro dígitos que se refiere a las propiedades del componente. Como ejemplos se pueden citar el 1N4001 y el 2N3053.

También existen códigos de letras y números para los distintos tipos de circuitos integrados, tales como puertas, amplificadores operacionales, contadores, etc.

19.20 Resumen

- Los materiales semiconductores pueden ser de tipo-*n* o de tipo-*p*.
- Una unión *pn* conduce igual que un diodo (el diodo es una unión *pn*).
- Hay diferentes tipos de diodos semiconductores, que se emplean en aplicaciones diversas.
- Un transistor está formado por una combinación *pnp* o *nnp*.
- El transistor de unión funciona como un interruptor o un amplificador controlado por corriente.
- El transistor de efecto de campo (FET) es un componente controlado por tensión.
- Las LDR se pueden utilizar para diseñar circuitos sensibles a la luz.
- Las puertas lógicas principales son: NOT, NOR, OR, NAND, AND y OR exclusiva.
- Los amplificadores realizados con transistores deben estar estabilizados ante los cambios de temperatura.
- Los circuitos integrados contienen muchos circuitos acoplados en un pequeño *chip* de silicio.
- Otros componentes: termistores, tiristores, diodos zener, diacs y triacs.
- El código de los transistores indica su fabricación y sus aplicaciones.

20

Conducción a través de líquidos y de gases

20.1. Líquidos que conducen

Al igual que ocurre con los materiales sólidos, hay algunos líquidos que conducen la electricidad, mientras que otros, no. En términos generales, los ácidos fuertes (sulfúrico, clorhídrico, nítrico) junto con las disoluciones de sus sales en agua (tales como el sulfato de cobre, nitrato de plata, cloruro sódico) y las bases (por ejemplo, la sosa acústica, el hidróxido potásico) son buenos conductores. Por otra parte, los líquidos orgánicos (por ejemplo, el benceno, los aceites, el alcohol, el fenol) son malos conductores. Para probar la conductividad de un líquido se puede utilizar la disposición que se representa en la figura 20.1. Obsérvese que hay una lámpara en el circuito, incluida para evitar un cortocircuito si se tocan los dos electrodos involuntariamente.

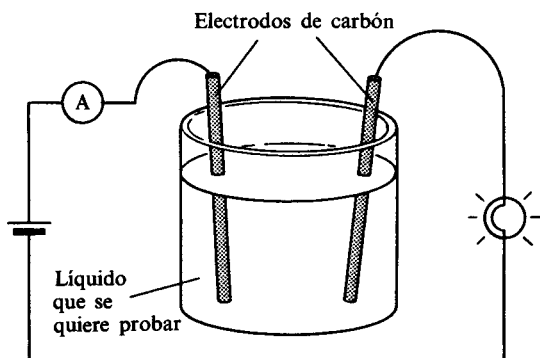


Figura 20.1.—Prueba para estudiar la conducción eléctrica en líquidos.

20.2. Electrólisis

El efecto más importante que tiene lugar en un líquido conductor cuando pasa por él una corriente eléctrica, es que hay una reacción química en los electrodos. El nombre que se da a este proceso es *electrólisis*, y el líquido se denomina *electrolito*. El electrodo por el cual entra la corriente al líquido (sentido por convenio) es el ánodo, y el electrodo por el que sale la corriente es el cátodo. El ánodo se debe conectar al terminal positivo de la fuente de electricidad, y el cátodo al terminal negativo. Una pila voltaica o galvánica sencilla tiene un solo ánodo y un solo cátodo, pero las pilas industriales pueden tener veinte ánodos y veinte cátodos. En la figura 20.2 se representan dos experimentos de laboratorio básicos de electrólisis, y en la tabla 20.1 se resumen los efectos producidos en algunos casos. Se puede comprobar que el material del electrodo es importante, así como el electrolito utilizado.

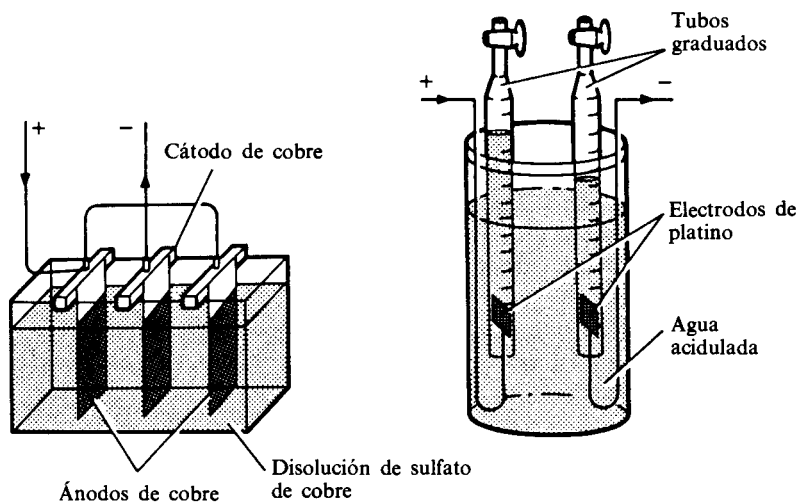


Figura 20.2.—Voltímetros de cobre y agua.

TABLA 20.1

| Electrolito | Electrodos | | Efecto en el ánodo | Efecto en el cátodo |
|--|------------------|------------------|--|--|
| | Ánodo | Cátodo | | |
| Solución de sulfato de cobre | Cobre | Cobre | El cobre se disuelve en el electrolito | Se deposita cobre que proviene del electrolito |
| Solución de sulfato de cobre | Platino o carbón | Platino o carbón | Se libera oxígeno | Se deposita cobre que proviene del electrolito |
| Ácidos diluidos por ejemplo, clorhídrico | Platino o carbón | Platino o carbón | Se libera oxígeno | Se libera hidrógeno |
| Cloruro sódico fundido | Grafito (carbón) | Hierro | Se libera cloro | Se deposita sodio |
| Oro Aluminio fundido | Carbón | Carbón | Se libera oxígeno | Se deposita aluminio |

20.3. Electrochapado y purificación

El recubrimiento de objetos con un metal a partir de disoluciones de sales de ese metal, utilizando la electrólisis —por ejemplo, el recubrimiento con cobre a partir de una disolución de sulfato de cobre— tiene una aplicación inmediata en la industria de electrochapado. Se puede formar una película metálica muy fina en casi todos los materiales que no sean porosos, independientemente de la forma que tengan, poniendo como cátodo de una pila voltaica al objeto que se quiere recubrir. El recubrimiento de cobre, níquel o cromo se usa cada vez más con fines decorativos o para proteger, utilizán-

dose incluso en objetos de plástico, como, por ejemplo, en los marcos de los parabrisas de los coches.

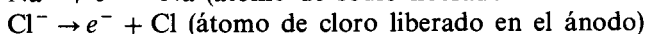
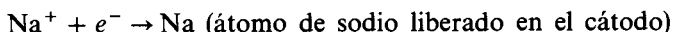
Los metales se pueden purificar realizando un proceso similar, en el cual se utilizan un ánodo impuro y un cátodo puro del mismo metal. El cátodo aumenta gradualmente su masa al irse depositando en él metal puro que proviene del ánodo, a través del electrolito, llegando a tener, en dos semanas, una masa doscientas veces más grande que la masa original. De esta forma se pueden refinar el cobre, el cinc, el estaño, el oro y la plata, a partir del mineral que se extrae directamente de la tierra.

De igual forma que se realiza la purificación electrolítica, se pueden extraer metales puros a partir de sales fundidas extraídas de la tierra. El sodio y el aluminio se obtienen por electrólisis.

20.4. El mecanismo de la conducción eléctrica en los líquidos

En los metales las cargas eléctricas circulan a través de ellos transportadas por los electrones, formando la corriente eléctrica (Capítulo 1). Estos electrones se pueden mover como partículas libres dentro del metal. Cada electrón lleva una pequeña carga eléctrica negativa. En los líquidos conductores, las cargas eléctricas son transportadas por partículas mucho mayores, llamadas *iones*, que son partes de átomos o moléculas. El cloruro sódico fundido está formado por dos tipos de iones: iones sodio (positivos) e iones cloruro (negativos). La diferencia de potencial que hay entre los electrodos provoca el movimiento de los iones, siendo atraídos los iones positivos por el cátodo y los iones negativos por el ánodo. De esta forma es posible que exista una corriente eléctrica dentro del líquido (Fig. 20.3).

El efecto se puede describir de la siguiente forma: el ion Na^+ gana un electrón en el cátodo y el ion Cl^- pierde un electrón en el ánodo:



Este proceso tiene como resultado que la corriente eléctrica puede circular a través del líquido y mientras tanto se va produciendo sodio y cloro.

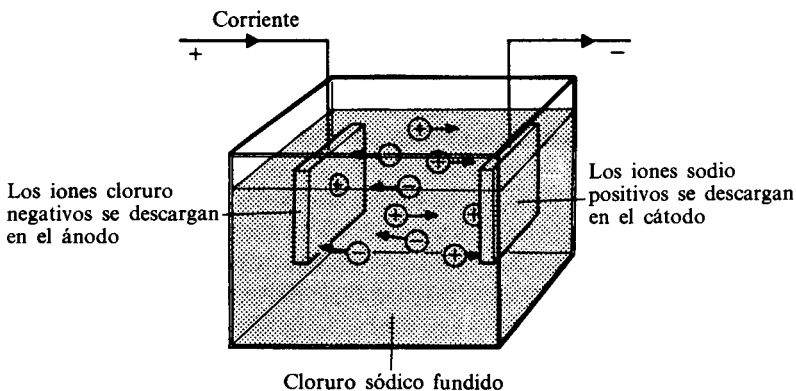


Figura 20.3.—Conducción por medio de iones en cloruro de sodio fundido.

El proceso es más complicado cuando se utiliza como electrolito una disolución de algún compuesto en agua (por ejemplo, el ácido clorhídrico), puesto que el agua también es iónica. Cuando hay dos tipos de iones negativos, se descarga preferentemente uno. (El orden de prioridades se conoce como serie electroquímica, y si el lector desea más información sobre el tema puede consultar un libro que trate de electroquímica, donde se explica detalladamente el fenómeno.) El agua produce los iones H^+ , OH^- y H_3O^+ , mientras que el ácido clorhídrico se ioniza en H^+ y Cl^- . Las ecuaciones que tienen lugar no son sencillas, pero en definitiva tiene lugar una transferencia de electrones desde el cátodo al ánodo, además de producirse hidrógeno y oxígeno en la proporción de 2:1 en volumen.

20.5. Conducción eléctrica en los gases

Los gases normalmente no son buenos conductores (si lo fueran, todas las pilas y las baterías se descargarían rápidamente al producirse cortocircuitos a través del aire), pero sometidos a tensiones eléctricas muy altas o a presiones muy bajas pueden conducir la

corriente eléctrica. El rayo es un ejemplo extremo del paso de electricidad a través de un gas, mientras que los tubos fluorescentes normales o los anuncios de neón también constituyen ejemplos donde se utiliza el paso de una corriente eléctrica a través de un gas.

El rayo es como una gran chispa que salta entre una nube y otra o entre una nube y la tierra, después de haberse cargado durante una tormenta. Hay una gran cantidad de energía en los rayos y se producen tensiones eléctricas extremadamente altas (millones de voltios).

En circunstancias normales sólo hay unas pocas moléculas de aire de cada mil que están ionizadas, pero cuando se aplica una tensión muy alta se ionizan muchas más. Los iones positivos y negativos se aceleran por el efecto de la tensión, produciéndose más iones al chocar unas moléculas con otras, hasta que el aire se convierte en un conductor eléctrico. La corriente seguirá un camino en zig-zag a través de las zonas más ionizadas, desprendiéndose luz y calor en el proceso.

A bajas presiones (aproximadamente 1/100 de la presión atmosférica normal) los gases son mejores conductores porque los iones chocan menos unos con otros y, por tanto, pueden alcanzar la velocidad necesaria para producir una ionización mayor bajo tensiones mucho más pequeñas. El color de la luz emitida depende del gas que se utilice, y este efecto se utiliza en la fabricación de anuncios luminosos compuestos de tubos que contienen el gas apropiado, según el color que se desee, a baja presión. El neón da un brillo rojo, el helio un azul blanquecino, el vapor de mercurio un verde azulado, el vapor de sodio un amarillo brillante, etc.

Mezclando gases se puede disponer de casi todos los colores que se deseen, y utilizando tubos estrechos la luz se concentra en una línea brillante del color requerido. La forma del tubo es lo de menos. Además de los anuncios luminosos, también constituyen ejemplos de lámparas de descarga de gas las lámparas que se utilizan en las farolas de las calles, que son de vapor de mercurio o de sodio, aunque este tipo de lámparas necesita un tiempo de calentamiento al encenderse para producir el vapor suficiente a partir del mercurio o del sodio líquido.

Los tubos fluorescentes utilizan la misma técnica, con la característica de emitir energía principalmente en la región ultravioleta del espectro. En este caso, la superficie interior del tubo está recu-

bierta con fósforo, que absorbe la luz ultravioleta y la convierte en una mezcla de colores visibles. De esta forma se puede obtener una luz bastante parecida a la blanca. El coste de funcionamiento de los tubos fluorescentes es mucho menor para una cantidad de luz dada, comparado con las lámparas de filamentos, donde se produce una cantidad de energía calorífica muy significativa junto con la energía luminosa.

20.6. Chispas

Las chispas que se producen entre los contactos eléctricos son otra prueba de la conducción eléctrica en gases. Hay ocasiones en que las chispas son provocadas intencionadamente, como ocurre en el caso de los encendedores de gas piezoeléctricos o en el caso de las bujías de un coche, por ejemplo, pero hay veces en que se producen chispas al separar dos contactos, al accionar un interruptor de la luz o al funcionar un timbre eléctrico, y en estos casos no es conveniente. Si no se quiere derrochar energía se deben diseñar cuidadosamente los puntos de contacto. En general, las esquinas muy marcadas y las formas puntiagudas provocan más chispazos que las superficies lisas y planas (véase el apartado 14.9). En condiciones adecuadas puede ser suficiente con una tensión eléctrica baja para provocar un chispazo (es el caso de un cortocircuito en una batería), pero por regla general se produce donde hay diferencias de potencial de cientos o miles de voltios, e incluso más. Para reducir las chispas que se producen entre los contactos de los interruptores se puede utilizar un condensador (Ap. 14.5).

Puesto que para que se produzca una chispa o una descarga eléctrica de cualquier tipo se necesita que haya iones u otras partículas cargadas, en el vacío no se pueden producir chispas.

20.7. Resumen

- Cuando circula una corriente eléctrica a través de un líquido, tiene lugar la electrólisis.
- Los líquidos conducen la electricidad por medio del movimiento de iones cuyas cargas se neutralizan en los electrodos.

- Una pila voltaica o galvánica se compone de un recipiente, de unos electrodos y de un electrolito, dentro del cual tiene lugar la electrólisis.
- El proceso electrolítico se utiliza en electrochapado y en la extracción y purificación de metales.
- Los gases conducen la corriente eléctrica cuando son sometidos a tensiones elevadas y a presiones bajas, o cuando saltan chispas.

Glosario de términos técnicos

- Acumulador.** Fuente de electricidad secundaria que necesita ser cargada antes de suministrar energía eléctrica.
- Aislante.** Material que no conduce la electricidad.
- Amperímetro.** Instrumento para medir la corriente eléctrica.
- Amperio.** Unidad de medida de la corriente eléctrica.
- Amperios-vuelta.** Producto de la intensidad de la corriente por el número de espiras de un electroimán.
- Amplitud.** Máximo valor de una magnitud alterna en cualquier dirección.
- Ángulo de fase.** Desfase o diferencia de fase; se mide en grados.
- Ánodo.** Electrodo positivo de una pila voltaica.
- Armadura.** Parte de un motor o de un generador en la cual se enrollan las bobinas de los devanados, o el trozo de hierro que es atraído por un electroimán.
- Atraso o adelanto.** Cantidad en la cual se atrasa o adelanta una magnitud alterna respecto de otra.
- Base.** Parte central de un transistor.
- Batería.** Conjunto de pilas conectadas en serie.
- C.a.** Corriente alterna, las cargas se mueven en un sentido y en otro, alternativamente.
- Campo magnético.** Zona del espacio donde ejerce su influencia magnética un material magnético o una corriente eléctrica.
- Capacidad.** Propiedad que tiene un componente, definida como el cociente entre la carga y la diferencia de potencial medida en faradios.
- Carga.** Propiedad eléctrica básica que producen los materiales al

frotarse con algo; puede ser positiva o negativa y la llevan los electrones o los iones; se mide en culombios.

Cátodo. Electrodo de una pila voltaica.

C.c. Corriente continua, flujo de cargas en un solo sentido.

Circuito. Red completa formada por un conjunto de componentes interconectados, donde hay una fuente de electricidad.

Circuito integrado. Trozo de material semiconductor que contiene varios circuitos.

Código de colores. Se utiliza para distinguir los cables eléctricos o para indicar los valores de las resistencias.

Colector. Parte de un transistor.

Condensador. Componente que tiene una capacidad.

Conmutador. Elemento que sirve para cambiar el sentido de la corriente en un motor de corriente continua o en un generador de corriente continua.

Constante de tiempo. Tiempo que necesita una variación exponencial para alcanzar el 63 por 100 de su valor final.

Corriente. Flujo o movimiento de partículas cargadas, que pueden ser electrones o iones; se mide en amperios.

Corrientes de Foucault. Corrientes inducidas en los núcleos de los aparatos electromagnéticos.

Contrafase. Estar en contrafase es tener un desfase de 180° .

Cortocircuito. Conexión de los dos terminales de una pila o de un componente a través de una resistencia despreciable.

Culombio. Unidad de medida de la carga eléctrica.

Desfase (o diferencia de fase). Cantidad en la que están desfasadas dos magnitudes alternas, una respecto de otra.

Diferencia de potencial. Diferencia de niveles eléctricos entre dos puntos; se mide en voltios.

Dinamo. Elemento para convertir energía mecánica en energía eléctrica.

Diodo. Componente que conduce sólo en un sentido.

Electrodo. Conexión eléctrica de un aparato.

Electroimán. Trozo de hierro con una bobina magnetizante alrededor del mismo.

Electrólisis. Conducción de electricidad en los líquidos.

Electrómetro. Instrumento que sirve para medir los efectos de la electricidad estática.

- Electrón.** Partícula muy pequeña contenida en todos los átomos; tiene carga negativa.
- Electroscopio.** Instrumento para poder representar los efectos de la electricidad estática.
- Emisor.** Parte del transistor.
- Estátor.** Parte que no se mueve en un generador.
- Faradio.** Unidad de medida de capacidad.
- F.c.e.m.** F.e.m. inversa que se produce por inducción electromagnética, por ejemplo, en los motores.
- F.e.m.** Fuerza electromotriz; es la causa del movimiento de cargas (electrones) en un circuito, utilizando, por ejemplo, una pila; se mide en voltios.
- Frecuencia.** Número de ciclos (oscilaciones) por unidad de tiempo (segundo, por ejemplo); se mide en hertzios.
- Fuente de alimentación.** Equipo o aparato que sirve como fuente de tensión para alimentar un circuito; puede tener varias salidas con distintos niveles de tensión o corriente disponibles.
- Fusible.** Trozo de cable estrecho que se funde cuando la corriente alcanza un cierto valor preestablecido.
- Galvanómetro.** Instrumento para indicar o medir corriente eléctrica o diferencia de potencial (tensión).
- Generador.** Aparato para convertir energía mecánica en energía eléctrica.
- Generador de Van de Graaff.** Máquina que genera una tensión estática alta.
- Henrio.** Unidad de medida de la inductancia.
- Hertzio.** Unidad de medida de la frecuencia.
- Impedancia.** Se podría decir que es la «resistencia en alterna» efectiva; se mide en ohmios.
- Inducción.** Aparición de ciertos efectos en un material por la influencia de otro, especialmente magnético o eléctrico.
- Inducción electromagnética.** Efecto producido por el movimiento relativo entre un campo magnético y un conductor eléctrico.
- Inductancia.** Propiedad que tiene un componente para reaccionar contra los cambios de corriente; se mide en henrios.
- Ión.** Parte de un átomo o de una molécula con exceso o falta de electrones; puede tener carga positiva o negativa.
- Julio.** Unidad de medida de la energía o el trabajo.

- Ley de Lenz.** Describe la relación existente entre las corrientes inducidas y los cambios que las producen.
- Ley de Ohm.** Establece la relación que hay entre la corriente y la diferencia de potencial en un conductor metálico a temperatura constante.
- Materiales magnéticos.** Sustancias que se pueden magnetizar.
- Modulación.** Combinación de una onda de una frecuencia con otra onda de frecuencia mucho más grande.
- Multímetro.** Instrumento capaz de medir corriente, diferencia de potencial y resistencia, según diversas escalas.
- Ohmímetro.** Instrumento que sirve para medir resistencias.
- Ohmio.** Unidad de medida de la resistencia eléctrica.
- Osciloscopio.** Instrumento que se utiliza para medir y visualizar tensiones eléctricas variables en el tiempo.
- Paralelo.** Tipo de conexión en la cual los componentes tienen aplicada la misma diferencia de potencial.
- Periodo.** Tiempo necesario para producir una oscilación completa una magnitud alterna; se mide en segundos.
- Pila.** Fuente de electricidad primaria, normalmente química aunque también se puede basar en energía luminosa o mecánica.
- Pila voltaica.** Recipiente con electrodos y un electrolito en el cual tiene lugar el proceso de electrólisis.
- Potencia.** Rapidez con que se realiza el trabajo o se transfiere energía; se mide en vatios.
- Potencial.** Nivel eléctrico; se mide en voltios.
- Puerta lógica.** Circuito cuya salida depende de la relación lógica que haya entre sus entradas.
- Reactancia.** Parte de la impedancia de un circuito de alterna que depende de la frecuencia; se mide en ohmios.
- Receptor.** Sistema que responde ante las ondas de radio.
- Rectificador.** Elemento que convierte la corriente alterna en corriente continua.
- Red eléctrica.** Sistema de distribución de electricidad.
- Resistencia.** Propiedad que tienen los conductores por la cual se oponen al paso de corriente; se mide en ohmios. También se denomina así al componente que tiene una resistencia.
- Resistencia interna.** Resistencia eléctrica que tiene una pila, una batería o una fuente de alimentación.
- Resonancia.** Respuesta de un sistema oscilatorio a frecuencias determinadas que provocan la aparición de amplitudes muy grandes.

- Rotor.** Parte que gira de un generador.
- Semiconductor.** Material con propiedades eléctricas intermedias entre las de los conductores y las de los aislantes; se utiliza como materia prima para fabricar diodos, transistores y otros componentes electrónicos.
- Serie.** Tipo de conexión de componentes en la cual pasa la misma corriente por todos los componentes.
- Shunt.** Resistencia que se utiliza para convertir un galvanómetro en un amperímetro.
- Solenoides.** Bobina de cable de forma cilíndrica que se utiliza en magnetización.
- Termistor.** Resistencia cuyo valor depende de la temperatura; normalmente se fabrica con material semiconductor.
- Tierra.** Se utiliza como cero de potencial; por razones de seguridad, se conectan los aparatos eléctricos a tierra.
- Tipo-*n*.** Tipo de material semiconductor en el cual la mayoría de los portadores de carga están cargados negativamente.
- Tipo-*p*.** Tipo de material semiconductor en el cual la mayoría de los portadores de carga están cargados positivamente.
- Tiristor.** Componente semiconductor que consta de cuatro partes.
- Transductor.** Elemento que convierte una señal en otra, normalmente eléctrica.
- Transformador.** Elemento que puede cambiar el nivel de las tensiones alternas, elevándolo o reduciéndolo.
- Transistor.** Componente semiconductor que consta de tres partes; puede ser *npn* o *pnp*, dependiendo de cómo sean las uniones; hay otros tipos de transistores, como es el caso de los transistores de efecto de campo (FET).
- Transmisor.** Sistema que transmite ondas de radio.
- Valor eficaz.** Es la raíz cuadrada del valor cuadrático medio; el valor eficaz de una corriente alterna es igual al valor de una corriente continua que produzca el mismo efecto calorífico.
- Valores preferidos.** Conjunto de valores que se utilizan para fabricar resistencias.
- Vatio.** Unidad de medida de la potencia.
- Voltímetro.** Instrumento para medir diferencia de potencial o f.e.m.
- Voltio.** Unidad de medida de potencial eléctrico, de diferencia de potencial o de f.e.m.

Fórmulas clave y relaciones

Un amperio es una corriente de un culombio por segundo.

En un nudo de un circuito, la corriente total que entra es igual a la que sale.

La ley de Ohm establece que: la corriente es directamente proporcional a la diferencia de potencial (tensión).

Resistencia:

$$R = \frac{\text{Diferencia de potencial}}{\text{Corriente}}, \quad \text{o bien} \quad R = \frac{V}{I}$$

Resistencias en serie:

$$R = R_1 + R_2 + R_3$$

Resistencias en paralelo:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

La potencia es la rapidez con que se realiza un trabajo o se transfiere energía.

Potencia:

$$P = IV = I^2R = \frac{V^2}{R}$$



Capacidad:

$$\frac{\text{Carga}}{\text{Diferencia de potencial}}, \text{ o bien } C = \frac{Q}{V}, Q = CV$$

f.e.m.:

$$E = IR + Ir$$

Diferencia de potencial entre terminales:

$$V = E - Ir$$

La f.e.m. inducida es proporcional a la rapidez con que cambia el flujo magnético.

El sentido de la corriente inducida es tal que se opone al cambio que la produce.

En un transformador se cumple que:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{n_1}{n_2}$$

Condensadores en serie:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}$$

Condensadores en paralelo:

$$C = C_1 + C_2 + C_3$$

Energía almacenada en un condensador:

$$W = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{1}{2} QV = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C}$$

Constante de tiempo para un circuito con resistencia y condensador = RC .

Índice de materias

- Acumulador, 67.
- Adaptadores, 164.
- Altavoz, 126, 238.
- Alternador, 27.
- Amperímetro, 25, 76, 79.
- Amperímetro, resistencia, 77.
- Amperio, 23, 115.
- Amperios-vuelta, 101.
- Amplificador, 35, 233, 257.
- Amplitud, 217.
- Ánodo, 245.
- Armadura, 116.
- Autoinducción, 145, 209.

- Base de tiempos, 88.
- Batería, 67.
- Bobina, 133, 209.
- Bobina, aplicaciones, 215.
- Bobina de inducción, 130, 239.
- Bobina de inducción, experimentos, 128.
- Bobina de inducción, horno, 145.
- Bobina de inducción, motor, 143.
- Bobina, energía almacenada, 215.
- Bobina y condensador, 227, 229.
- Bobina y resistencia, 226.
- Bobina y c.a., 213, 225, 226.
- Bobina y c.c., 209, 212.

- Cable coaxial, 190.
- Cable de fase (vivo), 172.

- Cable de tierra, 172.
- Cable neutro, 172, 176, 177.
- Calentamiento incontrolado, 59.
- Caloría, 104.
- Campo eléctrico, 184.
- Campo eléctrico, descarga eléctrica, 17, 178.
- Campo eléctrico, motor, 112.
- Campo magnético, 92.
- Campo magnético, materiales, 95.
- Campo magnético, polos, 92.
- Campo magnético, saturación, 101.
- Capacidad, 65, 85, 197.
- Carga, 22, 25, 181.
- Carga del condensador, 199, 200.
- Carga, distribución, 189.
- Carga inducida, 185.
- Carga inducida, f.e.m., 133.
- Carga por fricción, 183.
- Carga por inducción, 185, 187.
- Carga y objetos puntiagudos, 191.
- Cátodo, 245.
- Célula de combustible, 69.
- Célula fotoconductora, 263.
- Célula solar, 68.
- Central eléctrica, 155.
- Circuito, 28.
- Circuito, diagrama, 29, 36.
- Circuito en anillo, 172.
- Circuito integrado, 249, 259.
- Circuito paralelo, 34.
- Circuito paralelo, conexión, 33.

- Circuito serie, 34.
 Circuito serie, conexión, 32.
 Circuito, símbolos, 36.
 Código de colores, resistencias, 55.
 Conmutador, 118.
 Comunicación con la electricidad, 233.
 Condensador, 197.
 Condensador, aplicaciones, 207.
 Condensador en paralelo, 198.
 Condensador en serie, 199.
 Condensador, energía almacenada, 206.
 Condensador y bobinas, 229.
 Condensador y rectificación, 161, 162.
 Condensador y resistencias, 224.
 Condensador y c.a., 24, 223, 224.
 Condensador y c.c., 199, 200, 203.
 Conducción, curvas, 49, 245.
 Conducción en gases, 269.
 Conducción en líquidos, 265, 268.
 Conducción en líquidos y gases, 265.
 Conducción, por electrones, 24.
 Conducción, por iones, 268.
 Constante de tiempo, 201, 204, 211.
 Contrafase, 219.
 Corriente, 21, 22.
 Corriente alterna (c.a.), 25, 167, 217.
 Corriente alterna (c.a.) trifásica, 175.
 Corriente alterna (c.a.) y bobina, 213, 225, 226.
 Corriente alterna (c.a.) y condensador, 204, 223, 225.
 Corriente alterna (c.a.) y generador, 155, 156.
 Corriente alterna (c.a.) y motor, 121.
 Corriente alterna (c.a.) y osciloscopio de rayos catódicos, 87.
 Corriente alterna trifásica (c.a.), generador, 175.
 Corriente alterna trifásica (c.a.), motor, 143.
 Corriente alterna trifásica (c.a.), suministro eléctrico, 176.
 Corriente conexión en paralelo, 37.
 Corriente conexión en serie, 37.
 Corriente continua (c.c.), 25, 167.
 Corriente continua (c.c.), generador, 151.
 Corriente continua (c.c.), motor, 116, 118, 120.
 Corriente continua (c.c.) y bobina, 209, 212.
 Corriente continua (c.c.) y condensador, 203.
 Corriente continua (c.c.) y osciloscopio, 87.
 Corriente en un nudo, 31.
 Corriente, órdenes de magnitud típicos, 23.
 Corriente, sentido de la corriente, 24, 29.
 Corriente y campos magnéticos, 97.
 Corrientes de Foucault, 141, 142.
 Culombio, 22, 23.
 Chispa, 271.
 Choke, 163, 209.
 Choke, efecto, 210.
 Descarga del condensador, 201.
 Descarga, por las puntas, 178.
 Descargas eléctricas, 17, 178.
 Desfase, 218.
 Detector, 233.
 Diferencia de potencial entre terminales, 72.
 Dinamo, 151.
 Dinamo de bicicleta, 27, 153, 154.
 Diodo, 158, 245, 246.
 Diodo, código, 263.
 Diodo, curva de conducción, 159.
 Diodo de unión, transistor, 247.
 Dipolo, 184.
 Directamente proporcional, 48.
 Efecto Hall, 116.
 Efectos electrostáticos, 189.
 Efectos electrostáticos, inducción, 185, 186.
 Electricidad, distribución, 166.
 Electricidad estática, 181, 183, 193.
 Electricidad estática y corriente, 193.
 Electricidad y comunicación, 233.

- Electricidad y el hogar, 169.
 Electrochapado, 267.
 Electroimán, 100, 102.
 Electroimán, aplicaciones, 102.
 Electrólisis, 266.
 Electromagnetismo, 92.
 Electrómetro, 188.
 Electrón, 22.
 Electrón, movimiento, 24, 25.
 Electrónica, 243.
 Electroscopio, 188.
 En fase, 218.
 Energía eléctrica, 30, 104.
 Energía eléctrica, magnitud, 39.
 Energía eléctrica, mantenimiento, 180.
 Energía eléctrica, potencia, 104.
 Energía eléctrica, potencial, 184.
 Energía eléctrica, precauciones, 176.
 Energía eléctrica, resistencia, 50.
 Energía en el condensador, 206.
 Energía en la bobina, 215.
 Energía, transferencia, 40, 104.
- Facturación de la electricidad, 109, 110.
 Faradio, 185, 197.
 Fase, adelanto, 220.
 Fase de la c.a., 218.
 Fase, diferencia de fase, 218, 219.
 Fase, retraso, 220.
 Ferromagnético, 95.
 FET de puerta de unión (JUGFET), 249.
 Forma de la c.a., 218.
 Frecuencia, 218.
 Frecuencia, modulación de frecuencia, 241.
 Frecuencia, resonancia, 227.
 Freno electromagnético, 143.
 Freno electromagnético, formas de onda, 240.
 Freno electromagnético, inducción, 128.
 Fuentes de electricidad, 68.
 Fuerza contraelectromotriz, 147.
 Fuerza electromotriz (f.e.m.), 39, 40, 69.
 Fuerza electromotriz (f.e.m.), valores típicos, 70.
 Fuerza, entre cargas, 182.
 Fuerza, entre corrientes, 115.
 Fuerza, entre polos, 92.
 Fusible, 170-172.
 Fusible, valores típicos, 174.
- Galvanómetro, 79, 122.
 Galvanómetro, conversión a amperímetro, 79, 80.
 Galvanómetro, conversión a voltímetro, 79-81.
 Galvanómetro de bobina móvil, 122.
 Galvanómetro de bobina móvil, altavoz, 126, 238.
 Galvanómetro de bobina móvil, micrófono, 236.
 Galvanómetro, sensibilidad, 124.
 Generador, 151.
 Generador de Van der Graaff, 191.
 Generador, diseño, 152.
- Henrio, 210.
 Hertzio, 218.
- Impedancia, 65, 224.
 Inductancia, 209.
 Instalación eléctrica de las casas, 171.
 Interruptor automático, 173.
 Ion, 22, 268.
- Julio, 40, 104.
- Kilovatio-hora, 110.
- Ley de Kirchhoff, 31.
 Ley de Lenz, 133, 135.
 Ley de Ohm, 46-48, 57.
 Ley de Ohm, investigación, 47.
 Ley de Ohm, limitaciones, 49.
 Ley de Ohm para un circuito completo, 72.

- Ley de Ohm y resistencia, 56.
 Leyes de Faraday, 128, 130.
 Leyes en la ciencia, 46.
- Magnetismo, 92.
 Micrófono, 235.
 Micrófono de cinta, 237.
 Micrófono de condensador, 286.
 Micrófono de granulos de carbón, 236.
 Modulación, 240, 241.
 Modulación de amplitud, 240.
 Motor de c.a., 121.
 Motor de c.c., 116.
 Motor sincrónico, 122.
 Movimiento obtenido por electromagnetismo, 112.
 Multiplicador, 81.
- Ohmímetro, 82.
 Ohmio, 50.
 Onda senoidal, 218.
 Oscilador, 230.
 Osciloscopio, 85, 154, 164.
 Osciloscopio, ajustes, 86.
 Osciloscopio como voltímetro, 90.
 Osciloscopio, efectos en alterna, 87.
 Osciloscopio, efectos en continua, 87.
 Osciloscopio, utilización, 91.
- Pararrayos, 193.
 Período de la c.a., 217, 218.
 Pila Daniell, 66.
 Pila Leclanché, 66.
 Pila primaria, 66.
 Pila secundaria, 67.
 Pilas, 66.
 Pilas en paralelo, 74.
 Pilas en serie, 74.
 Pilas primarias, 65.
 Pilas secundarias, 66.
 Polímetro, 83.
 Potencia, 104.
 Potencia, cálculo, 106.
 Potencia, ecuación, 106.
 Potencia y transformadores, 139.
- Potencial, 184.
 Potencial, diferencia de, 40, 169.
 Potencial, nivel cero, 42.
 Precauciones con la electricidad, 17, 18, 176.
 Puerta AND, 255.
 Puerta lógica, 252, 257.
 Puerta NAND, 255, 256.
 Puerta NOR, 254.
 Puerta NOT, 253.
 Puerta OR, 255.
 Puerta OR exclusiva, 255.
 Puesta a tierra, 42, 176.
 Purificación por electrolisis, 267.
- Reactancia, 223, 225.
 Reactancia capacitiva, 224.
 Reactancia inductiva, 225.
 Rectificación, 158, 160, 161.
 Rectificación de doble onda, 161, 162.
 Rectificación de media onda, 158, 159, 161.
 Rectificador con condensador, 161, 164.
 Rectificador con filtro, 164.
 Rectificador, media onda, 158, 159, 161.
 Rectificador, doble onda, 161, 162.
 Red de distribución eléctrica, 110, 167.
 Regla de la mano derecha de Fleming, 184.
 Regla de la mano izquierda de Fleming, 114.
 Relé, 252.
 Relé *reed*, 102.
 Resistencia, 46, 50.
 Resistencia (componente), 53.
 Resistencia (componente), código de colores, 55.
 Resistencia (componente), dependiente de la luz, 263.
 Resistencia (componente), en paralelo, 60.
 Resistencia (componente), en serie, 59.
 Resistencia (componente), redes, 62.
 Resistencia (componente), tolerancia, 54.

- Resistencia (componente), valores preferidos, 54.
 Resistencia (componente) y bobina, 226.
 Resistencia (componente) y condensador, 224.
 Resistencia, cálculos, 52.
 Resistencia del amperímetro, 77.
 Resistencia del voltímetro, 77.
 Resistencia dependiente de la luz (LDR), 263.
 Resistencia en circuitos de c.a., 65, 223.
 Resistencia interna, 71.
 Resistencia, valores típicos, 52.
 Resistencia y Ley de Ohm, 56.
 Resistencia y temperatura, 58.
 Resonancia, 227.
 Rizado, 163.
- Semiconductor, 243.
 Semiconductor, componentes, 261.
 Semiconductor de tipo n , 244.
 Semiconductor de tipo p , 244.
 Sentido de circulación por convenio, 24.
Shunt, 81.
 Sistema binario, 252.
 Sobrecarga, 17, 178.
 Solenoide, 97.
 Superconductor, 59.
- Tabla de verdad, 254.
 Telecomunicaciones, 234.
 Termistor, 251, 261.
 Tiristor, 261.
 Tolerancia de las resistencias, 55.
- Transductor, 233.
 Transformador, 136.
 Transformador elevador, 138-140.
 Transformador en la red de distribución, 169.
 Transformador reductor, 138-140.
 Transformador y potencia, 139.
 Transistor, 247, 250.
 Transistor, amplificador, 36, 257.
 Transistor, circuitos lógicos, 252.
 Transistor, códigos, 263.
 Transistor, conmutación, 250.
 Transistor de efecto de campo (FET), 249.
 Transistor, efecto, 248.
 Transmisión por cable, 238.
 Transmisión por radio, 99.
 Transmisión sin cable, 239.
Triac, 262.
 Turbina, 156.
- Unidades del Sistema Internacional (SI), 16.
 Unión pn , 244.
- Valor eficaz (r.m.s.), 217, 221.
 Valores preferidos de resistencias, 54.
 Van der Graaff, generador de, 191, 193.
 Vatio, 104.
 Voltaje, 39.
 Voltaje, disposición en paralelo, 44.
 Voltaje, disposición en serie, 44.
 Voltaje, valores típicos, 43.
 Voltímetro, 43, 76.
 Voltímetro, resistencia, 77.

APRENDE
TÚ SOLO

Electricidad

