

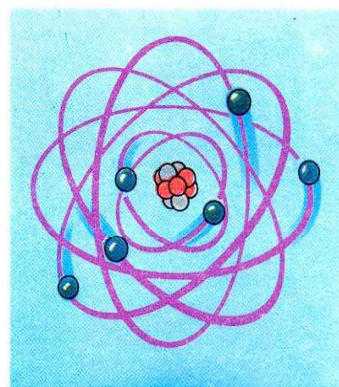
# **EL EXITOSO CURSO ELEMENTAL SOBRE ELECTROTECNIA**

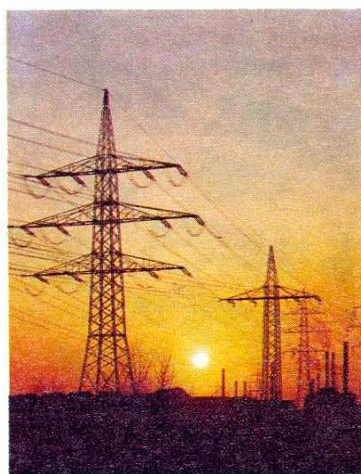
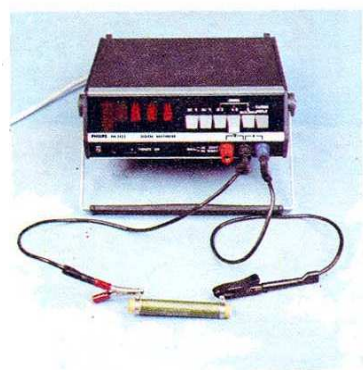


**[WWW.AUTOAPRENDIZAJE.INFO](http://WWW.AUTOAPRENDIZAJE.INFO)**

## Índice analítico

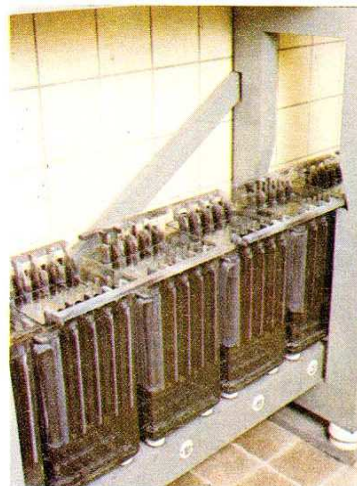
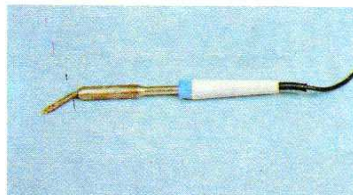
<b>1</b>	<b>Conceptos fundamentales de electro- tecnia</b>	<b>1</b>
1.1	Introducción	1
1.2	Fenómenos eléctricos y sus causas	3
1.2.1	Carga eléctrica de materiales	3
1.2.2	Estructura de la materia	5
1.2.3	Propiedades eléctricas de los átomos	7
	Ejercicios sobre 1.2	8
1.3	Conceptos básicos de mecánica	8
1.3.1	Magnitudes, unidades y ecuaciones físicas	8
1.3.2	Fuerza y camino recorrido	10
1.3.3	Trabajo y energía	11
1.4	Tensión eléctrica	12
1.4.1	Carga eléctrica	12
1.4.2	Generación de tensión	13
1.4.3	Medida de la tensión	16
1.4.4	Tipos de tensión	17
	Ejercicios sobre 1.4	18
1.5	Corriente eléctrica	18
1.5.1	Circuito eléctrico y sentido de la corriente	18
1.5.2	Intensidad de la corriente	20
1.5.3	Medida de la corriente	22
1.5.4	Tipos de corriente	22
1.5.5	Efectos de la corriente eléctrica	22
	Ejercicios sobre 1.5	24
<b>2</b>	<b>Circuito eléctrico simple</b>	<b>25</b>
2.1	Estructura de un circuito eléctrico	25
2.2	Ley de Ohm	25
	Ejercicios sobre 2	29
<b>3</b>	<b>Resistencia eléctrica</b>	<b>31</b>
3.1	Conducción de la corriente en metales	31
3.2	Resistencia de conductores	32
	Ejercicios sobre 3.1 y 3.2	36
3.3	Variación de la resistencia con la temperatura	37
	Ejercicios sobre 3.3	40
3.4	Variación de la resistencia con la tensión, el campo magnético, la luz y la presión	41



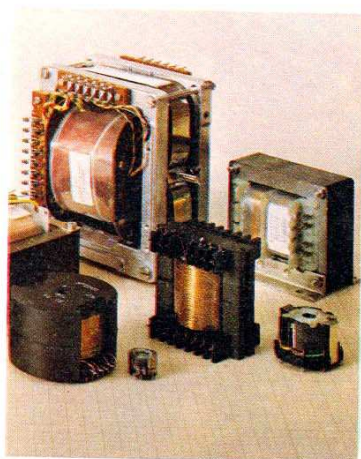


3.5	Características y formas de las resistencias	42
	Ejercicios sobre 3.5	48
<b>4</b>	<b>Conexiones de resistencias eléctricas</b>	49
4.1	Conexión en serie	49
	Ejercicios sobre 4.1	52
4.2	Conexión en paralelo	53
	Ejercicios sobre 4.2	58
4.3	Conexiones mixtas	59
4.3.1	Conexión en serie ampliada	60
4.3.2	Conexión en paralelo ampliada	60
4.3.3	Redes eléctricas	61
4.3.4	Divisor de tensión	61
	Ejercicios sobre 4.3	64
<b>5</b>	<b>Medida de resistencias eléctricas</b>	65
5.1	Medida indirecta de resistencias con un voltímetro y un amperímetro	65
5.1.1	Circuito con error en la tensión	65
5.1.2	Circuito con error en la intensidad	66
5.1.3	Datos característicos de amperímetros y voltímetros	68
5.2	Medida directa de resistencias	69
5.2.1	Medida directa de resistencias según el principio de medida de la intensidad	69
5.2.2	Medida directa de resistencia según el principio de medida de la tensión	70
5.2.3	Instrumentos de indicación directa utilizados en la práctica	70
5.3	Medida de resistencias mediante puentes	71
5.3.1	Principio de medida de un circuito puente	71
5.3.2	Medida de resistencias mediante el puente de Wheatstone	72
5.3.3	Medida de resistencias con el puente de Thomson	72
	Ejercicios sobre 5	73
<b>6</b>	<b>Transmisión de la energía</b>	75
6.1	Trabajo eléctrico	75
6.2	Medida del trabajo eléctrico	77
6.3	Potencia eléctrica	78
6.4	Medida de la potencia eléctrica	79
	Ejercicios sobre 6.1 a 6.4	82
6.5	Potencia en un circuito eléctrico	82
6.5.1	Potencia eléctrica en una resistencia	82
6.5.2	Potencia eléctrica en una conexión serie	84
	Ejercicios sobre 6.5.1 y 6.5.2	86
6.5.3	Potencia eléctrica de la conexión en paralelo	87

	Ejercicios sobre 6.5.3.	88
6.6	Rendimiento	89
	Ejercicios sobre 6.6	90
<b>7</b>	<b>Calor eléctrico</b>	<b>91</b>
7.1	Temperatura y calor	91
7.2	Calor específico	93
7.3	Aparatos electrocaloríficos	94
7.3.1	Transmisión del calor	95
7.3.2	Calentadores de agua	95
7.3.3	Aparatos para calefacción de locales	97
7.4	Rendimiento de los aparatos electrocaloríficos (rendimiento térmico)	97
	Ejercicios sobre 7	99
<b>8</b>	<b>Conexiones de fuentes eléctricas de tensión</b>	<b>101</b>
8.1	Fuentes de tensión cargadas	101
8.2	Conexión en serie de fuentes de tensión	104
8.3	Conexión en paralelo de fuentes de tensión	106
	Ejercicios sobre 8	107
<b>9</b>	<b>Líneas cargadas</b>	<b>109</b>
9.1	Caída de tensión y pérdidas de potencia	109
9.2	Cálculo de líneas eléctricas	111
9.3	Protección de líneas eléctricas	112
	Ejercicios sobre 9	118
<b>10</b>	<b>Circuitos eléctricos técnicos</b>	<b>119</b>
10.1	Tipos de líneas y sus aplicaciones	120
10.2	Esquemas de circuitos	121
10.3	Circuitos de una lámpara	122
<b>11</b>	<b>Campo eléctrico</b>	<b>125</b>
11.1	Fenómenos básicos con campos eléctricos	125
11.1.1	Causas y efectos de los campos eléctricos	126
11.1.2	Formas del campo eléctrico	128
11.1.3	Blindaje de campos eléctricos	129
	Ejercicios sobre 11.1	130
11.2	Leyes del campo eléctrico	130
11.2.1	Intensidad del campo eléctrico	130
11.2.2	Capacidad de un condensador	133
11.2.3	Materia en el campo eléctrico	139
	Ejercicios sobre 11.2	140
11.3	Condensadores	141
11.3.1	Características de los condensadores	141
11.3.2	Tipos de condensadores	143



Unidad Operativa SENATI – Abancay



11.3.3	Curvas de tensión e intensidad en un condensador	146
11.3.4	Conexión en paralelo de condensadores	150
11.3.5	Conexión en serie de condensadores	150
	Ejercicios sobre 11.3	152
<b>12</b>	<b>Campo magnético</b>	<b>153</b>
12.1	Fenómenos, magnitudes y unidades del magnetismo	153
12.1.1	Imanes	153
12.1.2	Espectros magnéticos	155
12.1.3	Imanes elementales	158
12.1.4	Inducción magnética	159
12.1.5	Flujo magnético	160
12.1.6	Fuerza magnetomotriz	160
12.1.7	Intensidad del campo magnético	162
12.1.8	Relación entre la inducción magnética y la intensidad de campo magnético	163
12.1.9	Curvas de imanación	165
	Ejercicios sobre 12.1	168
12.2	Fuerzas en el campo magnético (principio del motor)	169
12.2.1	Conductor recorrido por una corriente y situado en un campo magnético	169
12.2.2	Bobina recorrida por una corriente y situada en un campo magnético	171
12.2.3	Conductores paralelos recorridos por corrientes	173
	Ejercicios sobre 12.2	175
12.3	Inducción electromagnética	175
12.3.1	Inducción por movimiento (principio del generador)	175
12.3.2	Inducción en reposo (principio del transformador)	177
12.3.3	Autoinducción	180
	Ejercicios sobre 12.3	181
<b>13</b>	<b>Electroquímica</b>	<b>183</b>
13.1	Compuestos químicos	183
13.1.1	Sistema periódico de los elementos	183
13.1.2	Enlace covalente y enlace iónico	184
13.1.3	Oxidación y reducción	186
13.1.4	Ácidos	188
13.1.5	Bases	189
13.1.6	Sales	189
	Ejercicios sobre 13.1	190
13.2	Conducción de la corriente en líquidos	190
13.2.1	Conductividad de líquidos	190
13.2.2	Electrólisis	191
13.2.3	Ley de la electrólisis	192
13.2.4	Aplicaciones técnicas de la electrólisis	193
	Ejercicios sobre 13.2	195

13.3	Generación electroquímica de la tensión	195
13.3.1	Estructura y clasificación de las pilas galvánicas	195
13.3.2	Serie de potenciales de electrodo	196
	Ejercicios sobre 13.3	199
13.4	Pilas primarias	199
13.4.1	Pilas de zinc y dióxido de manganeso	199
13.4.2	Pila de oxígeno del aire	202
13.4.3	Pilas alcalinas	203
13.4.4	Pilas de combustible	203
	Ejercicios sobre 13.4	204
13.5	Pilas secundarias	204
13.5.1	Acumuladores de plomo	204
13.5.2	Acumuladores de níquel	211
	Ejercicios sobre 13.5	212
13.6	Corrosión	212
13.6.1	Acción de gases y líquidos	213
13.6.2	Corrosión por formación de pilas galvánicas	214
13.6.3	Corrosión por corrientes derivadas	215
13.6.4	Protección contra la corrosión	216
	Ejercicios sobre 13.6	219
<b>14</b>	<b>Protección contra los peligros de la corriente eléctrica</b>	221
14.1	Peligros de la corriente eléctrica	221
14.1.1	Efectos sobre el cuerpo humano	221
14.1.2	Márgenes de intensidad	222
14.1.3	Máximas tensiones de contacto permisibles	223
14.2	Circuito de la corriente de fallo	224
14.2.1	Tipos de fallos	224
14.2.2	Tensiones en caso de fallo	224
	Ejercicios sobre 14.1 y 14.2	225
14.3	Protección contra tensiones de contacto excesivas	225
14.4	Normas de seguridad al trabajar en instalaciones eléctricas	227
14.5	Comportamiento en caso de accidentes eléctricos	230
14.5.1	Visión general	230
14.5.2	Explicación de las normas citadas	231
	Ejercicios sobre 14.4 y 14.5	232
<b>15</b>	<b>Materiales</b>	233
15.1	Sinopsis	233
15.1.1	Propiedades	233
15.1.2	Clasificación de los materiales	236
	Ejercicios sobre 15.1	238
15.2	Materiales férricos	239
15.2.1	Propiedades del acero	239
15.2.2	Tratamiento del acero	241



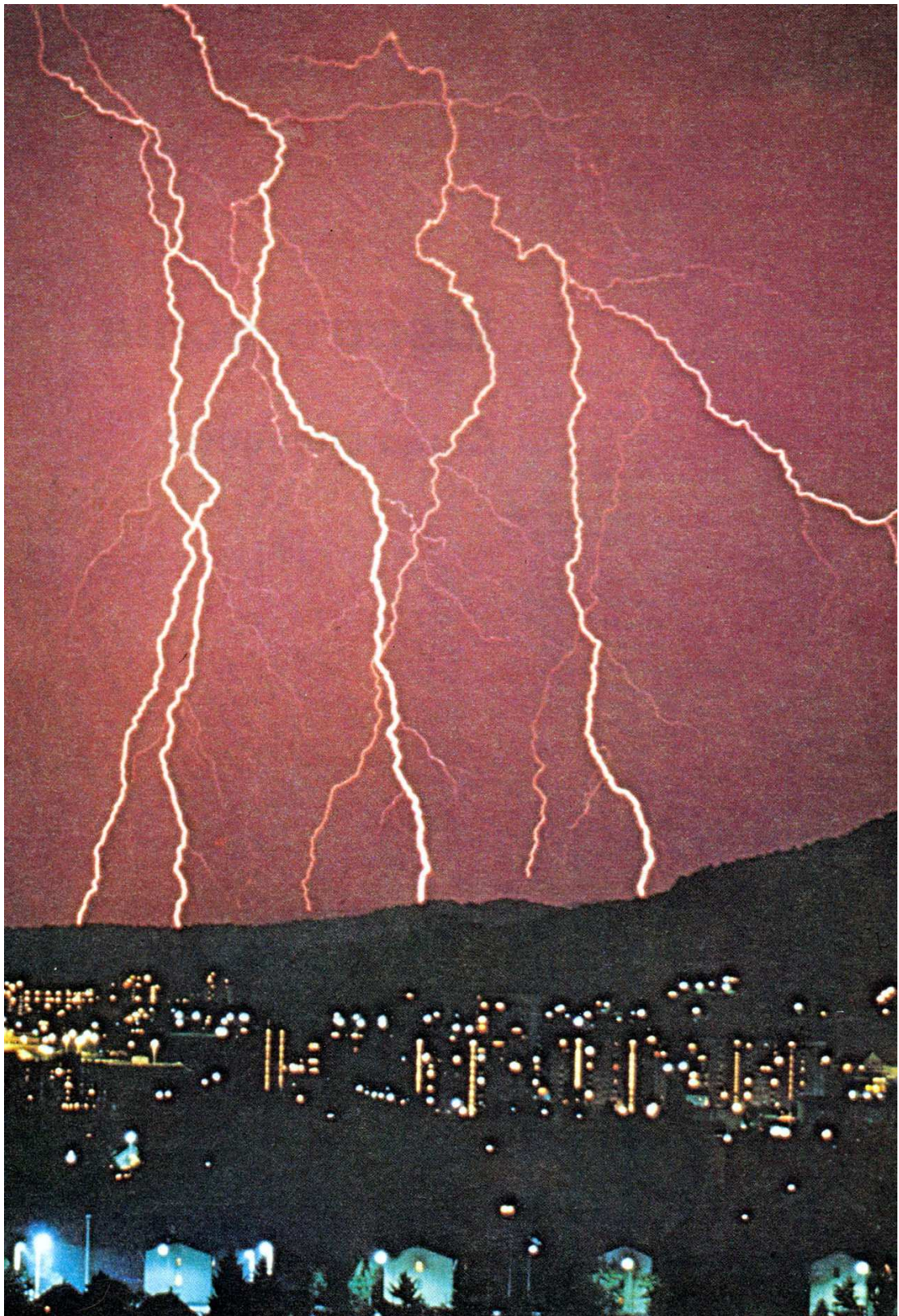
Unidad Operativa SENATI - Abancay

15.2.3	Datos sobre su mecanizado	242
	Ejercicios sobre 15.2	243
15.3	Materiales conductores	244
15.3.1	Cobre	245
15.3.2	Aleaciones de cobre	246
15.3.3	Aluminio	248
15.3.4	Plomo	251
15.3.5	Metales nobles	252
15.3.6	Mercurio	253
15.3.7	Materiales de contacto sinterizados	253
15.3.8	Comparación de las principales propiedades de materiales	254
	Ejercicios sobre 15.3	254
15.4	Materiales resistivos	255
15.4.1	Materiales para caldeo	255
15.4.2	Materiales para resistencias peliculares	256
15.4.3	Materiales para resistencias bobinadas	257
15.4.4	Materiales para resistencias especiales (semiconductores)	258
	Ejercicios sobre 15.4	259
15.5	Materiales aislantes	259
15.5.1	Características de los aislantes	260
15.5.2	Aislantes inorgánicos	262
15.5.3	Aislantes orgánicos naturales	264
15.5.4	Plásticos de celulosa	265
15.5.5	Termoplásticos	266
15.5.6	Elastómeros	269
15.5.7	Plásticos duros o termoestables	269
	Ejercicios sobre 15.5	272
15.6	Materiales de unión	273
15.6.1	Técnicas de unión	273
15.6.2	Soldaduras	275
15.6.3	Pegamentos	279
	Ejercicios sobre 15.6	
15.7	Materiales magnéticos	281
15.7.1	Propiedades de los materiales magnéticos	281
15.7.2	Materiales magnéticos dulces	283
15.7.3	Materiales magnéticos duros	284
	Ejercicios sobre 15.7	287

# **Electrotecnia**

**Curso elemental**





# 1. Conceptos fundamentales de electrotecnia

## 1.1. Introducción

Aunque la electrotecnia posee una influencia decisiva sobre nuestro mundo, los fenómenos eléctricos naturales, como por ejemplo el rayo, no han dejado de impresionar a la humanidad.

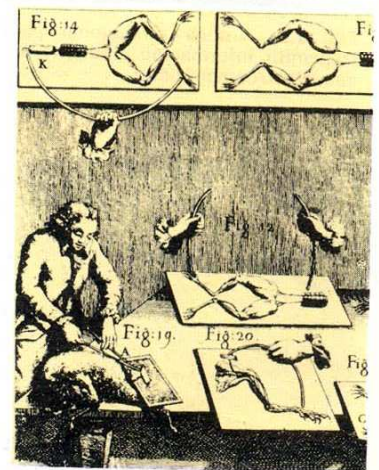
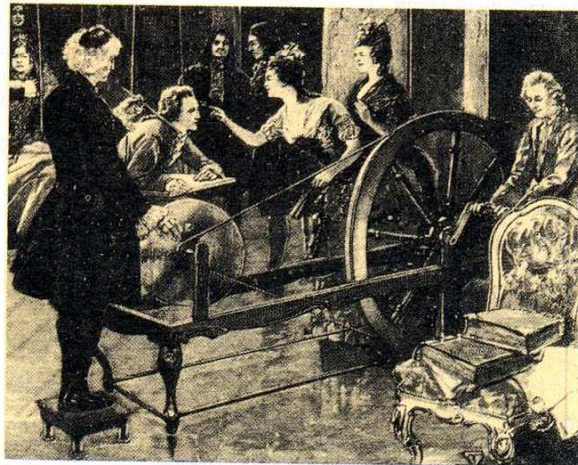
Estos fenómenos nos recuerdan repetidamente cuáles son las fuerzas naturales y cuáles los peligros que entraña la electricidad. Sin embargo, también permiten comprender la considerable dimensión de los esfuerzos que fueron necesarios para hacerla útil a la humanidad.

Los fenómenos eléctricos que pueden producirse artificialmente son conocidos desde hace tiempo. En la edad antigua los griegos ya sabían que con ámbar frotado con una gamuza podían atraerse materiales ligeros, como por ejemplo pelos, plumas o hilos. El estado de la ciencia de aquella época sólo permitía interpretar estos fenómenos como un efecto mágico o divino. También a esta época se remonta un concepto fundamental de estos fenómenos, pues el ámbar se llama en griego elektron.

Más tarde se descubrió la electricidad por frotamiento también en otros materiales. No obstante, su aplicación se limitó en aquellos tiempos a exhibiciones recreativas. Hasta finales del siglo XVIII los asistentes a estas demostraciones podían hacerse electrizar (fig. 1.1).

Paralelamente también se llevaron a cabo investigaciones fundamentales sobre algunos fenómenos. Los experimentos con muslos de ranas realizados por

**Figs. 1.1 y 1.2.** Demostración de una máquina de electrificación (principio del siglo XVIII). La electricidad se obtenía por frotamiento de una bola de azufre. Experimento de Galvani con «electricidad animal» (1791).



Unidad Operativa SENATI — Abancay

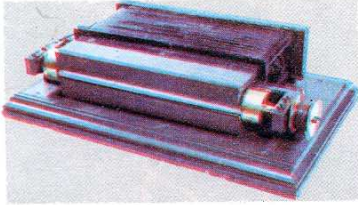


Fig. 1.3. La primera dínamo eléctrica, Werner v. Siemens, 1866.

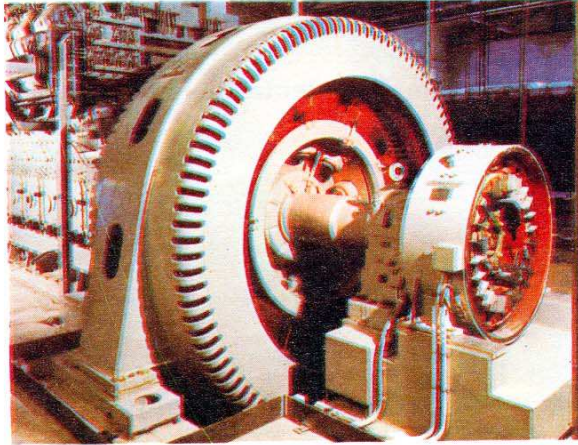


Fig. 1.4. Generador en la actualidad.

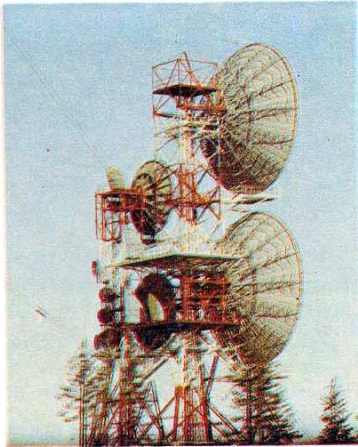


Fig. 1.5. Antena direccional para transmitir información mediante ondas electromagnéticas.

Aloisio Luigi Galvani<sup>1</sup> llevaron, por ejemplo, al desarrollo de los primeros generadores de tensión.

Las investigaciones sobre los fundamentos de la electricidad efectuados durante el siglo XIX tuvieron, entre otros, como resultado la invención de la bombilla en 1854 a cargo de Heinrich Goebel.<sup>2</sup> Independientemente también la inventó en 1879 Thomas Alva Edison,<sup>3</sup> pero sólo en el año 1882 se llegó a la fabricación en serie. Con ello se había dado el primer paso para hacer que la electricidad fuera útil al hombre.

La obtención de electricidad con ayuda del magnetismo fue otro desarrollo importante de cara a la utilización técnica de fenómenos fundamentales. El primer generador que seguía este procedimiento fue inventado en el año 1866 por Werner v. Siemens.<sup>4</sup> Esto permitió la obtención de la electricidad de una forma fácil y económica.

Junto a las aplicaciones de la electrotecnia en las técnicas energéticas también se utiliza cada vez más para la transmisión de información. La telecomunicación, que en un principio estuvo ligada a cables, se enriqueció posteriormente con la transmisión de señales sin hilos. Algunos de los resultados de esta técnica son el teléfono, la radio y la televisión. Con el tiempo se han convertido en medios imprescindibles para nuestra información y entretenimiento.

Nuestra dependencia de los aparatos e instalaciones eléctricos se hace palpable sobre todo en el momento en que se estropean. No obstante, en la mayoría de los casos el técnico requerido puede localizar y reparar rápidamente el defecto.

En la electrotecnia se diferencian fundamentalmente los siguientes grupos de profesiones y oficios:

<b>Profesiones en la industria</b>	} <b>de técnicas energéticas de telecomunicación</b>
<b>Oficios artesanales</b>	
	} <b>en técnicas energéticas en telecomunicación</b>

<sup>1</sup> Aloisio Luigi Galvani, médico italiano, 1737-1798.

<sup>2</sup> Heinrich Goebel, mecánico y óptico alemán, 1818-1893.

<sup>3</sup> Thomas Alva Edison, inventor americano, 1847-1931.

<sup>4</sup> Werner von Siemens, inventor e ingeniero alemán, 1816-1892.

La misión de las profesiones en la industria es básicamente la fabricación, comprobación, mantenimiento y puesta en funcionamiento de aparatos e instalaciones eléctricos. Los oficios correspondientes no se dedican en general a la fabricación sino a la instalación y puesta en funcionamiento. Sin embargo, no existe siempre una separación clara entre unos y otros.

La electrotecnia puede clasificarse en dos ramas fundamentales, las técnicas energéticas y la telecomunicación, ambas con sus correspondientes profesiones y oficios.

Las técnicas energéticas se ocupan de aparatos e instalaciones para la obtención de energía eléctrica a partir de otras formas de energía, para la transformación de energía eléctrica en otras formas de energía de mayor utilidad técnica o económica, o para el transporte de energía eléctrica.

Los aparatos e instalaciones de telecomunicación también precisan energía eléctrica para su funcionamiento. Sin embargo, ésta sólo se utiliza como medio para la transformación y proceso de señales, para su emisión o para su recepción.

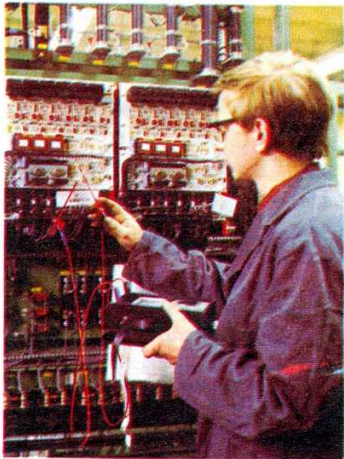


Fig. 1.6. Técnico electricista de instalaciones buscando fallos.



Fig. 1.7. Técnico electrónico en radio y televisión buscando fallos.

## 1.2. Fenómenos eléctricos y sus causas

Los fenómenos eléctricos no sólo se producen en aparatos técnicos, sino también en nuestro medio ambiente natural. Dos ejemplos de fenómenos eléctricos son el chisporroteo y las pequeñas chispas que pueden aparecer al quitarse un pullover de fibra sintética y la adherencia de trocitos de papel a plásticos. En los apartados que siguen profundizaremos en los conceptos básicos necesarios para la interpretación de estos fenómenos.

### 1.2.1. Carga eléctrica de materiales

Una varilla de plástico frotada con un trapo o una prenda de vestir atrae objetos pequeños, como por ejemplo recortes de papel.

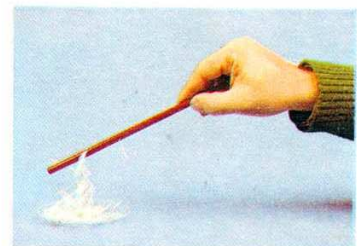
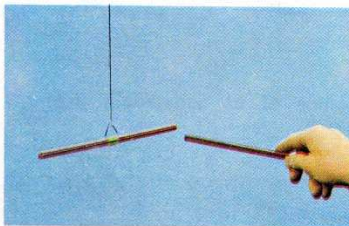


Fig. 1.8. Atracción con una varilla de plástico cargada.

En ocasiones también se puede observar una repulsión. Éstos son fenómenos eléctricos. Decimos que la varilla de plástico se ha cargado.

A veces la atracción se presenta simplemente al apretar uno contra otro dos objetos de diferentes materiales. Así, por ejemplo, los hojas de plástico y el papel se pegan débilmente el uno al otro.

El ser humano no está en condiciones de percibir directamente las cargas eléctricas, pues no posee para ello ningún sentido. Simplemente puede reconocer los efectos de estas cargas y sacar conclusiones del estado de carga en que se encuentran los objetos.



**Experimento 1-1:**  
**Influencia mutua entre dos varillas cargadas**

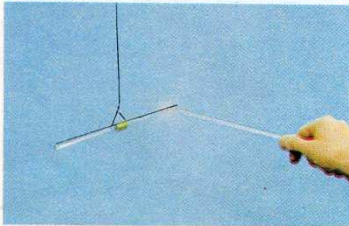
**Experimento A**

**Realización**

Con un trapo de lana se frota las varillas de plástico y a continuación se acercan una a otra.

**Resultado**

La varilla de plástico que está colgada es repelida por la otra.



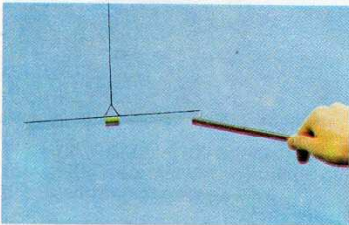
**Experimento B**

**Realización**

Con una gamuza de seda se frota las varillas de cristal y después se aproxima una a la otra.

**Resultado**

La varilla de cristal que está colgada es repelida por la otra.



**Experimento C**

**Realización**

La varilla de plástico cargada se acerca a la varilla de cristal también cargada.

**Resultado**

La varilla de cristal que está colgada es atraída por la varilla de plástico cargada.



Para poder hacer afirmaciones concretas sobre el tipo o signo de las cargas y sus efectos deben realizarse experimentos sistemáticos.

Estos experimentos demuestran que entre los cuerpos cargados actúan fuerzas de atracción y de repulsión.

La repulsión se presenta cuando las cargas de los cuerpos son del mismo signo.

La atracción se presenta cuando las cargas de los cuerpos son de diferente signo.

Cargas de igual signo se repelen.

Cargas de diferente signo se atraen.

Entre objetos eléctricamente neutros no aparecen ni fuerzas de atracción ni de repulsión.

### 1.2.2. Estructura de la materia

Cualquier cuerpo en su estado normal es eléctricamente neutro, si bien puede cargarse por influencias externas sin que cambie su aspecto exterior. El estado de carga de un cuerpo puede explicarse si se conoce la estructura de la materia.

La materia puede clasificarse simplificada en elementos (cuerpos simples) y compuestos químicos. Además existen las mezclas, que sin embargo se componen de diferentes elementos y compuestos. El aire es, por ejemplo, una mezcla de diferentes gases.

En la actualidad se conocen algo más de 100 elementos. Algunos de ellos no se encuentran en la naturaleza, pero pueden obtenerse artificialmente.

Los cuerpos simples o elementos no pueden descomponerse en otras sustancias ni por procedimientos químicos ni por procedimientos mecánicos.

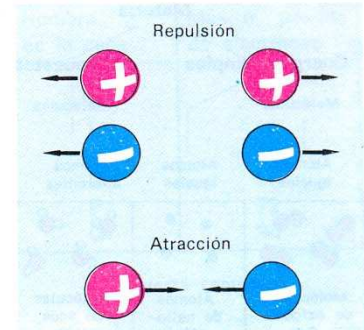


Fig. 1.9. Repulsión y atracción entre cargas.

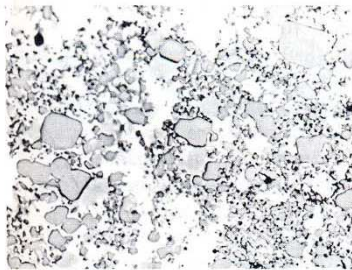


Fig. 1.10. Mezcla (aleación) de plata y wolframio (ampliada 500 veces).

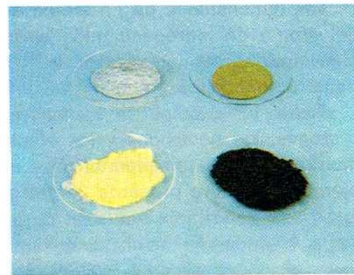


Fig. 1.11. Cuerpos simples pulverizados (de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo: aluminio, magnesio, azufre y carbono).

### Ejemplos de elementos

Hidrógeno, oxígeno, carbono, azufre, cobre, aluminio, hierro, magnesio.

Los átomos<sup>1</sup> son las partículas más pequeñas de un elemento que aún presentan las propiedades químicas de éste.

Cuando se combinan átomos de elementos diferentes aparecen nuevas sustancias que llamamos combinaciones o compuestos químicos.

### Ejemplos de compuestos químicos

Cloruro de polivinilo, orín, sal de cocina, agua, bencol, ácido sulfúrico.

Llamamos molécula a la partícula más pequeña de un compuesto. El concepto de molécula no se aplica solamente a combinaciones de átomos diferentes, sino también de átomos iguales.

<sup>1</sup> Palabra de origen griego que significa «indivisible».

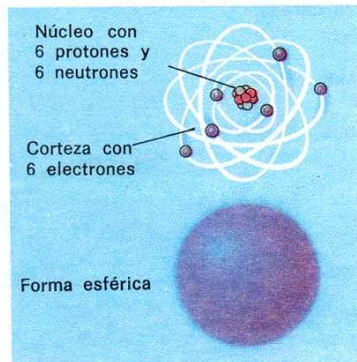
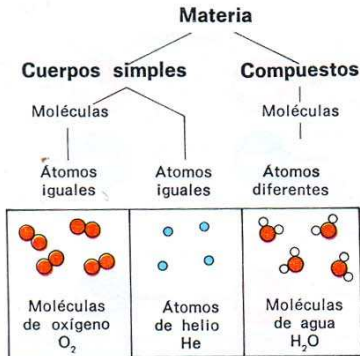


Fig. 1.12.

Fig. 1.13. Relación de tamaños en el átomo de hidrógeno. El tamaño de la cabeza de la cerilla corresponde al diámetro del núcleo, y el de la torre de televisión, al diámetro del átomo.

Las moléculas son combinaciones de átomos diferentes o iguales.

No todos los elementos dan lugar a combinaciones. Los gases nobles en condiciones normales no forman moléculas, sino que se presentan en estado atómico.

Los átomos son tan pequeños que ni siquiera pueden visualizarse con dispositivos auxiliares. Por ello se han desarrollado modelos teóricos de su estructura, con lo que pueden explicarse los resultados de los experimentos.

Un modelo de átomo que ha demostrado ser muy útil es el de Bohr.<sup>1</sup>

El átomo se compone de un núcleo y de una corteza.

El núcleo se compone de protones y neutrones.

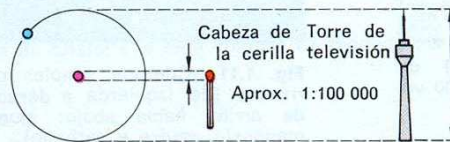
Alrededor del núcleo se mueven los electrones describiendo trayectorias (órbitas) circulares o elípticas.

Los electrones se mueven alrededor del núcleo a gran velocidad y dan con ello la impresión de formar una corteza.

El átomo parece desde fuera una esfera (fig. 1.12).

Las dimensiones de un átomo son extraordinariamente pequeñas. El diámetro del átomo de hidrógeno mide aproximadamente  $10^{-10}$  m, y el diámetro del núcleo, sólo aproximadamente  $10^{-15}$  m. La figura 1.13 representa la relación entre estas dimensiones.

Todos los átomos se componen de las mismas partículas elementales; los protones, los neutrones y los electrones. La diferencia entre los diferentes elementos consiste simplemente en el número de partículas que poseen. Así, por ejemplo, el cobre presenta 29 protones y el zinc, 30 protones en los núcleos. En



la figura 1.14 están representados en un plano algunos modelos atómicos simplificados.

En un átomo el número de electrones es siempre igual al número de proto-

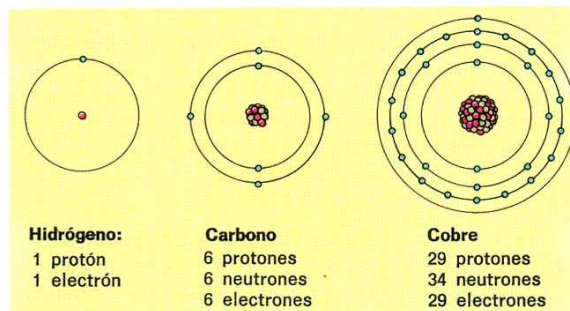


Fig. 1.14. Representación plana de diferentes átomos.

<sup>1</sup> Niels Heinrich David Bohr, físico danés, 1885-1962.

El modelo de átomo que lleva su nombre es fundamental para la teoría moderna de la estructura atómica y sufre actualmente un constante desarrollo y perfeccionamiento.

nes. El número de neutrones suele ser diferente del de protones. Los protones y los electrones dan lugar a los fenómenos eléctricos.

Los electrones describen sus órbitas en unas zonas determinadas alrededor del núcleo, zonas que se llaman capas y se caracterizan mediante letras correlativas.

**1.2.3. Propiedades eléctricas de los átomos**

Explicaremos las propiedades eléctricas de los átomos tomando como ejemplo el de hidrógeno, por ser el más sencillo. Se compone simplemente de un protón en el núcleo y de un electrón.

El electrón describe una órbita alrededor del núcleo. En toda su trayectoria actúa sobre él una fuerza de inercia (fuerza centrífuga) que le haría alejarse del centro. Esta fuerza también se pone de manifiesto en todo movimiento circular, por ejemplo en un tiovivo, en el lanzamiento de martillo deportivo y al conducir un vehículo por una curva. En el movimiento circular del electrón esta fuerza es igual y opuesta a una fuerza de atracción de origen eléctrico, debida a tener signos opuestos las cargas del electrón y del protón del núcleo. Se considera que la carga del electrón es negativa y la del protón, positiva. El neutrón es eléctricamente neutro.

Nombre de la capa	Máx. n. posible de electrones
K	2
L	8
M	18
N	32
O	50
P	72
Q	98

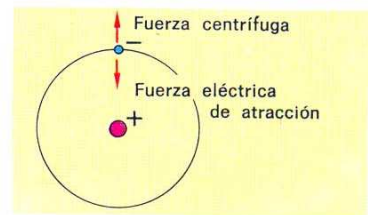


Fig. 1.15. Modelo del átomo de hidrógeno.

Los electrones son partículas atómicas de la corteza con carga negativa.  
 Los protones son partículas atómicas del núcleo con carga positiva.  
 Los neutrones son partículas atómicas del núcleo eléctricamente neutras.

Con estas ideas sobre la estructura atómica de la materia pueden explicarse los resultados del experimento 1-1.

Al frotar la varilla de plástico con el paño de lana hay electrones que pasan del paño a la varilla, que posee por tanto más electrones que antes y queda cargada negativamente (ver fig. 1-16).

Al frotar la varilla de cristal con el pañuelo de seda hay electrones que se separan de la varilla y pasan al pañuelo, con lo que en la varilla quedarán más cargas positivas que negativas (ver fig. 1-17).

Las cargas eléctricas intentan neutralizar sus efectos mutuamente, dando lugar con ello a fuerzas de atracción entre cuerpos cargados con distinto signo.

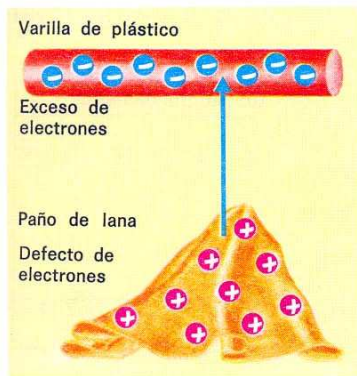


Fig. 1.16.

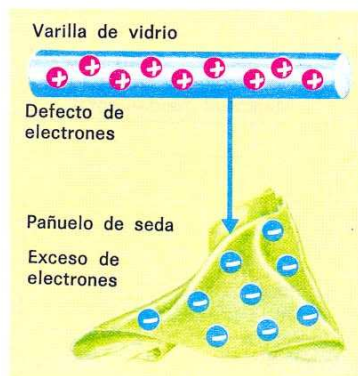


Fig. 1.17.



**Ejercicios sobre 1.2**

1. ¿Cuáles son las cargas que se repelen?
2. Una regla de plástico cargada atrae a virutas de poliestireno. ¿Cuáles podrían ser los signos de las cargas de la regla y del poliestireno?
3. ¿Cómo se llama la partícula más pequeña de un elemento que todavía presenta sus propiedades químicas?
4. Explicar la diferencia entre los elementos y los compuestos químicos.
5. Decir cuáles de las siguientes sustancias son elementos y cuáles compuestos: yeso, vidrio, zinc, cerámica, uranio, alcohol, nitrógeno, cobre, carbono, aluminio, azufre. (Nota: En el apartado 15.1.2 se encuentra una tabla periódica de los elementos.)
6. ¿Cuáles son los componentes de una molécula?
7. Dibujar el esquema de un átomo de helio.
8. Dibujar el esquema de un átomo de hidrógeno indicando las cargas y las fuerzas.

**1.3. Conceptos básicos de mecánica**

Algunos fenómenos y relaciones eléctricas sólo pueden explicarse con nociones, conceptos y magnitudes de la mecánica, que es una parte de la física. Para poder comprender mejor los capítulos siguientes debemos conocer algunos de estos conceptos. Seguramente la mayoría ya son conocidos, por lo que aquí sólo les dedicaremos un ligero repaso.

Ejemplos de magnitudes físicas:

longitud  $l$   
 masa  $m$   
 tiempo  $t$

Ejemplos de unidades:

kilogramo kg  
 metro m  
 segundo s

**1.3.1. Magnitudes, unidades y ecuaciones físicas**

Para poderlos comparar los fenómenos físicos deben estar perfectamente definidos, para lo cual sirven las magnitudes físicas. Son propiedades mensurables de objetos, estados o fenómenos físicos. Las magnitudes físicas se abrevian mediante símbolos. En un texto impreso se describen en caracteres de letra cursiva.

A cada magnitud le corresponde una unidad, que indica cómo se mide. Por ejemplo, la unidad de longitud es el metro. En un texto impreso los símbolos de las unidades se escriben en caracteres redondos.

En medidas físicas y técnicas todos los fenómenos y objetos mensurables se basan en muy pocas magnitudes, denominadas magnitudes fundamentales, que son independientes entre sí. A nivel internacional se han determinado siete magnitudes fundamentales y sus correspondientes unidades, que dan lugar al **siste-**

Magnitud fundamental	
Nombre	Símbolo
Longitud	$l$
Masa	$m$
Tiempo	$t$
Intensidad de corriente eléctrica	$I$
Temperatura termodinámica	$T$
Cantidad de materia	$n$
Intensidad luminosa	$I_v$

Unidad fundamental	
Nombre	Símbolo
Metro	m
Kilogramo	kg
Segundo	s
Ampere	A
Kelvin	K
Mol	mol
Candela	cd

ma internacional de unidades SI. Las tablas de la página anterior reproducen estas siete magnitudes fundamentales y sus unidades.

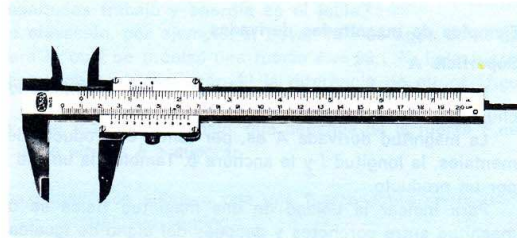


Fig. 1.18. Pie de rey para medir longitudes.

Para cada una de las magnitudes citadas existen instrumentos de medida apropiados. Por ejemplo:

- Una regla graduada para medir la longitud en metros.
- Una balanza para medir la masa en kilogramos.
- Un reloj para medir el tiempo en segundos.
- Un amperímetro para medir la intensidad de corriente en amperes.

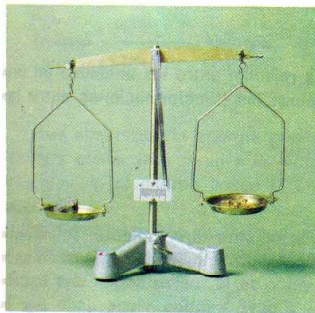


Fig. 1.19. Balanza para medir masas.



Fig. 1.20. Cronómetro para medir tiempos.

Con estos instrumentos de medida puede obtenerse el valor de la magnitud leyendo el valor numérico indicado y la unidad.

Por tanto, toda magnitud consta de un valor numérico y una unidad, escritas en forma de ecuación.

Ejemplos de ecuaciones de magnitudes físicas:

$$l = 2 \text{ m} \quad m = 50 \text{ kg}$$

$$\text{magnitud} = \text{valor numérico} \cdot \text{unidad}$$

Mediante las siete magnitudes fundamentales pueden expresarse todas las demás magnitudes, y por tanto también sus unidades, que se llaman magnitudes o unidades derivadas.



Fig. 1.21. Amperímetro para medir la intensidad de la corriente eléctrica.

- Una magnitud derivada está compuesta por magnitudes fundamentales.
- Una unidad derivada está compuesta por unidades fundamentales.

Para las magnitudes y las unidades derivadas suelen utilizarse símbolos nuevos a fin de abreviar la escritura.

**Ejemplos de magnitudes derivadas**

**Superficie A**

La superficie de un rectángulo se calcula multiplicando la longitud  $l$  por la anchura  $b$ .

La magnitud derivada  $A$  es, por tanto, el producto de dos magnitudes fundamentales, la longitud  $l$  y la anchura  $b$ . También la unidad derivada estará formada por un producto.

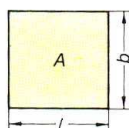
Para indicar la unidad de una magnitud física se coloca el símbolo de la magnitud entre corchetes y después del signo de igualdad, la unidad.

Las magnitudes físicas se combinan en ecuaciones para aclarar la relación que existe entre ellas.

Existen dos tipos de ecuaciones, las de magnitudes y las de unidades.

$A = l \cdot b$

$[A] = m \cdot m$   
 $[A] = m^2$



**Ecuaciones de magnitudes**

En las ecuaciones de magnitudes se representa la relación entre las magnitudes mediante una ecuación.

Ejemplo:  $A = l \cdot b$ .

**Ecuaciones de unidades**

En las ecuaciones de unidades se indica la relación entre las unidades en una igualdad, con ayuda de la cual se pueden realizar las transformaciones entre las diversas unidades.

Ejemplos:  $1 \text{ m} = 100 \text{ cm}$       $1 \text{ m}^2 = 10^4 \text{ cm}^2$

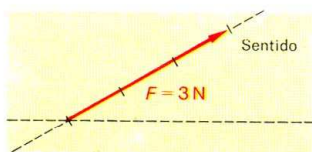


Fig. 1.22.

**1.3.2. Fuerza y camino recorrido**

La fuerza es una magnitud que no se puede percibir directamente, solamente se pueden reconocer sus efectos. Se la representa simbólicamente mediante una flecha o vector, cuya longitud indica el valor de la fuerza según una escala apropiada, cuya dirección es la de la fuerza y cuyo sentido viene dado por la punta de la flecha.

La unidad de fuerza es el **newton**.<sup>1</sup>

Una fuerza que actúa sobre un objeto fijo lo deforma (fig. 1.23).

Una fuerza que actúa sobre un objeto en movimiento modifica éste.

La unidad de espacio o camino recorrido es el **metro**.

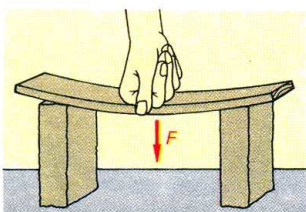


Fig. 1.23. Efecto de una fuerza sobre un objeto en reposo.

**Fuerza**

Símbolo  $F$   
Símbolo de la unidad N

**Espacio**

Símbolo  $s$   
Símbolo de la unidad m

Para la misma magnitud existen aún otras denominaciones, por ejemplo longitud,  $l$ , anchura  $b$ , altura  $h$ , radio  $r$ , diámetro  $d$ , longitud de onda  $\lambda$ . En electrotecnia existen, por ejemplo, la longitud de un conductor  $l$ , la longitud de las líneas de campo  $l$ , el diámetro de un conductor  $d$ , etc.

<sup>1</sup> Sir Isaac Newton, físico inglés, 1642-1727.

**1.3.3. Trabajo y energía**

El trabajo y la energía son dos conceptos de gran importancia en la sociedad moderna industrializada. Podemos explicarlos fácilmente tomando como ejemplo el trabajo de elevación

La unidad de las magnitudes trabajo y energía es el **joule**.<sup>2</sup>

Se realiza trabajo de elevación, por ejemplo, al llevar 10 l de agua del 2.º al 3.º piso (= 3,06 m), para lo cual se precisa una fuerza  $F = 98,1$  N. Esta fuerza debe estar actuando hasta que se haya superado la diferencia de altura (figura 1.24).

El portador del agua debe realizar un trabajo, que depende de la fuerza  $F$  necesaria y de la diferencia de alturas  $h$  a superar.

Se realiza un trabajo mecánico siempre que una fuerza actúe sobre un cuerpo a lo largo de un determinado camino.

**El trabajo es fuerza por espacio**

$$1 \text{ J} = 1 \text{ N} \cdot 1 \text{ m}$$

Entre el trabajo y la energía existe una determinada relación. Mientras el trabajo describe una característica de un proceso, la energía describe el estado de un cuerpo o de un sistema. La energía aparece al realizar un trabajo.

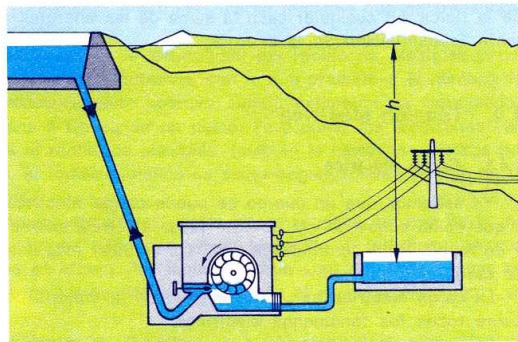
El origen de la energía reside en la realización de un trabajo.



Para simbolizar la energía puede tomarse el símbolo  $E$  en lugar de  $W$ .

Para elevar un cuerpo a la altura  $h$  se necesita un determinado trabajo. Una vez elevado el cuerpo posee la energía correspondiente, que se llama **energía potencial  $E_p$** .

Una vez realizado un trabajo, éste no se pierde sino que se dispone de él en forma de energía, con la cual puede volverse a realizar trabajo.



<sup>2</sup> James Prescott Joule, físico inglés, 1818-1889

**Trabajo, energía**

Símbolo  $W$   
 Símbolo de la unidad J

**Trabajo**

$$W = F \cdot h$$

$$[W] = \text{N m}$$

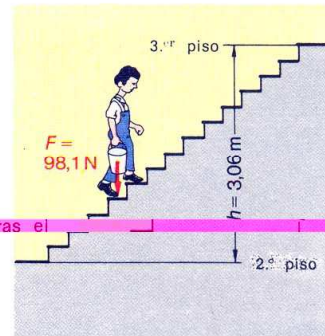


Fig. 1.24. El portador del agua realiza un trabajo de elevación.

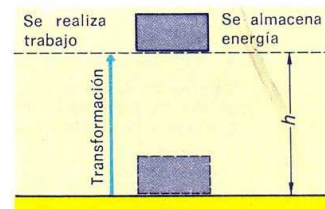


Fig. 1.25. Trabajo y energía al elevar un cuerpo.

Fig. 1.26. Transformación de energía en una central hidroeléctrica de recuperación de agua.

Energía es la capacidad de un cuerpo o un sistema para realizar un trabajo.

En nuestro ejemplo (experimento teórico) podría dejarse fluir el agua a través de un tubo hasta el segundo piso, en donde podríamos accionar una turbina pequeña. De este modo podría recuperarse el trabajo realizado (trabajo de elevación) en forma de trabajo de propulsión (despreciando las pérdidas).

Siguiendo este principio funcionan, por ejemplo, las centrales hidroeléctricas de recuperación de agua.

En este caso se transforma la energía potencial del agua en energía motriz, también llamada **energía cinética  $E_k$** .

La energía potencial de un cuerpo depende del punto de referencia elegido. Todos los puntos que se encuentran a la misma altura poseen el mismo **potencial** respecto a ese punto de referencia.

En la figura 1.27 están representados los valores de la energía potencial de 10 l de agua referidos a la planta baja.

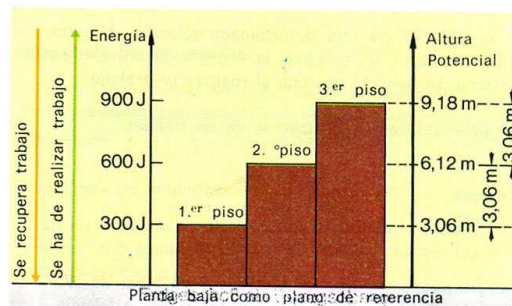


Fig. 1.27. Valores de la energía y del potencial de 10 l de agua en una casa, referidos a la planta baja.



Fig. 1.28. Atomo neutro de oxígeno.

Para aumentar el potencial se debe realizar un trabajo; éste se libera cuando se reduce el potencial.

Los diferentes tipos de energía pueden transformarse unos en otros. Esta importante ley física no sólo es válida en mecánica sino en todos los campos de la física. En cualquier caso la suma de las energías de un sistema es constante (conservación de la energía).

## 1.4. Tensión eléctrica

### 1.4.1. Carga eléctrica

Ya sabemos que un cuerpo se puede cargar eléctricamente por frotamiento, y que como consecuencia de esta carga eléctrica aparecen fuerzas de atracción y de repulsión. A continuación vamos a estudiar más detenidamente el concepto de carga eléctrica.

La carga eléctrica es una propiedad de la materia con la que pueden explicarse todos los fenómenos eléctricos.

La unidad de la magnitud carga eléctrica es el **coulomb**.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Charles-Augustin Coulomb, físico francés, 1736-1806.

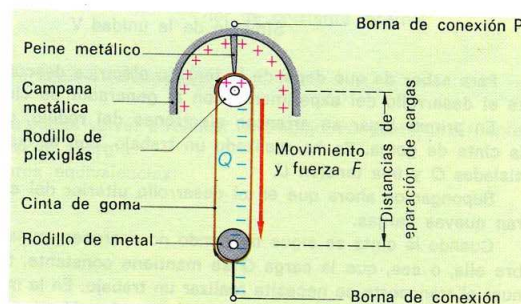
Existen dos tipos opuestos de cargas: las positivas y las negativas (ver párrafo 1.2.3).

Los electrones son los portadores de carga negativa y los protones, los de carga positiva. El valor absoluto de la carga de un electrón es igual al de la carga de un protón.

Carga de un electrón:  
 $e = -1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

Carga de un protón:  
 $e = +1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

Por tanto, cuando un átomo posee tantos electrones como protones (éste es el estado normal), se compensan mutuamente los efectos de las cargas, y el átomo visto desde el exterior es eléctricamente neutro.



**Carga**  
 Símbolo  $Q$   
 Símbolo de la unidad C

Fig. 1.29. Sección y principio del funcionamiento de un generador de Van de Graaff.

#### 1.4.2. Generación de tensión

##### 1.4.2.1. Principio de la generación de tensión

El estado de equilibrio de los átomos neutros puede modificarse desde el exterior, por ejemplo por frotamiento. Con un generador electrostático de cinta sin fin (o de Van de Graaff, fig. 1.30) puede realizarse y explicarse fácilmente la separación de cargas.

El generador de cinta sin fin se acciona mediante un rodillo metálico. Una cinta ancha de goma transmite el movimiento giratorio a un rodillo de plexiglás, como si se tratara de una transmisión por correa. Al girar la cinta frota contra el rodillo de plexiglás y «arranca» electrones, carga negativa que se transporta hacia abajo al rodillo metálico.

De este modo se va alterando la neutralidad del rodillo de plexiglás y del metálico. El primero va cediendo electrones, con lo que predomina el número de protones y se vuelve eléctricamente positivo. Simultáneamente va «atrayendo» electrones de la campana a través de un peine. Pero como los electrones van también bajando de ella al rodillo de plexiglás, también la campana se carga positivamente. En cambio, el rodillo metálico se carga negativamente porque en él predominan los electrones.

La separación y el transporte de las cargas no se produce sin que haya una oposición, pues los electrones tienden a volver al rodillo de plexiglás, ya que cargas de distinto signo se atraen. Por tanto, hay que superar estas fuerzas de atracción. Las fuerzas para compensarlas se obtienen al accionar el rodillo y se transmiten a la cinta.

La fuerza actúa a lo largo de un camino  $s$ , y por tanto debe realizarse un trabajo  $W$ .

Este trabajo es mecánico. Pero, ¿qué ocurre eléctricamente?

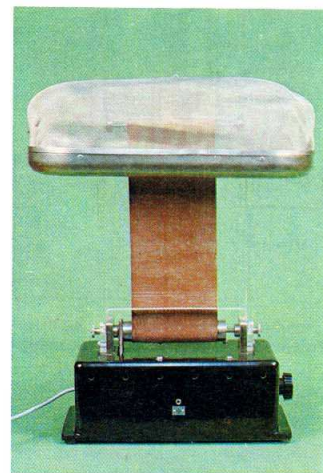


Fig. 1.30. Generador de Van de Graaff.

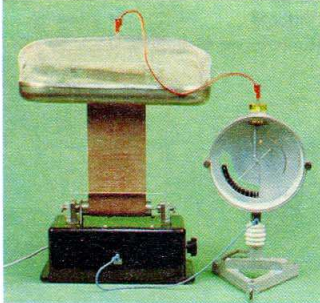


Fig. 1.31. El instrumento de medida indica la existencia de una tensión.

Para investigarlo conectamos el generador de cinta sin fin a un instrumento de medida (fig. 1.31).

Entre los dos tipos de cargas existe un determinado estado, una tendencia de las cargas a compensarse mutuamente. Esta tendencia se denomina tensión eléctrica.

La tensión eléctrica se origina por separación de cargas.  
La tensión eléctrica es la tendencia de las cargas a compensarse.

La unidad de la magnitud tensión eléctrica es el **volt**.<sup>1</sup>

#### Tensión eléctrica

Símbolo  $U$

Símbolo de la unidad V

Para saber de qué depende la tensión eléctrica descompongamos mentalmente el desarrollo del experimento con el generador de cinta sin fin.

En primer lugar se arrancan electrones del rodillo, que se depositan sobre la cinta de goma. Se ha realizado un trabajo, con lo que han aparecido cargas aisladas  $Q$  y una tensión  $U$ .

Supongamos ahora que en el desarrollo ulterior del experimento no se separan nuevas cargas.

Cuando la cinta se sigue moviendo no aparecen, pues, cargas adicionales sobre ella, o sea, que la carga  $Q$  se mantiene constante. Sin embargo para continuar el transporte se necesita realizar un trabajo. En la misma proporción en que se debe aumentar el trabajo crece la tensión eléctrica  $U$ .

$U$  es proporcional a  $W$ :  $U \sim W$ .

Naturalmente, el trabajo a realizar no sólo depende del valor de la tensión sino también del valor de la carga a transportar.

Si hay que transportar mucha carga habrá que realizar un trabajo proporcionalmente mayor, sin que con ello aparezca simultáneamente una tensión más elevada.

$W \sim Q$

La tensión es proporcional al trabajo por unidad de carga necesario para la separación y transporte de ésta.

$$U = \frac{W}{Q}$$

$$1 \text{ V} = \frac{1 \text{ J}}{1 \text{ C}} = \frac{1 \text{ N m}}{1 \text{ C}}$$

#### Órdenes de magnitud de tensiones

Corazón humano	aprox.	0,001 V
Acumulador de plomo (6 pilas)		12 V
Red de baja tensión	por ej.	220 V
Tubo de televisión en color	aprox.	25 000 V
Red de alta tensión	p. ej.	110 000 V

Una fuente de tensión separa cargas y crea una tensión eléctrica  $U$ . Ésta es un estado eléctrico de energía, pues las cargas tienden a volverse a compensar.

<sup>1</sup> Alessandro Volta, físico italiano, 1745-1827.

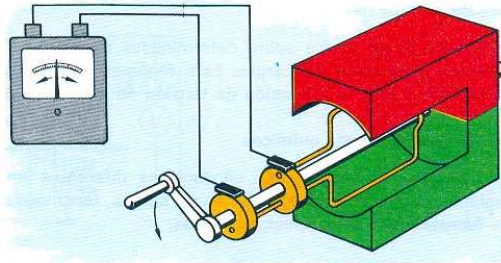


Fig. 1.32. Esquema de un generador de corriente alterna.

Energía eléctrica es igual a tensión por carga.

Esta energía eléctrica puede volver a realizar un trabajo. Por tanto, una fuente de tensión es una fuente de energía.

Tenemos las siguientes equivalencias:

$$W = E_{el}$$

$$F \cdot s = U \cdot Q$$

$$1 \text{ N} \cdot 1 \text{ m} = 1 \text{ V} \cdot 1 \text{ C}$$

#### 1.4.2.2. Maneras de obtener una tensión

Existen diversos procedimientos técnicos para generar una tensión. A continuación describiremos brevemente algunos de ellos.

##### Tensión por frotamiento

Al frotar materiales plásticos se obtiene un desequilibrio de cargas (véase 1.2.1).

##### Tensión al mover imanes o bobinas

La diferencia de cargas se obtienen al mover una bobina en un campo magnético o al mover un imán en una bobina fija. Este procedimiento se utiliza por ejemplo en los generadores de las centrales eléctricas. La dinamo de una bicicleta y los micrófonos dinámicos también funcionan según el mismo principio.

##### Tensión por tracción o presión en cristales

Al variar la presión o la tracción aparece una diferencia de cargas entre las superficies de determinados cristales (por ejemplo, cuarzo). El valor de la diferencia de cargas depende de la intensidad del esfuerzo exterior.

##### Tensión por calor

Al calentar el punto de contacto de dos metales diferentes aparece una pequeña tensión (algunos milivolt). El valor de la tensión depende de la temperatura. Este fenómeno se utiliza para efectuar medidas de temperatura.

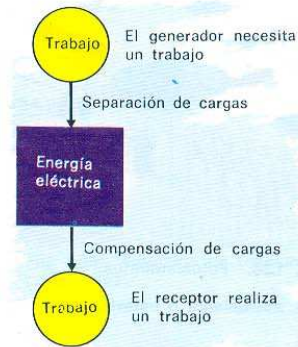


Fig. 1.33. Principio de la transformación entre trabajo y energía eléctrica.

##### Energía eléctrica

$$E_{el} = U \cdot Q$$

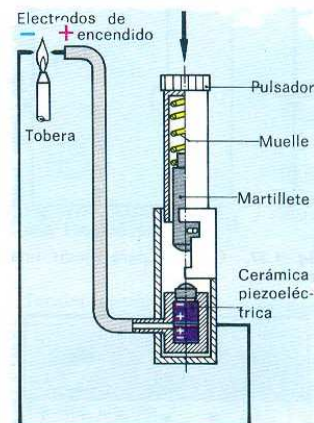


Fig. 1.34. Sistema de encendido (generación de tensión por presión)



Fig. 1.35. Par termoeléctrico. Unidad Operativa SENATI - Abancay



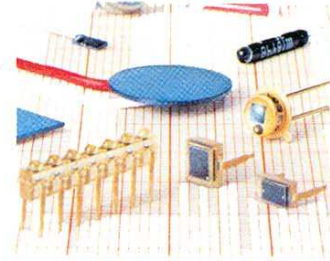


Fig. 1.36. Fotoelementos.

**Pila, acumulador o batería**



**Voltímetro**

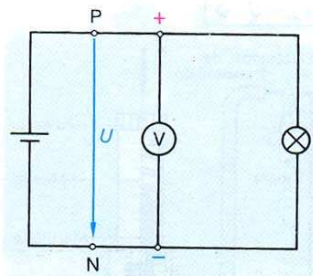


Fig. 1.37. Circuito para medir una tensión

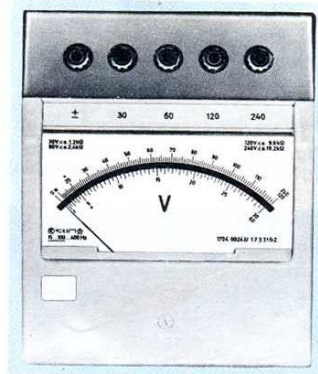


Fig. 1.38. Voltímetro de varias escalas.

**Tensión por luz**

Cuando la luz incide sobre determinados materiales (silicio, germanio) provoca una separación de cargas. Este fenómeno se utiliza, por ejemplo, en los fotómetros y para la obtención de tensión en los satélites artificiales.

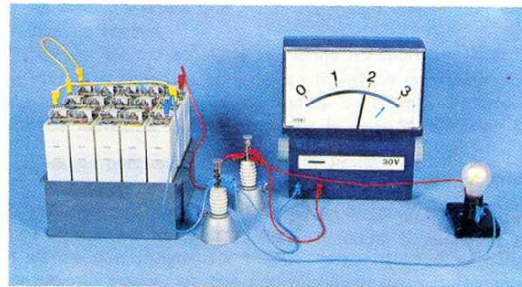
**Tensión por procesos químicos**

Cuando se sumergen dos conductores diferentes en un líquido conductor también se produce una separación de cargas, fenómeno que se utiliza en todas las fuentes de tensión electroquímicas.

**1.4.3. Medida de la tensión**

Entre todos aquellos puntos en los que haya cargas diferentes aparece una tensión eléctrica. Existe, pues, una diferencia de cargas, o sea, una diferencia de potencial.

La tensión eléctrica es una diferencia de potencial eléctrico.



Las tensiones eléctricas pueden medirse fácilmente con los instrumentos de medida adecuados, pues basta con unir las dos bornas del voltímetro con los dos puntos entre los que se desea medir la tensión (fig. 1.37).

Existen diferentes tipos de voltímetros (fig. 1.38). Al medir deben tenerse en cuenta sus diferentes propiedades, pues en algunos instrumentos de medida debe conservarse, por ejemplo, el tipo de tensión y su polaridad (ver 1.4.4).

Cuando en un determinado punto existe un defecto de electrones y en otro, un exceso, entre ambos puntos existirá una tensión eléctrica.

No obstante, ésta no es la única posibilidad. Por ejemplo, entre dos puntos, ambos con exceso de electrones, también aparece una tensión si los excesos son diferentes.

Al igual que en el caso de la energía mecánica (ver 1.3.3) debemos fijar un punto de referencia, y a continuación podemos medir las tensiones o potenciales. En la figura 1.39 hemos representado una única distribución de cargas con diferentes valores de tensión. El punto de referencia se caracteriza con el símbolo de tierra  $\perp$ . Las flechas indican los diversos sentidos de la tensión (de + a  $\perp$ ).

Puede también desplazarse el punto de referencia sin que cambien las diferencias de potencial. Sólo varían los diferentes valores del potencial.

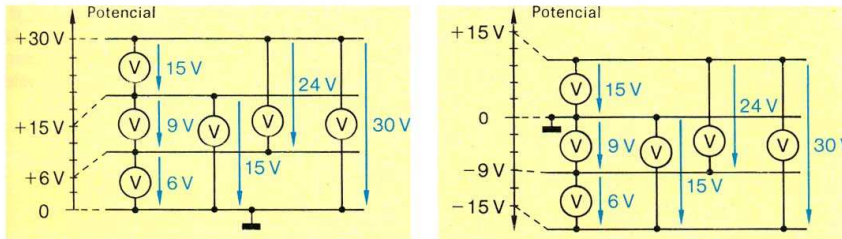


Fig. 1.39. Ejemplos de tensiones y potenciales.

1.4.4. Tipos de tensión

Para satisfacer las diferentes necesidades de la técnica se han desarrollado las correspondientes fuentes de tensión. Según su estructura proporcionan una tensión continua, alterna o mixta. En este apartado vamos a estudiar las diferencias entre ellas.

Las magnitudes eléctricas que varían con el tiempo pueden visualizarse con un osciloscopio. En la figura 1.40 puede observarse el oscilograma de una tensión continua en función del tiempo y su correspondiente representación gráfica, también llamada simplemente gráfica.

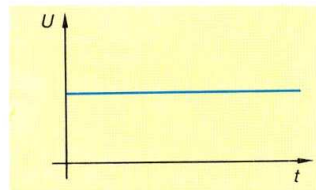
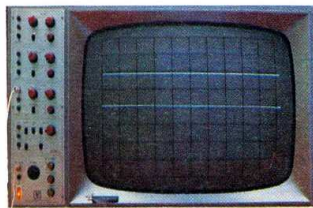


Fig. 1.40. Oscilograma y gráfica de una tensión continua.

La **tensión continua** tiene un valor que siempre permanece constante, desde que se conecta hasta que se desconecta. La polaridad de la fuente de tensión no varía.

**Tensión continua**



Las fuentes de **tensión alterna** varían constantemente su polaridad, y con ella el sentido de la tensión. La tensión que las centrales eléctricas suministran en nuestras casas es una tensión alterna. La figura 1.41 muestra la forma de una tensión alterna sinusoidal en un oscilograma y su gráfica correspondiente.

**Tensión alterna**

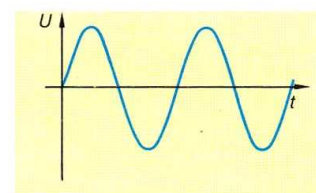
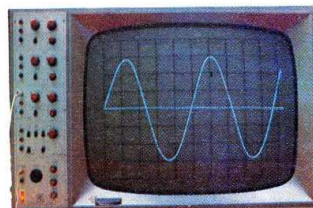


Fig. 1.41. Oscilograma y gráfica de una tensión alterna.

**Tensión mixta**

Una **tensión mixta** se compone de una tensión continua y una tensión alterna superpuestas. La figura 1.42 muestra una posible forma. El valor de la tensión no es constante, pues oscila alrededor de un valor medio, en el caso representado entre los valores +3 V y +17 V. La tensión continua media vale +10 V.

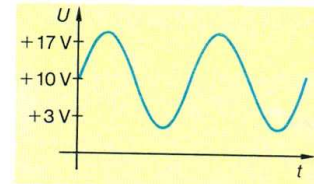
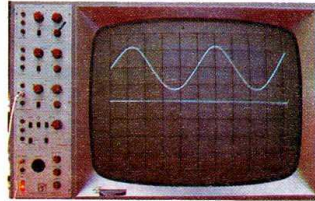


Fig. 1.42. Oscilograma y gráfica de una tensión mixta.

**Ejercicios sobre 1.4**

1. Entre dos polos existe una diferencia de cargas. ¿Cómo se denomina este estado?
2. ¿Cuál es el símbolo de la tensión y cuál el de su unidad?
3. Con un generador de cinta pueden generarse tensiones. Describir los procesos mecánicos y eléctricos.
4. Entre la tensión, el trabajo y la carga existe una relación. Expresarla mediante una fórmula.
5. ¿Cómo varía la tensión cuando se aumenta la separación entre unas cargas que permanecen constantes?
6. Citar algunos aparatos con los que puedan generarse tensiones e indicar el principio por el que se obtienen éstas.
7. Dibujar un circuito para medir una tensión.
8. ¿Qué debe vigilarse al conectar un voltímetro?
9. Indicar las diferencias entre una tensión continua y una alterna.
10. Trazar en una gráfica la forma de una tensión mixta.
11. ¿Con qué aparato de medida pueden visualizarse tensiones en función del tiempo?

**1.5. Corriente eléctrica****1.5.1. Circuito eléctrico y sentido de la corriente**

Una fuente de tensión separa cargas, obteniendo de este modo una tensión. Esta tensión intenta volver a unir las cargas, pero las fuerzas de separación de cargas impiden que esto ocurra en el interior de la fuente de tensión.

Sin embargo, si se conecta una bombilla a la fuente a través de unos conductores, a través de éstos pueden volverse a unir las cargas, con lo que tenemos un circuito eléctrico (fig. 1-43).

En este caso disminuye la diferencia de cargas y también la tensión, con lo que en la fuente de tensión vuelven a preponderar las fuerzas separadoras, que separan nuevas cargas. Rápidamente se recupera el estado original.

Por los conductores y por la bombilla circulan cargas (electrones). Como en la fuente se produce simultáneamente una separación de cargas, los electrones

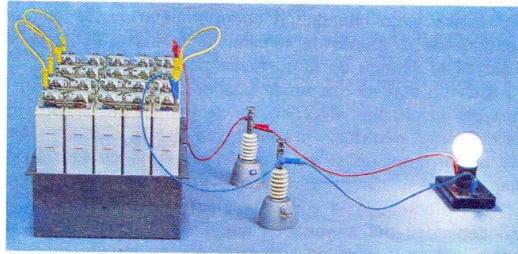


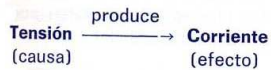
Fig. 1.43. Circuito eléctrico.

también circulan por el interior de la fuente. Por tanto, existe un flujo cerrado de cargas. El movimiento de las cargas es la corriente eléctrica.

La corriente eléctrica no se debe sólo al movimiento de cargas negativas, sino también al de cargas positivas (por ejemplo, en líquidos). Lo único importante es que las cargas se muevan en un determinado sentido.

La corriente eléctrica es el movimiento ordenado de cargas.

La compensación de la diferencia de cargas sólo puede efectuarse cuando existe una tensión. Por tanto la relación entre tensión y corriente es la misma que entre causa y efecto.



La tensión es la causa de la corriente.

Los electrones se mueven en los conductores con una velocidad muy pequeña, que sólo vale unos pocos milímetros por minuto.

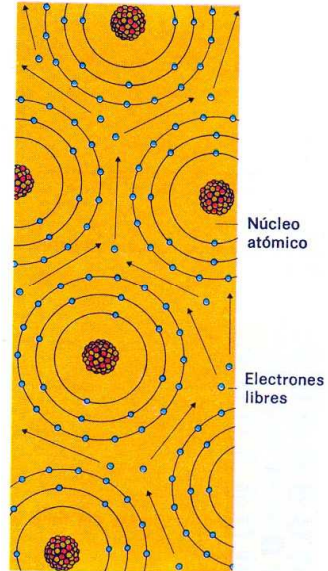


Fig. 1.44. Movimiento de los electrones entre los núcleos atómicos.

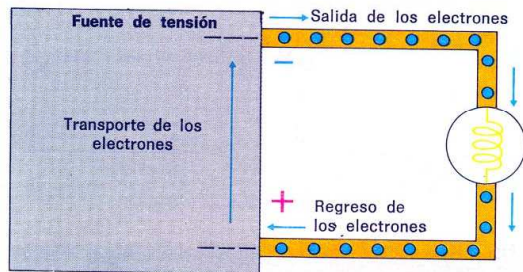


Fig. 1.45. Representación simbólica del flujo de los electrones en un circuito eléctrico.

La causa de ello son los núcleos atómicos inmóviles, que son obstáculos para los electrones. Éstos deben moverse efectuando una especie de zigzag para rodearlos.

Sin embargo, después de conectar, por ejemplo, una bombilla, ésta se enciende inmediatamente, por tanto, el efecto de la corriente también se presenta de inmediato.

La fuente de tensión provoca en el polo negativo una repulsión sobre los electrones libres, y en el polo positivo una atracción que se propagan inmediatamente por todo el circuito eléctrico (ver fig. 1.46).

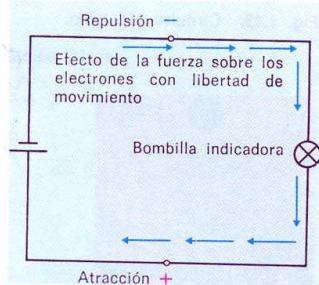


Fig. 1.46. Propagación de la presión y la aspiración en un circuito eléctrico.

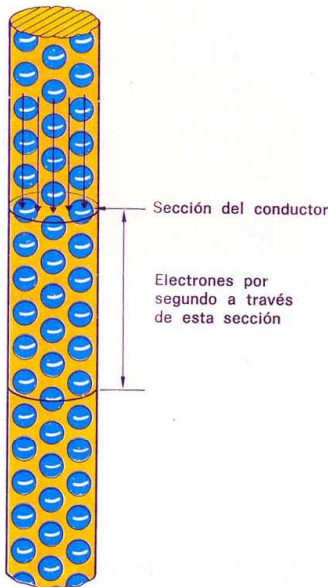


Fig. 1.48. Representación simbólica de la intensidad de la corriente.

**Intensidad de corriente**

Símbolo  $I$

Símbolo de la unidad A

$$I = \frac{Q}{t}$$

Hemos visto que en un circuito eléctrico los electrones se mueven en el exterior de la fuente de tensión de N(-) a P(+), y en el interior, de P a N. Éste es el sentido de la corriente de electrones.

Cuando aún no se tenían conceptos claros sobre el movimiento de las cargas en un circuito eléctrico, ya se habían descubierto relaciones y efectos de la corriente eléctrica. Para las leyes físicas obtenidas se supuso que el sentido de la corriente en el exterior de la fuente de tensión era del polo positivo al negativo.

Los efectos de la corriente eléctrica (por ejemplo, la luz de una bombilla) no dependen del sentido en que se suponga ésta. Por ello, se ha conservado este sentido técnico de la corriente previamente fijado.

El sentido técnico de la corriente en el exterior de la fuente de tensión va del polo positivo al polo negativo.

En los esquemas de circuitos, el sentido de la corriente se indica mediante flechas, de modo similar a la tensión. La figura 1.47 muestra el sentido de la corriente en un circuito eléctrico fuera y dentro de la fuente de tensión.

**1.5.2. Intensidad de la corriente**

No sólo es importante saber si circula corriente y en qué sentido lo hace, sino también cuán intenso es el movimiento de las cargas.

Esto se puede entender muy fácilmente con un ejemplo. Imaginemos un conductor cortado según una sección y contemos los electrones que salen por segundo de esa sección. Es algo parecido a contar la intensidad del tráfico.

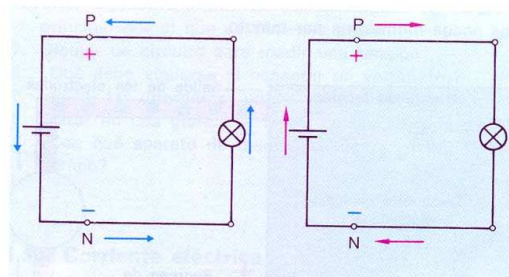


Fig. 1.47. Sentido de la corriente de electrones y sentido técnico de la corriente.

La intensidad de corriente eléctrica es la cantidad de carga que circula por segundo a través de una sección del conductor.

La unidad de intensidad de corriente eléctrica es el **ampere**.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> André-Marie Ampère, físico francés, 1775-1836.

Supongamos que el flujo de la corriente es constante con el tiempo. Si el tiempo en que contásemos fuera doble, también sería doble la cantidad de carga que atravesará, una sección determinada. Por tanto, para poder calcular la cantidad de carga por unidad de tiempo deberemos dividir la carga total por el tiempo en que contamos.

$$\text{Intensidad de corriente} = \frac{\text{Cantidad de carga}}{\text{Tiempo de circulación}}$$

Si de la ecuación despejamos la cantidad de carga  $Q$  obtendremos una ecuación para la determinación de  $Q$ .

**Carga es intensidad por tiempo**

$$1\text{ C} = 1\text{ A} \cdot 1\text{ s}$$

En la práctica se suele expresar la carga en ampere segundo en lugar de en coulomb.

**Cálculo del número de electrones de 1 A s**

Una corriente de un ampere circula durante un segundo por un conductor. ¿Cuántos electrones han atravesado una determinada sección si la carga de un electrón es  $1,6 \cdot 10^{-19}\text{ A s}$ ?

La intensidad  $I = 1\text{ A}$  circula cuando una carga de  $1\text{ A s}$  atraviesa una sección del conductor por segundo. Por tanto, la sección será atravesada por

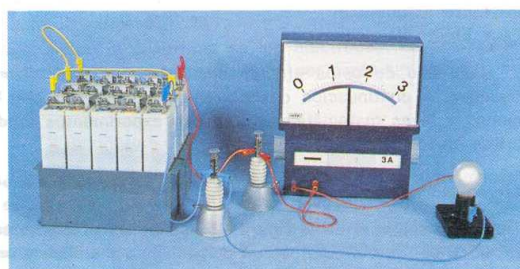
$$\frac{1\text{ A s}}{1,6 \cdot 10^{-19}\text{ A s}} = 0,625 \cdot 10^{19}\text{ electrones.}$$

La intensidad  $1\text{ A}$  equivale a la circulación de  $6,25 \cdot 10^{18}$  electrones por segundo.

Éste es un número extraordinariamente grande. Escritas todas las cifras resulta 6 250 000 000 000 000 000.

**Orden de magnitud de diferentes corrientes**

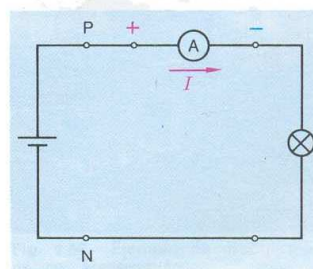
Fotómetro	aprox.	0,0001 A
Bombilla, 100 watt		0,45 A
Plancha eléctrica	aprox.	2 A
Tranvía	aprox.	50 A
Horno de fundición de aluminio	aprox.	15 000 A
Rayo	aprox.	100 000 A



**Amperímetro**



Fig. 1.49. Circuito para medir la intensidad de la corriente.



Unidad Operativa SENATI - Abancay



Fig. 1.50. Diferentes amperímetros.

### 1.5.3. Medida de la corriente

La corriente eléctrica es un movimiento ordenado de cargas, por ejemplo, en un conductor. Para poder medir este movimiento de cargas deben interrumpirse los conductores del circuito e intercalar el aparato de medida. La totalidad de la corriente debe circular por el aparato de medida (fig. 1.49).

Los instrumentos para medir la corriente eléctrica se llaman amperímetros. Los hay de diversos tipos, debiendo tenerse en cuenta sus diferentes propiedades. En algunos amperímetros la corriente sólo puede circular en un sentido (de + a -).

### 1.5.4. Tipos de corriente

La tensión es la causa de la corriente eléctrica. Cuando se aplica una tensión continua a un circuito circulará por éste una **corriente continua**. Las cargas se mueven en un solo sentido.

Cuando se aplican una tensión alterna o una mixta a un circuito eléctrico circularán por éste una **corriente alterna** o una **mixta**, respectivamente.

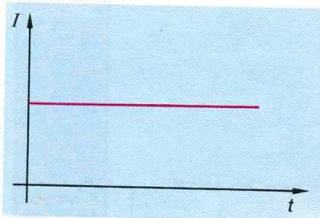


Fig. 1.51. Gráfica de una corriente continua.

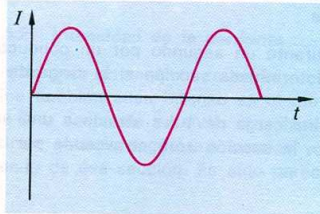


Fig. 1.52. Gráfica de una corriente alterna.

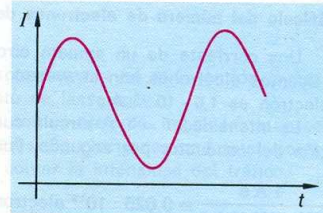


Fig. 1.53. Gráfica de una corriente mixta.

La corriente alterna varía su sentido periódicamente, con lo que los electrones se van moviendo alternativamente en uno y otro sentido.

### 1.5.5. Efectos de la corriente eléctrica

Pueden distinguirse los siguientes efectos:

- Efecto calorífico
- Efecto luminoso
- Efecto magnético
- Efecto químico
- Efecto fisiológico

Cada uno de estos efectos encuentra una gran diversidad de aplicaciones técnicas. A continuación describiremos algunos aparatos brevemente. Las relaciones y leyes matemáticas, junto con experimentos fundamentales, serán descritos en los apartados siguientes.

#### Efecto calorífico

En los aparatos de la figura 1.54 se utiliza el efecto calorífico de la corriente eléctrica, que circula por un delgado hilo metálico y provoca un calentamiento de éste.

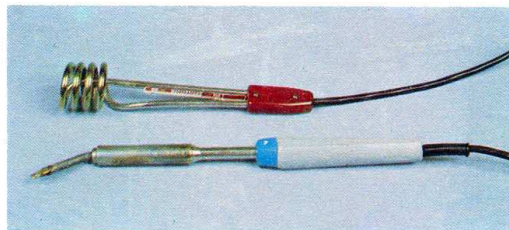


Figura 1.54. Ejemplos de efecto calorífico: calentador eléctrico sumergible y soldador.

#### Efecto luminoso

Cuando la intensidad de la corriente en el hilo metálico es suficientemente grande, aparece junto al efecto calorífico un efecto luminoso. Este fenómeno se utiliza en las bombillas.

Los gases también pueden conducir una corriente eléctrica en determinadas condiciones. En los tubos fluorescentes y en la lámpara de vapores de sodio se utiliza este efecto para la obtención de luz.

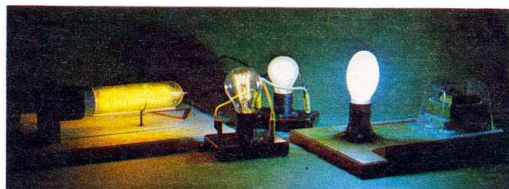


Fig. 1.55. Ejemplos de efecto luminoso. De izquierda a derecha: lámpara de vapor de sodio, lámpara de filamento de carbono, bombilla, lámpara de vapor de mercurio.

#### Efecto magnético

Todo conductor recorrido por una corriente crea a su alrededor un campo magnético. Este efecto puede aumentarse enrollando los conductores (bobinas). En el electroimán de la figura 1.56 se utiliza este fenómeno para atraer piezas de hierro.

#### Efecto químico

Cuando una corriente eléctrica circula por un líquido en el que hay sales disueltas (electrólito) lo descompone. De este modo pueden recuperarse los elementos que componen las sales que se encuentran en el líquido, pues se depositan sobre los electrodos (véase 13.2.2).

El depósito tiene lugar sobre la superficie de los electrodos. En determinadas condiciones puede producirse una adherencia, y por tanto un acabado de superficies (ver 13.2.4.1)

#### Efecto fisiológico

El efecto fisiológico de la corriente se presenta cuando circula a través del cuerpo humano o del de animales (ver 14.1.1), dando lugar a convulsiones de la musculatura. Aparte del efecto perjudicial, la corriente eléctrica puede tener un efecto curativo si se dosifica adecuadamente. En la medicina se trabaja con intensidades de corriente de algunos  $\mu\text{A}$ .

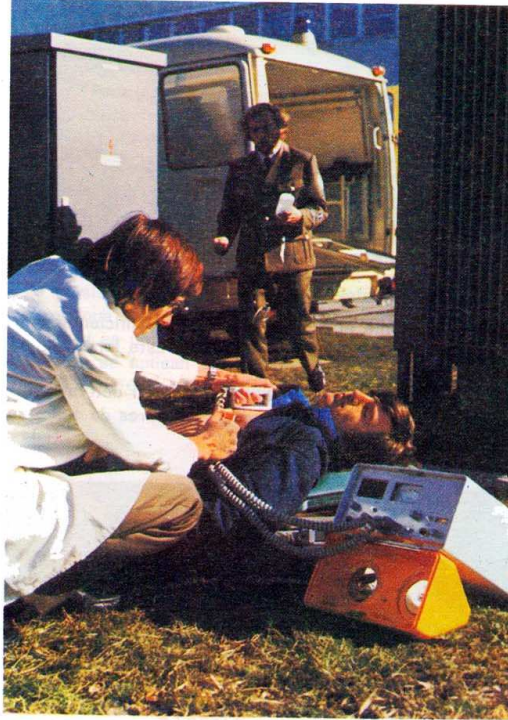
Unidad Operativa SENATI – Abanca



Fig. 1.56. Ejemplo de efecto magnético: electroimán.

Prof. Efraín Gómara Samanes





**Fig. 1.57.** Ejemplo de efecto fisiológico de la corriente eléctrica: electroshocks para la reanimación.

#### Ejercicios sobre 1.5

1. Enumerar las condiciones para que pueda circular una corriente eléctrica.
2. ¿Por qué se mantiene constante la tensión (diferencia de cargas) entre las bornas de una fuente de tensión aunque existe una circulación de electrones?
3. ¿Cuál es el sentido de la corriente eléctrica en el interior de una fuente de tensión?
4. ¿Qué es una corriente eléctrica?
5. Indicar la equivalencia entre corriente y tensión, y causa y efecto.
6. Indicar el sentido técnico de la corriente eléctrica y el sentido de la corriente de electrones.
7. Dibujar una fuente de tensión conectada a una bombilla. Indicar el sentido de la corriente de electrones.
8. ¿Cuál es el símbolo de la intensidad de corriente y cuál el de su unidad?
9. Expresar los valores siguientes en ampere: 3,6 mA; 25  $\mu$ A; 6,8 kA.
10. Expresar las siguientes intensidades sin potencias de diez:  $420 \cdot 10^{-6}$  A,  $95 \cdot 10^{-3}$ ,  $110 \cdot 10^3$  A.
11. ¿Cuál es el símbolo de la carga eléctrica y cuál el de su unidad?
12. Dibujar un circuito para medir la intensidad de la corriente.

## 2. Circuito eléctrico simple

### 2.1. Estructura de un circuito eléctrico

Un circuito eléctrico se compone de

- la fuente de tensión,
- los conductores y
- el receptor o carga.<sup>1</sup>

En la fuente de tensión se transforma energía en energía eléctrica, obteniéndose una tensión eléctrica.

En el receptor se transforma la energía eléctrica en la forma de energía deseada. Para ello se «recibe» energía eléctrica y se «produce» otra forma de energía. Por tanto, el receptor es un *convertidor de energía*. Esta conversión se realiza en el receptor mediante una oposición al movimiento de los electrones, que en el caso más sencillo puede determinarse mediante una magnitud eléctrica denominada resistencia eléctrica.

La resistencia eléctrica es la oposición que ejerce un material al paso de los electrones.

La unidad de resistencia eléctrica es el **ohm**.<sup>2</sup>

La resistencia eléctrica es, por tanto, una propiedad que tienen todos los receptores. En el capítulo 3 trataremos este comportamiento resistivo y veremos de qué magnitudes depende.

En la figura 2.1 hemos representado un circuito eléctrico completo con los símbolos correspondientes. Para mayor claridad hemos omitido los interruptores, fusibles y demás dispositivos de protección.

### 2.2. Ley de Ohm

A continuación vamos a explicar mediante un experimento la relación entre las magnitudes intensidad, tensión y resistencia en un circuito eléctrico, en el que la carga es simplemente un material conductor. Vamos a proceder inteligentemente, variando siempre una sola magnitud y dejando la otra constante.

En el circuito eléctrico considerado puede variarse o bien la tensión  $U$  o bien la resistencia  $R$ . La intensidad de la corriente  $I$  se ajustará según el valor de la tensión  $U$  y de la resistencia  $R$ .

<sup>1</sup> No confundir con el concepto de carga eléctrica.

<sup>2</sup> Georg Simon Ohm, físico alemán, 1787-1854.

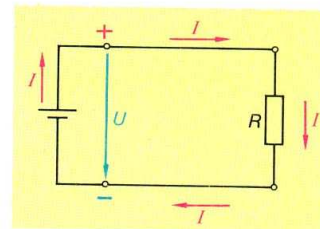


Fig. 2.1. Circuito eléctrico.

#### Resistencia eléctrica

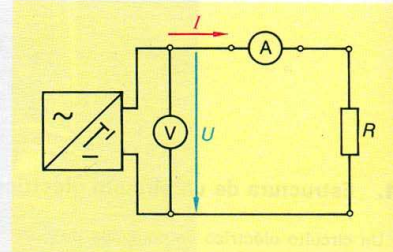
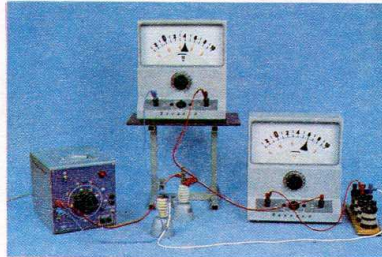
Símbolo  $R$

Símbolo de la unidad  $\Omega$



**Experimento 2-1:**  
**Variación de la intensidad de la corriente en función de la tensión con una resistencia constante**

**Montaje**



La fuente de tensión elegida es una fuente de alimentación que transforma la tensión de 220 V de la red en una tensión continua de salida menor que puede variarse de manera continua.

Para disponer de un valor de resistencia exacto utilizaremos una resistencia calibrada.

**Realización**

Manteniendo constante la resistencia  $R = 20 \Omega$  se va variando la tensión desde  $U = 0 \text{ V}$  hasta  $U = 10 \text{ V}$ . Se miden siempre la tensión  $U$  y la intensidad  $I$  correspondiente.

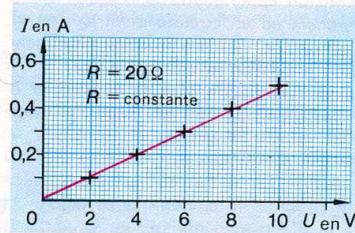
**Resultados**

N.º	$U$ en V	$I$ en A
1	0	0
2	2	0,1
3	4	0,2
4	6	0,3
5	8	0,4
6	10	0,5

$R = \text{constante}$   
 $R = 20 \Omega$

El experimento 2-1 muestra:

La intensidad de la corriente eléctrica  $I$  depende de la tensión. Si se mantiene constante la resistencia  $R$ , la intensidad  $I$  crece proporcionalmente a la tensión  $U$ .



**Fig. 2.2.** Variación de la intensidad con la tensión manteniendo constante la resistencia.

También podemos representar gráficamente el resultado del experimento. La causa de la variación de intensidad es la variación de tensión. Por ello representamos la intensidad en función de la tensión.

Al unir los puntos medidos en la figura 2-2 obtenemos una recta, lo que demuestra la proporcionalidad. Expresándolo matemáticamente:

$I$  es directamente proporcional a  $U$ .

$$I \sim U.$$

La proporcionalidad  $I \sim U$  puede expresarse también mediante una ecuación:  $I = k \cdot U$ . El valor de  $k$  puede calcularse para los diferentes puntos medidos.

Punto de medida n.º 2 ( $U = 2 \text{ V}$ ):

$$k = \frac{I}{U}$$

$$k = \frac{0,1 \text{ A}}{2 \text{ V}}$$

$$k = 0,05 \frac{\text{A}}{\text{V}}$$

Punto de medida n.º 5 ( $U = 8 \text{ V}$ ):

$$k = \frac{I}{U}$$

$$k = \frac{0,4 \text{ A}}{8 \text{ V}}$$

$$k = 0,05 \frac{\text{A}}{\text{V}}$$

En todos los puntos medidos se obtiene el mismo valor de  $k$ . Por tanto,  $k$  es una constante que indica el valor de la intensidad cuando la tensión vale  $U = 1 \text{ V}$ .

Esta magnitud sólo puede depender de la carga y se denomina conductancia eléctrica.

La unidad de conductancia eléctrica es el mho o Siemens.

La conductancia eléctrica indica la intensidad de corriente que circula por volt de tensión aplicada.

Cuanto mayor es la conductancia en un circuito eléctrico, mayor será la intensidad de la corriente.

En el experimento 2-1 la conductancia permaneció constante. Tampoco se varió la resistencia. Por tanto, debe existir una relación entre la resistencia y la conductancia.

La resistencia eléctrica de una carga indica la tensión necesaria para que circule una corriente de 1 A de intensidad.

En el experimento 2-1 circula una corriente de 0,5 A cuando la tensión es  $U = 10 \text{ V}$ .

Por tanto, la resistencia eléctrica vale

$$R = 20 \frac{\text{V}}{\text{A}} = 20 \Omega.$$

Leyendo cuidadosamente las dos definiciones y comparándolas (lo mismo puede hacerse con las unidades), se obtiene:

La conductancia es el inverso de la resistencia.

La resistencia  $R$  y con ella la conductancia  $G$  se mantienen constantes en el experimento 2-1. Al ir aumentando la tensión  $U$  va también creciendo la intensidad de la corriente  $I$ . En el experimento siguiente vamos a explicar cómo va-

### Fuente de alimentación eléctrica

Conversión de corriente alterna en continua



### Conductancia eléctrica

Símbolo  $G$

Símbolo de la unidad S o  $\Omega^{-1}$

$$1 \text{ S} = \frac{1 \text{ A}}{1 \text{ V}}$$

$$[G] = \frac{\text{A}}{\text{V}}$$

$$1 \Omega = \frac{1 \text{ V}}{1 \text{ A}}$$

$$[R] = \frac{\text{V}}{\text{A}}$$

### Conductancia Resistencia

$$G = \frac{1}{R}$$

$$R = \frac{1}{G}$$

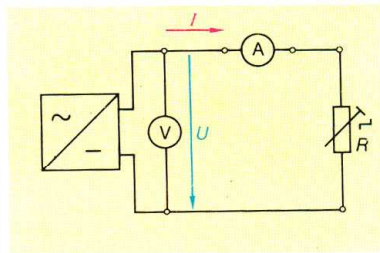
$$1 \text{ S} = \frac{1}{\Omega}$$

$$1 \Omega = \frac{1}{\text{S}}$$

ría la intensidad de la corriente cuando se mantiene constante la tensión y se varía la resistencia.

### Experimento 2-2: Variación de la intensidad en función de la resistencia con una tensión constante

#### Montaje



#### Realización

Manteniendo constante la tensión se va variando escalonadamente la resistencia desde  $R = 10 \Omega$  hasta  $R = 40 \Omega$ . Se mide la intensidad de la corriente  $I$  para cada valor de resistencia. El voltímetro sirve para controlar la tensión.

La fuente de tensión es una fuente de alimentación como en el experimento 2-1. La resistencia puede ajustarse a pasos.

#### Resultados de la medida

N.º	$R$ en $\Omega$	$I$ en A	N.º	$R$ en $\Omega$	$I$ en A
1	10	1	3	30	0,33
2	20	0,5	4	40	0,25

$U = \text{constante}$   
 $U = 10 \text{ V}$

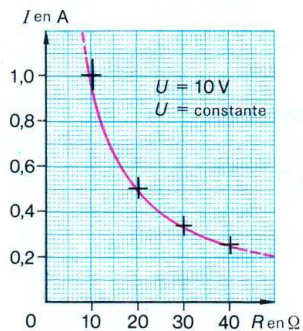


Fig. 2.3. Variación de la intensidad con la resistencia manteniendo constante la tensión.

El experimento 2-2 muestra:

Al aumentar la resistencia eléctrica  $R$  manteniendo constante la tensión  $U$  disminuye la intensidad  $I$  de la corriente.

También podemos representar gráficamente el resultado de este experimento. La causa de la variación de la intensidad es la variación de la resistencia, por lo cual representaremos en una gráfica la intensidad en función de la resistencia (fig. 2.3). La curva resultante es una hipérbola y representa una proporcionalidad inversa.

$I$  es inversamente proporcional a  $R$ :  $I \sim \frac{1}{R}$

En un circuito eléctrico cerrado la intensidad de la corriente depende de la tensión y de la resistencia.

#### Ley de Ohm

La intensidad de la corriente eléctrica  $I$  es directamente proporcional a la tensión  $U$  aplicada e inversamente proporcional a la resistencia  $R$ .

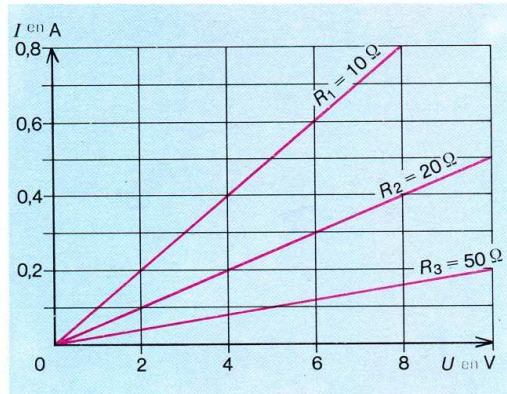


Fig. 2.4. Características de diferentes resistencias lineales.

En la figura 2.4 hemos representado la intensidad de la corriente en función de la tensión para diferentes valores de resistencia. Cuanto menor es la resistencia mayor es la pendiente de la recta.

#### Ejercicios sobre 2

- Calcular como en el experimento 2-1 los valores de la intensidad para las resistencias  $R_1 = 30 \Omega$  y  $R_2 = 10 \Omega$  y tenemos desde  $U = 0 \text{ V}$  hasta  $U = 20 \text{ V}$ .
  - Trazar las curvas en una nueva gráfica.
  - ¿A qué resistencia (a la mayor o a la menor) le corresponde la curva de mayor pendiente? Razonar la respuesta.
- ¿Cuánto vale la intensidad de la corriente que circula por una resistencia de  $15 \text{ k}\Omega$  a la que se aplican  $60 \text{ V}$ ?
- ¿Cuánto vale la resistencia por la que circula una corriente de  $9,1 \text{ A}$  cuando se le aplican  $220 \text{ V}$ ?
- ¿Cuánto vale la conductancia de una carga por la que circula una corriente de  $22,5 \text{ A}$  cuando se le aplica una tensión de  $500 \text{ V}$ ?
- ¿Cuál es la máxima tensión que se puede aplicar a una resistencia  $R = 2,2 \text{ k}\Omega$  si la máxima intensidad permisible es  $I = 50 \text{ mA}$ ?

#### Ley de Ohm

$$I = \frac{U}{R}$$

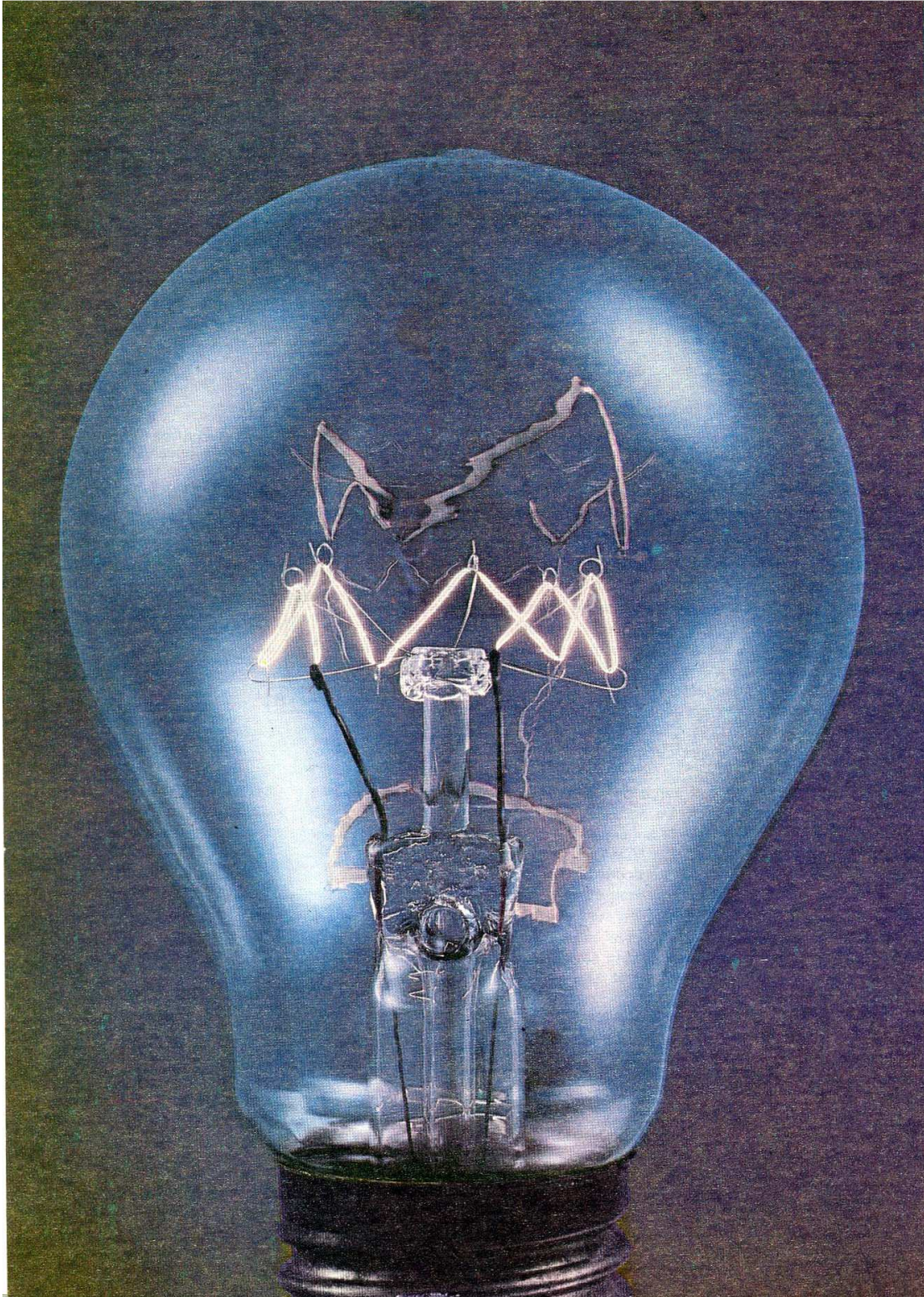
Transformaciones:

$$R = \frac{U}{I}$$

$$U = I \cdot R$$

Unidad Operativa SENATI — Abancay

Prof. Efraín Gamarrá Samané



### 3. Resistencia eléctrica

En el apartado 2.1 ya hemos denominado resistencia eléctrica a la propiedad de los materiales de presentar una determinada oposición al paso de la corriente eléctrica. No obstante, en dicho apartado no entramos en detalles de cómo puede explicarse este fenómeno y de qué factores depende. En el presente capítulo vamos a ocuparnos de estas dos cuestiones.

#### 3.1. Conducción de la corriente en metales

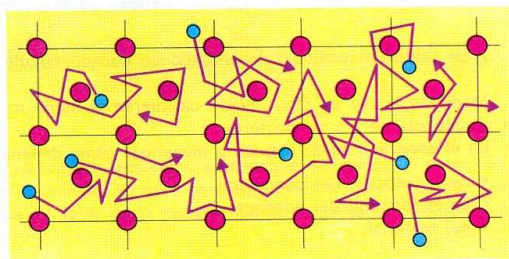
Por experiencia sabemos que los hilos se calientan cuando por ellos circula una corriente. En las cargas (por ejemplo, en una bombilla o los filamentos de caldeo) se desea obtener este efecto, pero no se desea en absoluto en los conductores de conexión. Ambos tienen en común el estar compuestos por metales. Por ello vamos a ocuparnos en primer lugar de la conducción de la corriente eléctrica en metales.

Los metales son buenos conductores de la corriente eléctrica. Como ésta es un movimiento ordenado de electrones, estas partículas elementales deben poseer un papel especial en los conductores.

Según el modelo atómico los electrones describen órbitas alrededor del núcleo. En los metales, los electrones de la capa exterior no están demasiado ligados, o sea, que pueden separarse fácilmente de su trayectoria. Como tampoco pueden moverse con absoluta libertad se les denomina **electrones cuasilibres**. Cuando han abandonado los átomos quedan éstos incompletos y cargados positivamente, pues les faltan electrones.

Cuando se solidifica un metal fundido, los núcleos atómicos se disponen ordenadamente en una red tridimensional regular.

Los electrones cuasilibres se mueven a través de esta red describiendo tra-



Unidad Operativa SEMATI – Abancar

Prof. Efraín Gamorra Samanez  
JEFE (e)

Fig. 3.1. Retículo metálico (representado simplemente en un plano).



Fig. 3.2. Traspaso de la energía de los electrones a los átomos.

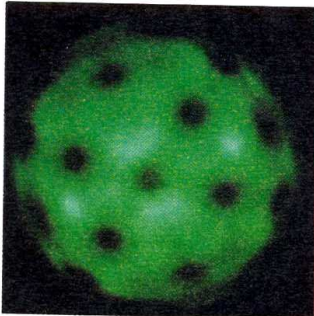


Fig. 3.3. Estructura del retículo metálico de una punta de wolframio. Fotografía efectuada con el microscopio de emisión de campo (ampliación 1:500 000).

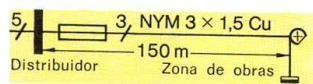


Fig. 3.4. Conexión de una iluminación de obras.

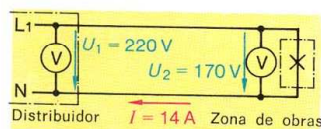


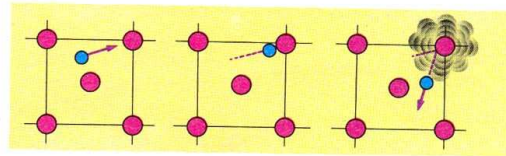
Fig. 3.5. Tensiones medidas en la instalación representada arriba.

#### Caída de tensión en líneas

Símbolo  $U_v$

$$U_v = U_1 - U_2$$

$$U_v = I \cdot R_L$$



yectorias desordenadas (movimientos en zigzag). Esta disposición de los átomos se denomina **enlace metálico** (fig. 3.1).

A pesar de que los electrones que se mueven son negativos, el metal aparece exteriormente como neutro, pues las cargas están repartidas regularmente como consecuencia de los núcleos atómicos positivos, y sus efectos se compensan.

Si ahora aplicamos una tensión, los electrones efectúan un movimiento adicional dirigido hacia el polo positivo. Por tanto, circula una corriente eléctrica.

El movimiento de los electrones en el conductor viene dificultado por los choques con los átomos. Esta propiedad se denomina **resistencia eléctrica**.

Al chocar los electrones ceden parte de su energía cinética a los átomos, con lo que éstos vibran más fuertemente, hecho que se manifiesta en un calentamiento (fig. 3.2).

### 3.2. Resistencia de conductores

Como introducción a este apartado vamos a dedicarnos a un problema de la experiencia práctica de un estudiante. Este estudiante debía conectar un alumbrado de obras en un gran terreno industrial. Para ello tendió unos 150 m de hilo de cobre con una sección de 1,5 mm<sup>2</sup>. Cuando conectó la instalación de alumbrado, la luz era más débil que normalmente. Para encontrar el fallo midió, a continuación, las tensiones al principio y al final de la línea de conexión con el alumbrado apagado. Ambos voltímetros marcaban 220 V.

Después volvió a conectar la iluminación, y la tensión en las bornas bajó a 170 V. Por tanto, debían «haberse perdido» 50 V en la línea de conexión. O dicho de otra manera, en la línea existía una **caída de tensión** de 50 V. La figura 3.5 muestra estos hechos.

Por tanto, cuando la carga está conectada se presentan en la línea tres tensiones:

- Tensión al principio de la línea  $U_1$
- Tensión al final de la línea  $U_2$
- Caída de tensión (pérdida de tensión)  $U_v$  igual a la diferencia entre  $U_1$  y  $U_2$

De los hechos del ejemplo puede sacarse ya una consecuencia importante:

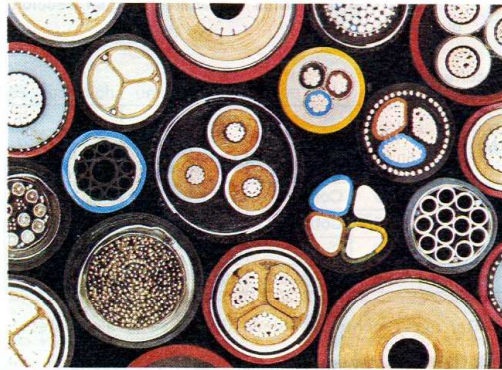
La caída de tensión sólo se produce cuando circula corriente.

Mediante la ley de Ohm puede calcularse la caída de tensión si se conoce la resistencia de los conductores.

En el experimento 3-1 vamos a investigar cómo depende la resistencia

- de la sección del conductor
- de la longitud del conductor
- del material.

La **sección del conductor** es la superficie que se obtiene cortando el conductor perpendicularmente a su eje longitudinal (fig. 3.6).



#### Sección de un conductor

Símbolo  $q$

$[q] = \text{m}^2$

$[q] = \text{mm}^2$

Fig. 3.6. Secciones de diferentes conductores.

Los símbolos  $S$  o  $A$  se utilizan para superficies, por lo que frecuentemente se caracteriza la sección transversal con  $q$ .

Las secciones de los conductores están normalizadas. Para cables de tendido fijo se utilizan por ejemplo las siguientes:

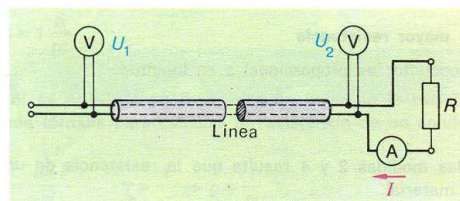
1,5 mm<sup>2</sup>; 2,5 mm<sup>2</sup>; 4 mm<sup>2</sup>; 6 mm<sup>2</sup>; 10 mm<sup>2</sup>.

Cuando se indica una longitud debe observarse exactamente si se nos da la longitud de los **conductores** o la longitud de la **línea**, pues las líneas para corriente continua y alterna comprenden el conductor de ida y el de vuelta.

#### Experimento 3-1:

Variación de la resistencia de un conductor con sus medidas y con el material

##### Montaje



##### Realización

No se mide directamente la resistencia, sino que se calcula a partir de los valores de intensidad y tensión. En este caso la tensión que se mide es la caída de tensión en la línea. El valor de la resistencia de carga carece de importancia en este experimento.

- Medidas con **diferentes secciones** a igual longitud de los conductores y con el mismo material.
- Medidas con **diferentes longitudes** a igual sección y con el mismo material.
- Medidas con **diferentes materiales** a igual sección y longitud de los conductores.

## Resultados

N.º	$l$ en m	$q$ en mm <sup>2</sup>	Material	$U_2$ en V	$U_v =$ $U_1 - U_2$ en V	$I$ en A	$R_L = \frac{U_v}{I}$ en $\Omega$
1	100	1,5	Cobre	202,6	17,4	14,6	1,19
2	100	2,5	Cobre	209,2	10,8	15,1	0,72
3	50	1,5	Cobre	210,9	9,1	15,2	0,6
4	100	2,5	Aluminio	202,3	17,7	14,6	1,21

$U_1 = \text{constante}$   
 $U_1 = 220 \text{ V}$

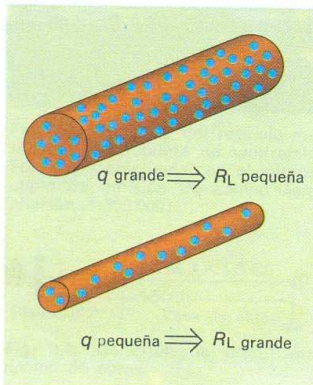


Fig. 3.7. Variación de la resistencia con la sección del conductor.

Del experimento 3-1 puede deducirse lo siguiente:

- De los valores de las medidas 1 y 2 resulta que una sección mayor implica una resistencia menor de los conductores.

Podemos imaginar que en un conductor de mayor sección existen más electrones con lo que, a tensión constante, circula una corriente más intensa, o sea, que la resistencia es menor.

Conductor de sección mayor  $\Rightarrow$  Resistencia menor

La resistencia de un conductor es inversamente proporcional a la sección de éste.

$$R_L \sim \frac{1}{q}$$

- De los valores de las medidas 1 y 3 resulta que un conductor más largo tiene una resistencia mayor.

Al respecto podemos imaginar que en un conductor largo es mayor la oposición al movimiento de los electrones como consecuencia del mayor camino a recorrer por éstos.

Conductores más largos  $\Rightarrow$  mayor resistencia

La resistencia de un conductor es proporcional a su longitud.

$$R_L \sim l$$

- De los resultados de las medidas 2 y 4 resulta que la resistencia de un conductor depende del material.

La dependencia de la resistencia con el material se denomina **resistividad** o resistencia eléctrica específica.

La resistividad es la resistencia de un conductor de 1 m de longitud y 1 m<sup>2</sup> de sección.

**Resistividad**  
Símbolo  $\rho$   
[ $\rho$ ] =  $\Omega\text{m}$

Dado que en la práctica no se utilizan nunca conductores de 1 m<sup>2</sup> de sección suele indicarse la sección en mm<sup>2</sup>. Esto llevó a que antiguamente se refiriera la resistividad a una sección de 1 mm<sup>2</sup>, con lo que la unidad de resistividad era:

$$[\rho] = \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$$

Para transformar valores con dicha unidad a  $\Omega \cdot \text{m}$  se debe realizar lo siguiente:

$$1 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}} = 1 \frac{\Omega \cdot (10^{-3} \text{ m})^2}{\text{m}}$$

$$1 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}} = 1 \frac{\Omega \cdot 10^{-6} \text{ m}^2}{\text{m}}$$

$$1 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}} = 10^{-6} \cdot \Omega \text{ m}$$

$$1 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}} = 1 \mu\Omega \text{ m}$$

Para poder conservar los valores numéricos de las unidades usadas anteriormente se indican los valores de las resistividades en  $\mu\Omega\text{m}$ . La tabla 3.1 muestra las resistividades de algunos materiales importantes.

Reuniendo todas las consecuencias del experimento 3-1 se llega a la siguiente conclusión:

La resistencia de un conductor es tanto mayor

- cuanto mayor es la resistividad
- cuanto mayor es su longitud
- cuanto menor es su sección.

En la electrotecnia suele emplearse también el inverso de la resistividad, denominada **conductividad eléctrica**  $\gamma$ .

La unidad de la conductividad se obtiene como sigue:

$$\gamma = \frac{1}{\rho}$$

$$[\gamma] = \frac{1}{\Omega \text{ m}} \quad \frac{1}{\Omega} = \text{S}$$

$$[\gamma] = 1 \frac{\text{S}}{\text{m}}$$

Si se utiliza la conductividad en lugar de la resistividad se llega a una segunda fórmula para calcular la resistencia de un conductor.

$$R_L = \frac{\rho \cdot l}{q} \quad \gamma = \frac{1}{\rho} \Rightarrow \rho = \frac{1}{\gamma}$$

$$R_L = \frac{\frac{1}{\gamma} \cdot l}{q}$$

$$R_L = \frac{l}{\gamma \cdot q}$$

#### Resistencia de un conductor

$$R_L = \frac{\rho \cdot l}{q}$$

#### Conductividad Símbolo $\gamma$

$$\gamma = \frac{1}{\rho}$$

$$[\gamma] = \frac{\text{S}}{\text{m}}$$

#### Resistencia de un conductor

$$R_L = \frac{l}{\gamma \cdot q}$$

**Tabla 3.1: Resistividad y conductividad eléctrica de materiales a 20° C**

Material	$\rho$ en $\mu\Omega\text{m}$	$\gamma$ en $\frac{\text{MS}}{\text{m}}$
Plata	0,016	62
Cobre	0,018	56
Oro	0,022	44
Aluminio	0,028	36
Zinc	0,06	16,7
Latón	0,07	14,3
Hierro	0,1	10
Platino	0,106	9,4
Estaño	0,11	9,1
Plomo	0,208	4,8
Carbón	66.667	0,015

Con ello la resistencia de los conductores del problema del principio de este apartado es:

$$R_L = \frac{l}{\gamma \cdot q}$$

$$R_L = \frac{300 \text{ m}}{56 \cdot 10^6 \frac{\text{S}}{\text{m}} \cdot 15 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2}$$

$$R_L = 3,57 \Omega$$

Ahora podemos calcular la caída de tensión:

$$U_v = I \cdot R_L$$

$$U_v = 14 \text{ A} \cdot 3,57 \Omega$$

$$U_v = 50 \text{ V}$$

Para que la iluminación funcione sin problemas debe ser mucho menor la resistencia de los conductores (con lo que también será menor la caída de tensión). Para una longitud dada esto sólo es posible con una sección mayor.

**Caída de tensión para una longitud dada**  
 gran sección  
 ↓  
 pequeña resistencia  
 ↓  
 pequeña caída de tensión  
 ↓  
 gran tensión al final de la línea

#### Ejercicios sobre 3.1 y 3.2

1. Explicar la estructura atómica de los metales.
2. ¿Qué se entiende por un enlace metálico?
3. ¿Cuál es la causa de la buena conductividad eléctrica de los metales?
4. Una resistencia de precisión está compuesta de manganina ( $\rho = 0,43 \mu\Omega\text{m}$ ). El hilo utilizado mide 29 m y tiene una sección de  $0,5 \text{ mm}^2$ . ¿Cuál es la resistencia?
5. ¿Cuánto vale la resistencia de una línea de cobre de un hilo con una longitud de 1 km y una sección de  $35 \text{ mm}^2$ ?
6. Una línea defectuosa debe sustituirse por otra. Como en el almacén no se encuentra material del mismo tipo, se coloca una línea con una conductividad 1,5 veces mayor. ¿Qué consecuencias tiene esto sobre la sección si la resistencia ha de ser la misma?
7. Una resistencia de caldeo ( $\rho = 1,45 \mu\Omega\text{m}$ ) debe valer 24  $\Omega$ . ¿Qué longitud debe tener el hilo si la sección es  $1,2 \text{ mm}^2$ ?

8. Una línea de aluminio ha de sustuirse por una de cobre. La resistencia ha de ser la misma. ¿Qué sección ha de tener la línea de cobre si la de aluminio tenía una sección de 50 mm<sup>2</sup>?

### 3.3. Variación de la resistencia con la temperatura

Mediante un sencillo experimento (fig. 3.8) podemos demostrar que la resistencia de un hilo crece al aumentar la temperatura. Del montaje de la figura 3.9, al circular una corriente menor a la misma tensión, podemos deducir que existe una resistencia mayor.

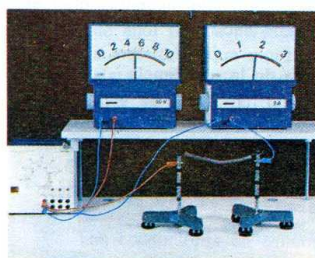


Fig. 3.8. No hay calentamiento con el mechero Bunsen, el hilo está aproximadamente a 20° C; 1,8 A.

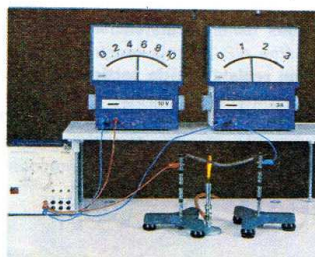


Fig. 3.9. Calentamiento con un mechero Bunsen, aprox. 1,3 A.

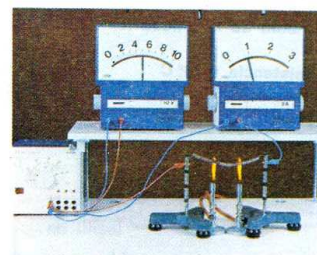


Fig. 3.10. Calentamiento con dos mecheros Bunsen, aprox. 0,9 A.

Para explicar este fenómeno debemos ocuparnos nuevamente de la explicación de la forma de energía llamada calor. El calor es el movimiento de las moléculas o de los átomos. Cuanto más caliente está un material, tanto más intenso es el movimiento de las moléculas, es decir, tanto más enérgicamente vibran alrededor de sus puestos en la red del cristal.

Con ello aumenta la posibilidad de un choque de los electrones cuasilibres con los núcleos atómicos o con los electrones ligados. Por tanto, al aumentar la oposición a la circulación de los electrones aumenta la resistencia (fig. 3.11).

Además de los metales también existen otros materiales que muestran este comportamiento. Como en estado «frío» conducen mejor que en «caliente», se les denomina **conductores en frío**.

Los conductores en frío son materiales que conducen mejor en frío que en caliente.

Si se enfriaran los materiales hasta el cero absoluto (0 K = -273,15° C) su resistencia sería nula. Esta propiedad se llama **superconductividad** y los conductores a muy bajas temperaturas, superconductores. Los superconductores pueden soportar corrientes de gran intensidad incluso con pequeñas secciones.

Al igual que las vibraciones de los núcleos atómicos influyen sobre el movimiento de los electrones cuasilibres, también ocurre al contrario. Los electrones cuasilibres, con sus choques contra los electrones de las órbitas de los átomos, provocan que estos electrones ligados vibren más fuertemente, lo que se manifiesta por un aumento de la temperatura. Esta propiedad se utiliza en los aparatos de calentamiento eléctrico.

Conductor en frío  
no lineal



El calentamiento debido a la corriente que circula se denomina **calentamiento propio**, mientras que el **calentamiento indirecto** es debido a una influencia externa.

Cuando en el experimento (fig. 3.10) aumentamos el calentamiento del hilo resistivo, la corriente vuelve a decrecer aún más, o sea, que la resistencia aumenta.

**Variación de la resistencia**  
Símbolo  $\Delta R$

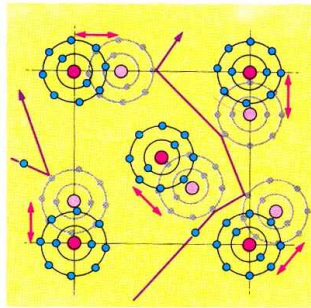
**Variación de la temperatura**  
Símbolo  $\Delta T$  ( $\Delta \theta$ )  
Símbolo de la unidad K

**Resistencia a 20° C**  
Símbolo  $R_{20}$

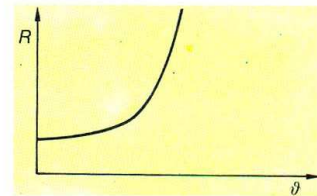
**Gran variación de temperatura  $\Rightarrow$  gran variación de la resistencia**  
 $\Delta R \sim \Delta T$

Si en el experimento (figs. 3.8 y 3.10) se hubieran utilizado bobinas resistivas de diferentes longitudes también se habrían obtenido aumentos grandes y pequeños de las resistencias. Por tanto, podemos decir:

**Gran resistencia de partida  $\Rightarrow$  gran variación de la resistencia**



**Fig. 3.11.** Aumento de la resistencia al aumentar la vibración de los átomos cuando se calientan.



**Fig. 3.12.** Característica de un conductor en frío.

Como los diversos materiales tienen diferentes estructuras cristalinas, los aumentos de la resistencia eléctrica al variar la temperatura también serán diferentes. El valor que da información sobre la variación de la resistencia de un determinado material se llama **coeficiente de temperatura  $\alpha$** . Se refiere a una resistencia de 1  $\Omega$  y una variación de temperatura de 1 K. La variación de temperatura se indica siempre en K (también en las variaciones de temperaturas en  $^{\circ}\text{C}$ ).

El coeficiente de temperatura es la variación de la resistencia de un conductor de 1  $\Omega$  debida a una variación de temperatura de 1 K.

**Coeficiente de temperatura**  
Símbolo  $\alpha$

$$[\alpha] = \frac{1}{\text{K}}$$

**Variación de la resistencia al variar la temperatura**

$$\Delta R = R_{20} \cdot \Delta T \cdot \alpha$$

Recopilando lo anterior resulta:

La variación de resistencia es tanto mayor

- cuanto mayor es la resistencia
- cuanto mayor es la variación de la temperatura
- cuanto mayor es el coeficiente de temperatura.

**Tabla 3.2: Coeficientes de temperatura de materiales a una temperatura de partida de 20° C**

Materiales	Hierro	Estaño	Plomo	Zinc	Oro	Platino
$\alpha$ en $\frac{1}{K}$	0,005	0,0046	0,0042	0,0042	0,004	0,004
Materiales	Plata	Cobre	Aluminio	Latón	Constantán	Carbón
$\alpha$ en $\frac{1}{K}$	0,004	0,0039	0,0036	0,0015	0,00004	-0,00045

Hasta aquí hemos investigado lo que ocurre con los metales. Existen otros muchos materiales que muestran un comportamiento similar. Sin embargo, también existen otra serie de materiales (por ejemplo, el carbón, los semiconductores) que se comportan precisamente al revés, pues su resistencia **disminuye** al aumentar la temperatura. Una explicación de este fenómeno requiere no obstante conocimientos que se salen del margen de esta obra.

Estas sustancias se denominan conductores en caliente o **termistores**, y su coeficiente de temperatura es negativo.

Los conductores en caliente son materiales que conducen mejor en caliente que en frío.

#### Comparación entre conductores en frío y en caliente

##### Conductores en frío

- conducen mejor en frío
- tienen un coeficiente de temperatura positivo
- también se llaman resistencia **CTP** (coeficiente de temperatura positivo)

##### Conductores en caliente

- conducen mejor en caliente
- tienen un coeficiente de temperatura negativo
- también se llaman resistencias **CTN** (coeficiente de temperatura negativo)

El significado de las dos flechas del esquema puede recordarse fácilmente sabiendo que

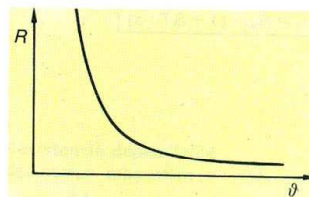
- las variaciones de temperatura y resistencia son del mismo signo  
↑↑
- las variaciones de temperatura y resistencia son de distinto signo  
↑↓

En algunos componentes especiales se emplean ambas propiedades para regular. En estos casos se utilizan materiales que presenten una dependencia **alineal** entre la temperatura y la resistencia para poder provocar una conmutación a determinadas temperaturas.

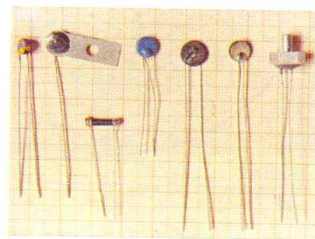
Combinando materiales CTP y CTN se obtienen materiales resistivos con coeficientes de temperatura extraordinariamente pequeños, de tal modo que el valor de la resistencia prácticamente no varíe. La tabla 3.2 contiene los coeficientes de temperatura de algunos materiales de gran importancia en la técnica.

Vamos a aclarar ahora los efectos de un pequeño aumento de la resistencia tomando como ejemplo el material CuNi45Mn1, también conocido como constantán.

#### Termistor no lineal



**Fig. 3.13.** Característica de un termistor.



**Fig. 3.14.** Resistencias dependientes de la temperatura (termistores).

Unidad Operativa SENATI - Abancay



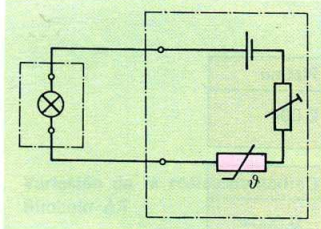


Fig. 3.15. Circuito para controlar la temperatura de una batería.

### Resistencia después del calentamiento

Símbolo  $R_T$

$$R_T = R_{20} + \Delta R$$

$$R_T = R_{20} \cdot (1 + \Delta T \cdot \alpha)$$

Supongamos que debemos fabricar una resistencia de constantán con un valor de  $1 \text{ k}\Omega$ , y que al utilizarla va a trabajar a temperaturas de hasta  $200^\circ \text{C}$ . ¿Cuánto vale el incremento de la resistencia?

$$\begin{aligned} R_{20} &= 1 \text{ k}\Omega \\ \vartheta_1 &= 20^\circ \text{C} \\ \vartheta_2 &= 200^\circ \text{C} \end{aligned} \Rightarrow \begin{aligned} \Delta T &= \Delta \vartheta = \vartheta_2 - \vartheta_1 \\ \Delta T &= \Delta \vartheta = 180 \text{ K} \end{aligned}$$

$$\alpha = 0,00004 \frac{1}{\text{K}}$$

$$\Delta R = R_{20} \cdot \Delta T \cdot \alpha$$

$$\Delta R = 1000 \Omega \cdot 180 \text{ K} \cdot 0,00004 \frac{1}{\text{K}}$$

$$\Delta R = 7,2 \Omega$$

Por lo tanto, el valor de la resistencia  $R_T$  después del calentamiento será:

$$R_T = R_{20} + \Delta R$$

$$R_T = 1000 \Omega + 7,2 \Omega$$

$$R_T = 1007,2 \Omega$$

El valor de la resistencia ha aumentado despreciablemente (sólo un 0,72 %). Este aumento está muy por debajo de las tolerancias usuales del 5 % o del 10 % (series IEC 24 y 12, respectivamente, ver 3.5).

Si no conocemos la variación de la resistencia sino la variación de la temperatura, podemos calcular  $R_T$  de la siguiente manera:

$$R_T = R_{20} + \Delta R$$

$$R_T = R_{20} + R_{20} \cdot \Delta T \cdot \alpha$$

$$R_T = R_{20} \cdot (1 + \Delta T \cdot \alpha)$$

$$\Delta R = R_{20} \cdot \Delta T \cdot \alpha$$

### Ejercicios sobre 3.3

- El devando de cobre de un motor presenta una resistencia de  $1,2 \Omega$  a la temperatura ambiente. ¿Cuánto vale la resistencia cuando el motor está caliente ( $80^\circ \text{C}$ )?
- Una línea aérea de aluminio presenta a  $28^\circ \text{C}$  una resistencia de  $1,86 \Omega$ .
  - ¿Cuánto vale la resistencia a  $20^\circ \text{C}$ ?
  - ¿Cuánto vale la resistencia a  $-20^\circ \text{C}$ ?
- Los termómetros de resistencia eléctrica se utilizan también para efectuar medidas eléctricas de la temperatura. Fundamentalmente se componen, por ejemplo, de una resistencia de platino cuya variación de resistencia con la temperatura sirve para medir ésta. La resistencia a  $20^\circ \text{C}$  vale  $105 \Omega$ . ¿A qué temperatura tiene un valor de  $136 \Omega$ ?
- Explicar por qué en las proximidades del cero absoluto los conductores apenas presentan resistencia.
- ¿En qué se diferencian las resistencias CTP de las CTN cuando varía su resistencia al aumentar la temperatura?
- ¿Qué restricciones deben hacerse al calcular la resistencia de un conductor según lo indicado en 3.2?
- Una resistencia CTN con  $\alpha = -0,04 \text{ 1/K}$  vale  $182 \Omega$  a  $-20^\circ \text{C}$ . ¿Qué valor presenta a  $+20^\circ \text{C}$ ?

### 3.4. Variación de la resistencia con la tensión, el campo magnético, la luz y la presión

Se fabrican también resistencias que responden especialmente a la tensión al campo magnético, a la luz o a la presión variando así su valor.

El comportamiento de los diferentes materiales sólo se tratará brevemente, sin entrar en detalles. La explicación de los fenómenos queda reservada en la mayoría de los casos a libros más especializados.

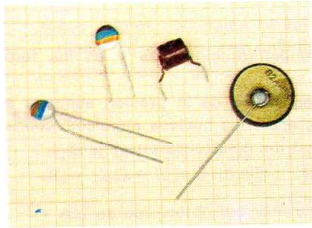


Fig. 3.16. Varistores.

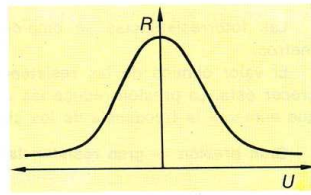


Fig. 3.17. Característica de un varistor.

Las resistencias dependientes de la tensión se denominan también **varistores** o **VDR** (voltage dependent resistor). El valor de su resistencia disminuye al aumentar la tensión (fig. 3.17). Podemos dar una explicación simplificada de este comportamiento imaginando que estos componentes están constituidos por multitud de pequeños gránulos, que forman una complicada red de pequeñísimas resistencias. Una tensión aplicada a sus bornes varía las resistencias de paso entre estos granos, y el material conduce mejor.

**Tensión grande  $\Rightarrow$  resistencia pequeña**

Ejemplos de aplicación: eliminación de chispas, protección contra sobretensiones, estabilización de tensión.

Las **resistencias dependientes del campo magnético** se llaman también **placas de campo**. Al aumentar la inducción magnética (ver 12.1.4) crece también la resistencia (figura 3.19). Este comportamiento puede explicarse mediante el

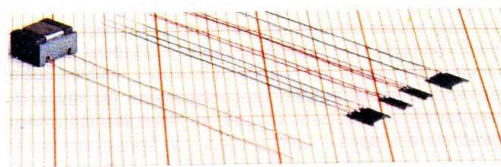


Fig. 3.18. Placa de campo.

efecto de un campo magnético sobre los electrones (ver 12.3). El campo magnético empuja hacia un lado a los electrones en su trayectoria a través de la resistencia, con lo que recorren un camino más largo que cuando no había campo magnético. Como un camino más largo se traduce en un conductor de mayor longitud, la resistencia también aumenta.

**Resistencia dependiente de la tensión**



**Resistencia dependiente del campo magnético**

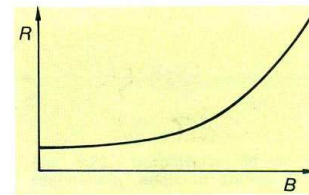


Fig. 3.19. Característica de una placa de campo.

Unidad Operativa SCNATI — Abancay

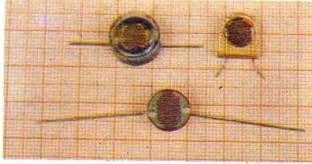


Fig. 3.20. Fotorresistencias.

Resistencia dependiente  
de la luz



Resistencias dependientes  
de la presión



**Gran inducción magnética  $\Rightarrow$  gran resistencia**

Las placas de campo se utilizan como conmutadores sin contactos y para medir campos magnéticos.

Las **resistencias dependientes de la luz** se llaman también **fotorresistencias** o **LDR** (light dependent resistor). El valor de su resistencia decrece al aumentar la iluminación. Este comportamiento puede explicarse como sigue:

La energía de la luz libera electrones en el material que se suman a los electrones de conducción ya existentes.

**Gran iluminación  $\Rightarrow$  pequeña resistencia**

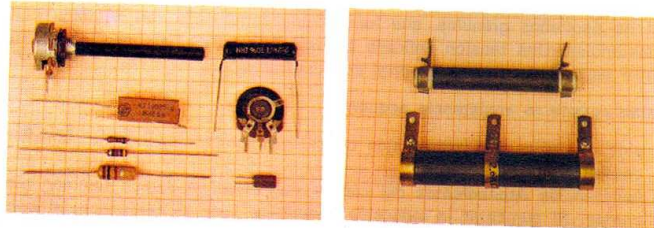
Las fotorresistencias se emplean en células fotoeléctricas y en los fotómetros.

El valor óhmico de las **resistencias dependientes de la presión** aumenta al crecer ésta. La presión reduce las distancias entre los núcleos atómicos, con lo que aumenta la frecuencia de los choques con los electrones cuasilibres.

**Gran presión  $\Rightarrow$  gran resistencia**

### 3.5. Características y formas de las resistencias

Cuando hablamos de resistencia eléctrica podemos referirnos bien a una propiedad de un material o también a un componente. En este apartado vamos a dedicarnos al **componente** llamado resistencia (figs. 3.21 y 3.22).



Figs. 3.21 y 3.22.  
Diferente formas de resistencias.

Es posible que al comparar resistencias ya se hayan sorprendido de que en las listas se encontraban valores como, por ejemplo, 27  $\Omega$ , 33  $\Omega$ , 56  $\Omega$ . El único número «redondo» que se encuentra es 10  $\Omega$ , pero no 20  $\Omega$ , etc. En este apartado vamos a explicar el porqué de todo esto y también cuáles son las demás características importantes de los componentes resistivos. Además discutiremos la caracterización mediante colores en lugar de mediante cifras, y hablaremos de los diferentes tipos.

**¿Cuáles son las características importantes de una resistencia?**

- El valor nominal de la resistencia.
- La tolerancia de este valor.
- La carga permisible del componente.

Además existe una serie de otras características que pueden ser importantes en determinados casos, como por ejemplo la temperatura máxima, el envejecimiento, el ruido propio, etc.

**Valor nominal de la resistencia y su tolerancia**

Las separaciones entre los diferentes valores nominales dependen de la tolerancia y pueden calcularse según la IEC<sup>1</sup> de la siguiente manera:

- Se determinó el número de valores por década para una determinada serie.

Por ejemplo:

E6 = 6 valores entre 1 y 10

E12 = 12 valores entre 1 y 10

E24 = 24 valores entre 1 y 10

- Los valores nominales se calcularon de manera que los márgenes de tolerancia de dos valores colindantes den unos solapamientos mínimos pero cubran toda la gama.

**Ejemplo:**

$$R_1 = 10 \Omega \pm 10\% = 9 \Omega \dots 11 \Omega$$

$$R_2 = 12 \Omega \pm 10\% = 10,8 \Omega \dots 13,2 \Omega$$

- Así se obtuvieron los valores normalizados IEC. Las series E6 con una tolerancia de  $\pm 20\%$ , E12 con una tolerancia de  $\pm 10\%$ , y E24 con una tolerancia de  $\pm 5\%$  son las más corrientes.

- En cada década (potencia de diez) sólo se encuentran los valores de las series IEC a fin de que el número de valores resistivos a fabricar sea limitado.

Ahora ya podemos caracterizar los valores nominales de las resistencias mediante tres datos:

**Número IEC · número de década (potencia de diez) ·  $\Omega$**

Ejemplo:  $3,3 \cdot 10^5 \cdot \Omega = 330 \text{ k}\Omega$ .

En lugar de las cifras suelen emplearse colores. Sobre los cuerpos de las resistencias suelen encontrarse anillos de colores, pero también pueden ser simples rayas o puntos. Para que el sentido de lectura quede claramente determinado, los anillos están agrupados hacia un extremo del cuerpo de la resistencia. Empezando por ese extremo, el primer anillo representa las unidades del valor de la resistencia; el segundo las decenas y el tercero el número por el que está multiplicado el valor compuesto por las dos primeras cifras. Un cuarto anillo de oro o plata representa, respectivamente, una tolerancia de  $\pm 5\%$  ó  $\pm 10\%$ . Si no hay cuarto anillo, es indicación de una tolerancia de  $\pm 20\%$  (ver tabla 3.4).

Otro modo de caracterizar las resistencias es mediante letras y cifras. Este sistema puede verse en la tabla 3.5.

En las resistencias caracterizadas con cinco anillos (o rayas o puntos) de color los tres primeros representan las cifras del valor resistivo. Los otros dos anillos tienen el mismo significado que en el código con cuatro anillos de color.

**Carga permisible de los componentes resistivos**

La corriente eléctrica calienta las resistencias. Un calentamiento excesivo provocaría un empeoramiento de las características físicas y tecnológicas. Por

<sup>1</sup> International Electrotechnical Commission.

Tabla 3.3. Serie IEC

E 6 $\pm 20\%$	E 12 $\pm 10\%$	E 24 $\pm 5\%$
1,0	1,0	1,0
		1,1
	1,2	1,2
		1,3
1,5	1,5	1,5
		1,6
	1,8	1,8
		2,0
2,2	2,2	2,2
		2,4
	2,7	2,7
		3,0
3,3	3,3	3,3
		3,6
	3,9	3,9
		4,3
4,7	4,7	4,7
		5,1
	5,6	5,6
		6,2
6,8	6,8	6,8
		7,5
	8,2	8,2
		9,1

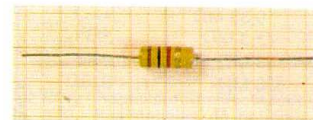


Fig. 3.23. Caracterización de una resistencia mediante anillos de colores.

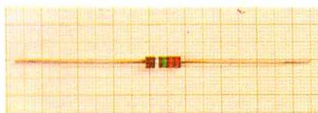


Fig. 3.24. Resistencia con alambres de conexión gruesos.

Tabla 3.4: Código de colores de resistencia

Década (potencia de diez)  
Número IEC      Tolerancia

Color	Resistencia en $\Omega$			Tolerancia
	1.ª cifra	2.ª cifra	3.ª cifra	
Ninguno	—	—	—	$\pm 20\%$
Plata	—	—	$10^{-2}$	$\pm 10\%$
Oro	—	—	$10^{-1}$	$\pm 5\%$
Negro	—	0	$10^0 = 1$	—
Marrón	1	1	$10^1$	$\pm 1\%$
Rojo	2	2	$10^2$	$\pm 2\%$
Naranja	3	3	$10^3$	—
Amarillo	4	4	$10^4$	—
Verde	5	5	$10^5$	$\pm 0,5\%$
Azul	6	6	$10^6$	—
Violeta	7	7	$10^7$	—
Gris	8	8	$10^8$	—
Blanco	9	9	$10^9$	—

Tabla 3.5: Código de resistencia mediante letras y cifras

Resistencia	Código
0,33 $\Omega$	R33
3,3 $\Omega$	3R3
33 $\Omega$	33R
330 $\Omega$	330R
0,33 k $\Omega$	K33
3,3 k $\Omega$	3K3
33 k $\Omega$	33K
330 k $\Omega$	330K
0,33 M $\Omega$	M33
3,3 M $\Omega$	3M3
33 M $\Omega$	33M
330 M $\Omega$	330M

ello se ha de procurar que el calor sea cedido al medio ambiente.

Esto puede conseguirse, por ejemplo, aumentando la superficie de la resistencia manteniendo constante su sección, pero también construyendo la resistencia con hilos terminales más gruesos (fig. 3.24). Sin embargo, también estos dos métodos tienen sus limitaciones, y entonces debe recurrirse a limitar la potencia disipada en la resistencia.

La carga permisible de una determinada resistencia es, pues, la máxima potencia que puede disipar esta resistencia sin que empeore su función. La carga permisible disminuye al aumentar la temperatura ambiente, pues la cesión de calor depende siempre de la diferencia de temperatura entre la superficie de la resistencia y el medio ambiente.

Los valores de las potencias nominales permisibles están normalizados; para componentes pequeños se encuentran entre 50 mW y 500 mW, mientras que las resistencias bobinadas pueden soportar 100 W y más.

Por ello los fabricantes de resistencias suelen indicar, junto al valor resistivo nominal, la carga permisible para temperatura ambiente de 40° C y 70° C.

#### Tipos de componentes resistivos

En los párrafos anteriores explicamos que existen resistencias con valores nominales fijos y otras en los que se varía intencionadamente su valor. Al primer grupo de resistencias las llamaremos **resistencias fijas** y al segundo, **resistencias variables**. Entre estas últimas también se encuentran aquellos componentes resistivos en los que puede ajustarse un determinado valor resistivo con ayuda de un cursor. Estos componentes se denominan **potenciómetros**.

#### Potenciómetro



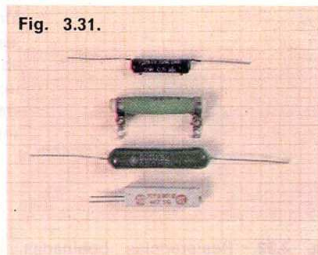
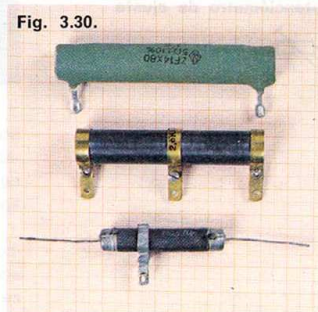
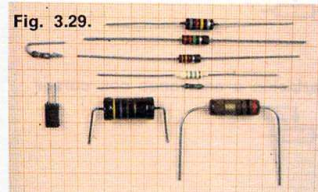
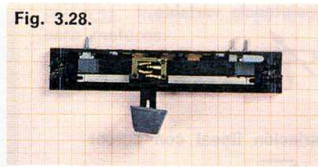
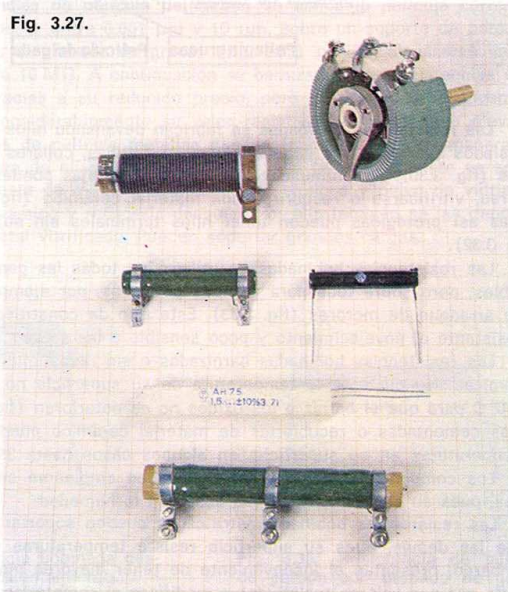
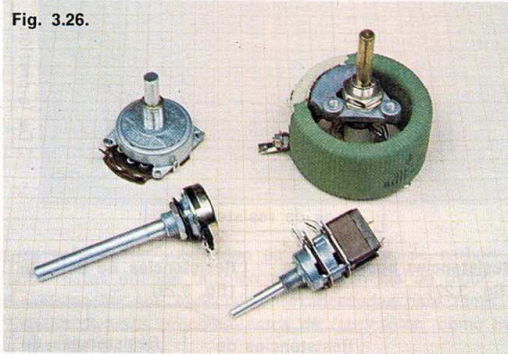
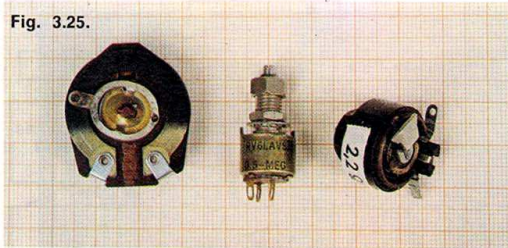


Fig. 3.25.

Fig. 3.26.

Fig. 3.27.

Fig. 3.28.

Fig. 3.29.

Fig. 3.30.

Fig. 3.31.

Fig. 3.25. Potenciómetros de ajuste (trimmer).  
 Fig. 3.26. Potenciómetros giratorios.  
 Fig. 3.27. Resistencias bobinadas.  
 Fig. 3.28. Potenciómetro de cursor.  
 Fig. 3.29. Resistencias de película.  
 Fig. 3.30. Resistencias bobinadas con diversos terminales.  
 Fig. 3.31. Protección de resistencias bobinadas mediante esmalte, revestimiento de material cerámico, vitrificado y cementado.

## Resistencia variable



## Variación lineal con cursor



## Variación a escalones con cursor



## Potenciómetro de ajuste

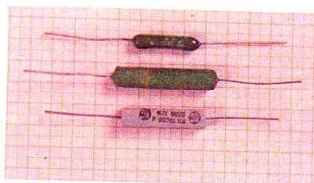
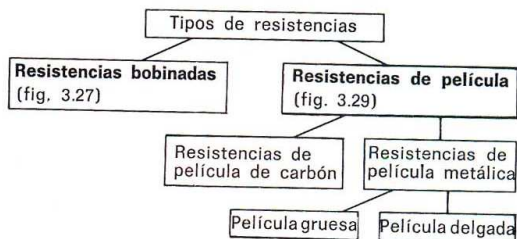
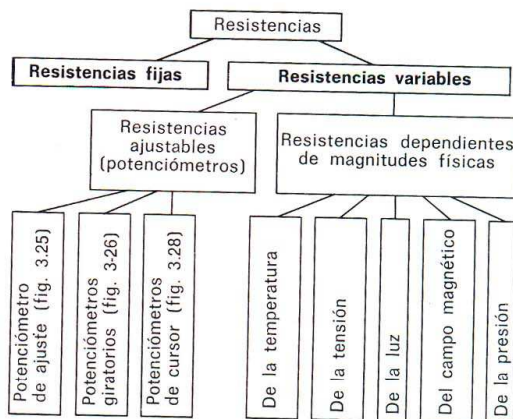


Fig. 3.32. Resistencias bobinadas sin sujeción de los terminales.

Las **resistencias bobinadas** se fabrican devanando hilos resistivos oxidados y aislados (ver 15.4.3) y conectándoles las patillas, collares y casquetes terminales (fig. 3.30). A continuación las resistencias fijas pueden esmaltarse, cementarse, vitrificarse o recubrirse con material cerámico (fig. 3.31). Las resistencias así protegidas pueden tener hilos terminales sin sujeción especial (figura 3.32).

Las resistencias bobinadas se utilizan en todas las gamas de cargas permisibles, pero sobre todo para grandes potencias, por ejemplo como resistencias de arranque de motores (fig. 3.33). Este tipo de construcción es relativamente resistente al envejecimiento y poco sensible a las sobrecargas.

Las resistencias bobinadas barnizadas o sin revestimiento son bastante económicas. No obstante, la temperatura de su superficie no debe sobrepasar los 140°C para que el barniz o los óxidos no se deterioren (fig. 3.34). Las resistencias cementadas o recubiertas de material cerámico pueden soportar mayores temperaturas en su superficie, en algunos casos hasta 350°C.

Los componentes cementados no pueden emplearse en todas las aplicaciones, pues su porosidad hace que absorban la humedad.

Las resistencias bobinadas vitrificadas pueden soportar cargas aún mayores que las demás, pues su superficie resiste temperaturas de hasta 450°C. Sin embargo, presentan el inconveniente de tener mayores márgenes de tolerancia dado que sus valores resistivos se modifican al someterlas a altas temperaturas durante el vitrificado.

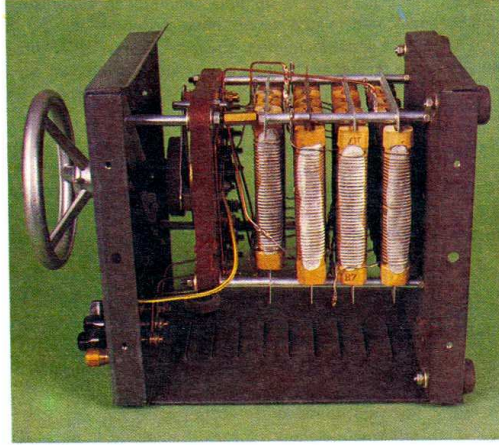


Fig. 3.33. Resistencias de arranque para motores.

Las **resistencias de película** se subdividen en resistencias de carbón y de película metálica; entre estas últimas también se cuentan las de óxido metálico. Estos tipos de resistencias son especialmente adecuadas para tener altos valores resistivos. Existen diversos procedimientos de fabricación, como hemos podido observar en la tabla general.

En las **resistencias de película de carbón** se aplica la película correspondiente, con un espesor entre  $0,001 \mu\text{m}$  y  $10 \mu\text{m}$ , sobre un soporte de porcelana especial. Mediante el grabado de grecas (fig. 3.35) pueden alcanzarse valores nominales de hasta  $10 \text{ M}\Omega$ . A continuación se barnizan. Estas resistencias están muy difundidas gracias a su reducido precio, pero presentan el inconveniente de que reducen considerablemente su valor resistivo a temperaturas elevadas.

Las **resistencias de película metálica** pueden fabricarse de dos maneras diferentes. La primera de ellas, la técnica de película gruesa, consiste en aplicar una pasta, compuesta de metales, compuestos metálicos y polvo de vidrio, sobre un soporte cerámico y recocerla después. Por ello también se las denomina resistencias de metal vitrificado. Pueden soportar grandes cargas.

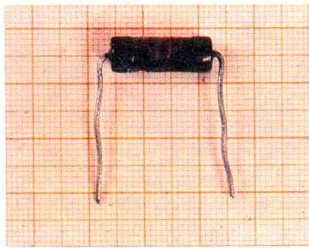


Fig. 3.34. Resistencia bobinada destruida por sobrecalentamiento.

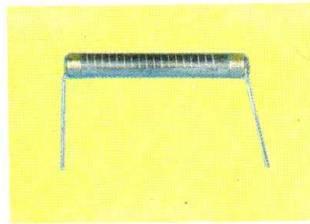


Fig. 3.35. Resistencia de película de carbón con grabado de grecas (el revestimiento está quitado parcialmente).



La técnica de película delgada consiste en vaporizar los metales a través de una máscara, con lo que se obtienen películas de sólo  $0,05 \mu\text{m}$  de espesor.

Este tipo de componentes pueden soportar diferentes cargas, lo que se deduce de las diferentes temperaturas permisibles en su superficie.

Resistencias de película de carbón:	$85^\circ \text{C} \dots 155^\circ \text{C}$
Resistencias de película metálica:	$125^\circ \text{C} \dots 175^\circ \text{C}$
Resistencias de metal vitrificado:	$155^\circ \text{C} \dots 255^\circ \text{C}$

Todas las resistencias de película se protegen contra los esfuerzos mecánicos y las influencias climáticas con un revestimiento de resina sintética, por lo que apenas pueden diferenciarse exteriormente unas de otras.

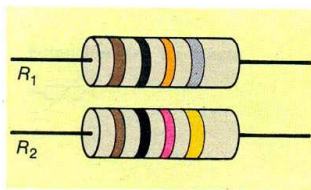


Fig. 3.36.  
Resistencias del ejercicio 6.

#### Ejercicios sobre 3.5

1. ¿Cuáles son los dos significados de la expresión «resistencia eléctrica»?
2. ¿Cuáles son los datos mínimos necesarios para poder encargar resistencias?
3. Citar los seis números de la serie IEC E6.
4. ¿Qué tolerancia tienen las resistencias de la serie IEC E12?
5. ¿Qué código de colores presenta una resistencia de película de carbón de  $6,8 \text{ k}\Omega \pm 10\%$ ?
6. ¿Qué valores resistivos presentan las dos resistencias representadas en la figura 3.36?
7. ¿De qué depende la carga permisible de las resistencias?
8. ¿En qué se diferencian las resistencias variables de las fijas?
9. ¿Qué es un potenciómetro de ajuste?
10. ¿Qué ventajas e inconvenientes presentan las resistencias bobinadas respecto a las de película?

## 4. Conexiones de resistencias eléctricas

### 4.1. Conexión en serie

A una fuente de tensión pueden conectarse varias cargas (resistencias) eléctricas, entendiéndose ahora por carga un dispositivo que consuma energía. Una de las posibilidades es conectarlas en serie, hecho no demasiado frecuente en la práctica. Sin embargo, un ejemplo muy conocido de conexión en serie es la guirnalda de luces (fig. 4.1).

La conexión en serie consiste en conectar los componentes uno detrás del otro. Únicamente un extremo del primer componente y un extremo del último están conectados a la fuente de tensión. Al interrumpir el circuito eléctrico (abrir el interruptor) se apagan todas las bombillas.

Vamos a estudiar ahora las leyes de la conexión en serie realizando algunos experimentos, todos ellos con tres resistencias. ¿Cuál es la dependencia que existe entre las corrientes, las tensiones y las resistencias? Para poder responder a esta pregunta vamos a tratar cada cuestión, o sea cada magnitud, por separado.

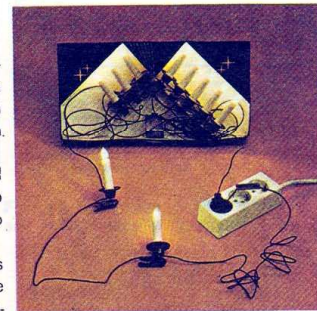
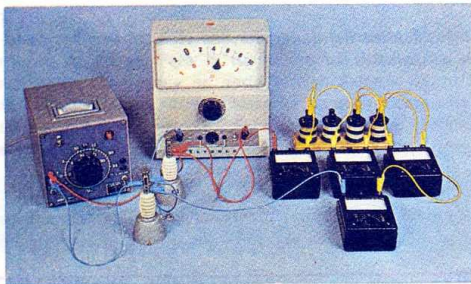


Fig. 4.1. Guirnalda de luces.

#### Experimento 4-1: Corriente en la conexión en serie

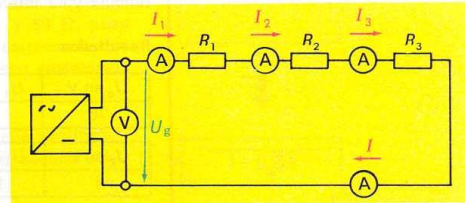
##### Montaje



Tres resistencias,  $R_1 = 10 \Omega$ ,  $R_2 = 20 \Omega$  y  $R_3 = 50 \Omega$  se conectan en serie a una fuente de tensión de  $U = 16 \text{ V}$ . El voltímetro sirve para controlar la tensión.

##### Realización

Con los amperímetros se miden las intensidades de las corrientes que atraviesan las resistencias.



##### Resultados

$U$ en V	$I_1$ en A	$I_2$ en A
16	0,2	0,2

$I_3$ en A	$I$ en A
0,2	0,2

**Intensidad de la corriente en la conexión en serie**

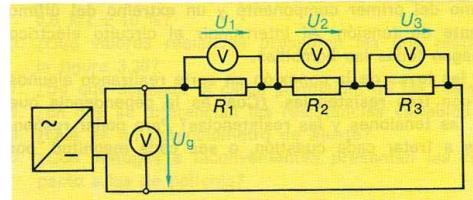
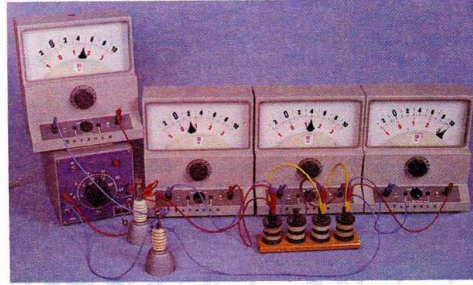
$$I = I_1 = I_2 = I_3$$

El experimento 4-1 muestra que:

Al conectar varias resistencias en serie a una fuente de tensión, por todas las resistencias circula la misma corriente.

#### Experimento 4-2: Tensiones en la conexión en serie

##### Montaje



Tres resistencias  $R_1 = 10 \Omega$ ,  $R_2 = 20 \Omega$  y  $R_3 = 50 \Omega$  se conectan en serie a una fuente de tensión de  $U = 16 \text{ V}$ .

##### Realización

Se miden la tensión en los bornes del generador, las tensiones en las resistencias y la intensidad de la corriente.

##### Resultados

$U_g$ en V	$U_1$ en V
16	2
$U_2$ en V	$U_3$ en V
4	10

**Tensión en la conexión en serie de tres resistencias**

$$U_g = U_1 + U_2 + U_3$$

Al comparar las tensiones en las resistencias con la tensión del generador puede observarse que las primeras son todas menores que la del generador.

##### Segunda ley de Kirchoff <sup>1</sup>

La tensión total es igual a la suma de las diferentes tensiones en serie.

<sup>1</sup> Gustav Kirchoff, físico alemán, 1824-1887.

Si existieran más resistencias la tensión total se dividiría entre todas ellas. El circuito se encuentra sometido a la tensión de la fuente de alimentación  $U_g = 16 \text{ V}$ , que provoca la circulación de una corriente de intensidad  $I = 0,2 \text{ A}$  a través de todas las resistencias. Por ello en todas ellas se produce una caída de tensión. Las diferentes caídas de tensión pueden calcularse mediante la ley de Ohm:

$$\begin{aligned} U_1 &= I_1 \cdot R_1 & U_2 &= I_2 \cdot R_2 & U_3 &= I_3 \cdot R_3 \\ U_1 &= 0,2 \text{ A} \cdot 10 \Omega & U_2 &= 0,2 \text{ A} \cdot 20 \Omega & U_3 &= 0,2 \text{ A} \cdot 50 \Omega \\ U_1 &= 2 \text{ V} & U_2 &= 4 \text{ V} & U_3 &= 10 \text{ V} \end{aligned}$$

Los valores medidos y los calculados coinciden.

Para cada una de las resistencias puede aplicarse la ley de Ohm teniendo en cuenta los diferentes valores de cada una.

Las diferentes caídas de tensión correspondientes a las diferentes resistencias muestran:

En la resistencia mayor se produce también la mayor caída de tensión, y en la menor, la menor caída.

¿Cuál es la relación existente entre las diversas tensiones?

$$\begin{aligned} U_1 &= I \cdot R_1 & U_2 &= I \cdot R_2 \\ U_2 &= I \cdot R_2 & U_1 &= I \cdot R_1 \\ \frac{U_1}{U_2} &= \frac{R_1}{R_2} \end{aligned}$$

En la conexión en serie las diferentes tensiones son directamente proporcionales a sus correspondientes resistencias.

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2} \quad \text{y} \quad \frac{U_1}{U_3} = \frac{R_1}{R_3} \quad \text{y} \quad \frac{U_2}{U_3} = \frac{R_2}{R_3}$$

Si todas las resistencias fueran iguales también lo serían las caídas de tensión.

La fuente de tensión con  $U = 16 \text{ V}$  alimenta al circuito en serie con una corriente de  $0,2 \text{ A}$ . Para la fuente carece totalmente de importancia que las resistencias conectadas en serie tengan valores de  $10 \Omega$ ,  $20 \Omega$  y  $50 \Omega$ , pues toda la conexión en serie representa para la fuente una única resistencia, que sustituye a todo el circuito. Esta resistencia se denomina por eso **resistencia equivalente** o también **resistencia total** (ver fig. 4.4).

La conexión en serie (o cualquier otro tipo de conexión) puede sustituirse por la resistencia equivalente o total  $R_c$ . La fuente de tensión seguirá suministrando la misma corriente que antes.

La resistencia equivalente también puede calcularse mediante la ley de Ohm:

$$\begin{aligned} R_c &= \frac{U_g}{I} \\ R_c &= \frac{16 \text{ V}}{0,2 \text{ A}} \\ R_c &= 80 \Omega \end{aligned}$$

**Tensión de la conexión en serie**

$$U_g = U_1 + U_2 + \dots + U_n$$

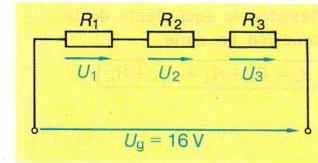


Fig. 4.2.

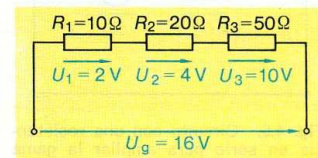


Fig. 4.3. Relación entre las diversas resistencias y tensiones.

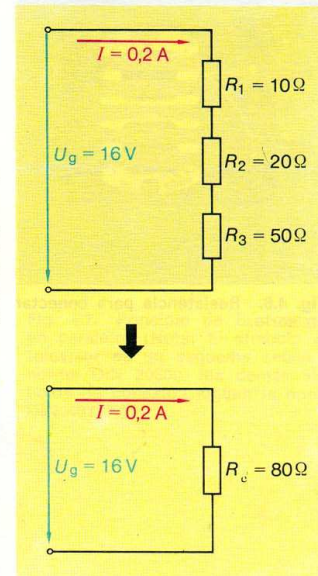


Fig. 4.4. La resistencia equivalente provoca el mismo efecto que las demás resistencias en serie.

**Resistencia equivalente de la conexión en serie**

$$R_e = R_1 + R_2 + \dots + R_n$$

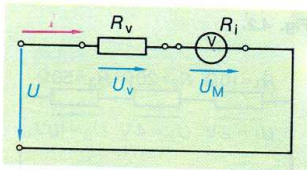


Fig. 4.5. Circuito con una resistencia en serie para ampliar la gama de medida de un voltímetro.

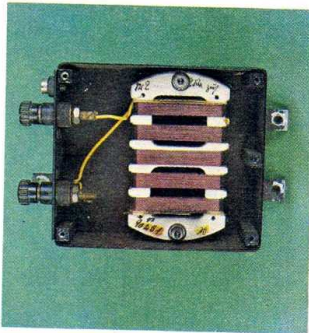


Fig. 4.6. Resistencia para conectar en serie.

El resultado muestra la relación que existe entre la resistencia equivalente y las diversas resistencias.

$$R_e = R_1 + R_2 + R_3$$

$$80 \Omega = 10 \Omega + 20 \Omega + 50 \Omega$$

En la conexión en serie la resistencia equivalente es igual a la suma de las diferentes resistencias.

Ejemplo:

**Ampliación de la gama de medida de los voltímetros (instrumento de bobina móvil)**

Con un voltímetro (gama de medida: 60 mV, resistencia interna: 200  $\Omega$ ) debe medirse una tensión de unos 2,5 V. Para ello se fija el fondo de escala del instrumento a 3 V.

¿Qué resistencia debe conectarse en serie con el instrumento para reducir la tensión en éste?

Para calcular  $R_v$  precisamos:

- la intensidad  $I$  de la corriente que pasa por la resistencia,
- la tensión  $U_v$  que cae en la resistencia

$$R_v = \frac{U_v}{I}$$

La intensidad de la corriente que circula para el fondo de escala puede calcularse a partir de los datos característicos del instrumento:

$$I = \frac{U_M}{R_i}$$

Para poder calcular la tensión  $U_v$  cuando medimos a fondo de escala debemos restar la tensión  $U_M$  de la tensión  $U$ .

$$U_v = U - U_M$$

Sustituyendo en la fórmula de la resistencia  $I$  y  $U_v$  por las ecuaciones correspondientes, obtenemos

$$R_v = \frac{U - U_M}{\frac{U_M}{R_i}} \quad R_v = R_i \cdot \frac{U - U_M}{U_M}$$

$$R_v = 200 \Omega \cdot \frac{3V - 0,06V}{0,06V}$$

$$R_v = 9,8 \text{ k}\Omega$$

**Ejercicios sobre 4.1**

1. Explicar por qué en la conexión en serie la corriente que circula por todas las resistencias es la misma.
2. ¿Cuál es la segunda ley de Kirchhoff?
3. ¿Qué significado tiene la resistencia equivalente de un circuito?

4. ¿Cuánto vale la resistencia equivalente de cuatro resistencias iguales, cada una de  $2,5 \Omega$  conectadas en serie?
5. Tres resistencias  $R_1 = 20 \Omega$ ,  $R_2 = 40 \Omega$  y  $R_3 = 40 \Omega$  se conectan en serie. Las tensiones en las resistencias  $R_1$  y  $R_2$  valen, respectivamente,  $U_1 = 50 \text{ V}$  y  $U_2 = 100 \text{ V}$ .
  - a) ¿Cuánto vale la tensión  $U_3$ ?
  - b) ¿Cuánto vale la tensión total?
6. Cuatro resistencias  $R_1 = 100 \Omega$ ,  $R_2 = 120 \Omega$ ,  $R_3 = 270 \Omega$  y  $R_4 = 470 \Omega$  se conectan en serie. Por ellas circula una corriente de intensidad  $I = 50 \text{ mA}$ .
  - a) ¿Cuánto vale la resistencia total?
  - b) ¿Cuánto valen las tensiones en las diferentes resistencias?
  - c) ¿Cuánto vale la tensión total?
7. Una fuente de tensión de  $U = 24 \text{ V}$  alimenta una conexión en serie de cuatro resistencias. Tres de ellas son del mismo valor ( $R_1 = R_2 = R_3 = 4 \text{ k}\Omega$ ) y en ellas caen tensiones de  $4 \text{ V}$  cada una.
  - a) ¿Cuánto vale la tensión  $U_4$ ?
  - b) ¿Cuánto vale la resistencia  $R_4$ ?
  - c) ¿Cuánto vale la intensidad  $I$  de la corriente?
8. ¿Cómo se modifican las diferentes tensiones en una conexión en serie si se conecta una resistencia adicional en serie y el circuito total se vuelve a someter a la misma tensión?

#### 4.2. Conexión en paralelo

En muchas instalaciones eléctricas es posible poder conectar y desconectar las cargas a voluntad e independientemente unas de otras. Este hecho es una característica de la conexión en paralelo. Las cargas están conectadas en paralelo unas con otras y todas a la fuente de tensión (fig. 4.7).

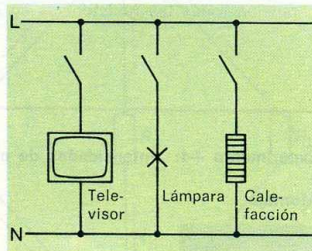


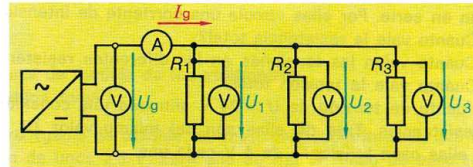
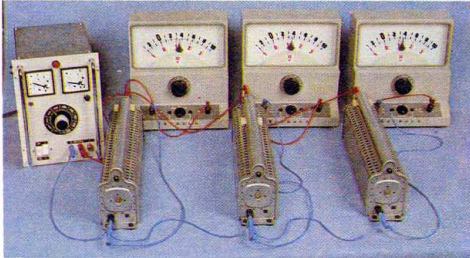
Fig. 4.7. Principio de la conexión en paralelo. (Nota: El símbolo del televisor es un esquema según la norma DIN 30600, los demás símbolos de conexión siguen la norma DIN 40717.)

Para obtener las diferentes leyes y relaciones vamos a realizar un experimento. Con tal de poder realizar una comparación con la conexión en serie utilizaremos las mismas resistencias y la misma fuente de tensión.

La pregunta clave de nuestro estudio es:

¿Qué relaciones existen entre las tensiones, intensidades de corriente y resistencias en la conexión en paralelo?

Vamos a contestar a la pregunta en este orden mediante diferentes experimentos.

**Experimento 4-3: Tensión en la conexión en paralelo****Montaje**

Tres resistencias,  $R_1 = 10 \Omega$ ,  $R_2 = 20 \Omega$  y  $R_3 = 50 \Omega$ , se conectan en paralelo a una fuente de tensión de  $U = 16 \text{ V}$ .

**Realización**

Mediremos la tensión de la fuente  $U_g$ , la intensidad de la corriente  $I_g$  y las tensiones en las diferentes resistencias.

**Resultados**

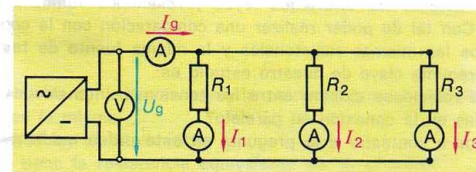
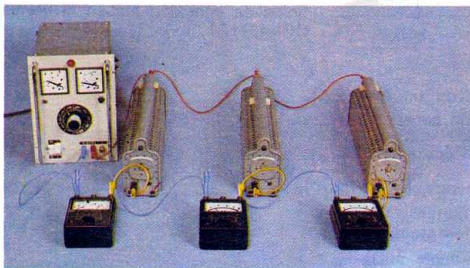
$U_g$ en V	$I_g$ en A	$U_1$ en V
16	2,72	16

$U_2$ en V	$U_3$ en V
16	16

**Tensión de la conexión en paralelo**

$$U_g = U_1 = U_2 = \dots = U_n$$

Cuando se conectan varias resistencias en paralelo a una fuente de tensión todas las resistencias se encuentran sometidas a la misma tensión.

**Experimento 4-4: Intensidades de corrientes en la conexión en paralelo****Montaje**

**Realización**

Mediremos la tensión de la fuente  $U_g$ , la intensidad  $I_g$  de la corriente que suministra y las intensidades de las corrientes que circulan por las diferentes resistencias.

**Resultados**

$U_g$ en V	$I_g$ en A	$I_1$ en A
16	2,72	1,6

$I_2$ en A	$I_3$ en A
0,8	0,32

El experimento 4-4 muestra la relación existente entre la intensidad de la corriente total y las intensidades de las corrientes por las diferentes resistencias.

**Primera ley de Kirchhoff**

La intensidad de la corriente total es igual a la suma de las diferentes intensidades.

Si existieran más resistencias deberían sumarse también las intensidades de las demás corrientes. Cada resistencia conectada en paralelo aumenta la intensidad  $I_g$  de la corriente total.

**Intensidad de corrientes en la conexión en paralelo de tres resistencias**

$$I_g = I_1 + I_2 + I_3$$

**Intensidades de corrientes en la conexión en paralelo**

$$I_g = I_1 + I_2 + \dots + I_n$$

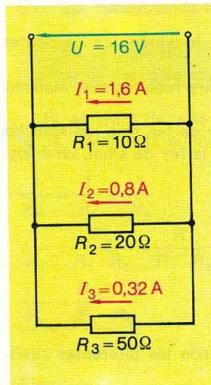


Fig. 4.8. Relación entre resistencias e intensidades.

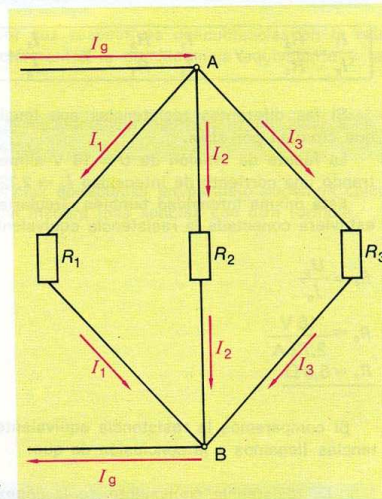


Fig. 4.9. Transformación del circuito de la figura 4.8.

La división de la corriente en el experimento 4-4 puede reconocerse en la figura 4.9. Los diferentes puntos de ramificación se han reducido a dos nodos (A y B).



Para estos nudos también es válida la primera ley de Kirchhoff (ley de los nudos):

$$\begin{array}{l} \text{Nudo A} \qquad \qquad \text{Nudo B} \\ I_g = I_1 + I_2 + I_3 \qquad I_1 + I_2 + I_3 = I_g \end{array}$$

#### Ley de los nudos

$$\sum I_{en} = \sum I_{sa}$$

La suma de las corrientes que entran en un nudo es igual a la suma de las corrientes que salen de él.

La relación entre las resistencias y las corrientes que circulan por ellas puede explicarse así:

Por la resistencia menor circula la corriente de mayor intensidad.

Pero, ¿cuál es la relación existente entre las diversas intensidades?

$$I_1 = \frac{U_g}{R_1}$$

$$I_2 = \frac{U_g}{R_2}$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{U_g}{R_1} \cdot \frac{R_2}{U_g}$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}$$

En la conexión en paralelo la intensidad de las corrientes es inversamente proporcional a las resistencias por las que circulan.

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1} \quad \text{y} \quad \frac{I_1}{I_3} = \frac{R_3}{R_1} \quad \text{y} \quad \frac{I_2}{I_3} = \frac{R_3}{R_2}$$

Si las diferentes resistencias son iguales también lo serán las corrientes que circulen por ellas.

La fuente de tensión de  $U = 16 \text{ V}$  alimenta a las tres resistencias, suministrando una corriente de intensidad  $I_g = 2,72 \text{ A}$ .

Esta misma intensidad también circularía si en lugar de las tres resistencias estuviera conectada la resistencia equivalente  $R_e$ . Según la ley de Ohm, tenemos:

$$R_e = \frac{U_g}{I_g}$$

$$R_e = \frac{16 \text{ V}}{2,72 \text{ A}}$$

$$R_e = 5,9 \Omega$$

Si comparamos la resistencia equivalente calculada con las diferentes resistencias llegamos a la conclusión de que:

La resistencia equivalente de la conexión en paralelo es menor que la menor de las diversas resistencias.

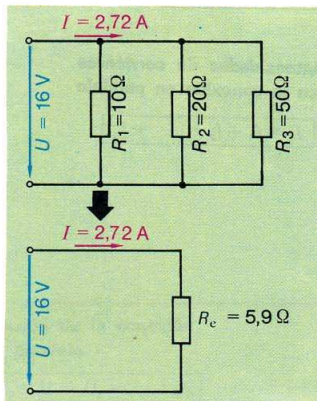


Fig. 4.10. La resistencia equivalente produce el mismo efecto que las demás resistencias juntas.

<sup>1</sup>  $\Sigma$  = símbolo matemático para la suma.

Podemos explicar este hecho teniendo en cuenta que en un circuito eléctrico cada una de las resistencias adicionales conectadas en paralelo supone un nuevo camino para la corriente. De este modo obtenemos el mismo efecto que si aumentáramos la sección de los conductores.

¿Cuál es la relación que existe en la conexión en paralelo entre la resistencia equivalente y las diversas resistencias?

Vamos a contestar esta pregunta mediante una deducción matemática. Partamos para ello de la primera ley de Kirchhoff.

$$I_g = I_1 + I_2 + I_3$$

Mediante la ley de Ohm podemos transformar esta ecuación en

$$\frac{U_g}{R_g} = \frac{U_1}{R_1} + \frac{U_2}{R_2} + \frac{U_3}{R_3}$$

Dado que  $U_g = U_1 = U_2 = U_3$  podemos dividir toda la ecuación por  $U$  y simplificar a continuación.

$$\frac{U}{R_e \cdot U} = \frac{U}{R_1 \cdot U} + \frac{U}{R_2 \cdot U} + \frac{U}{R_3 \cdot U}$$

En la conexión en paralelo el inverso de la resistencia equivalente es igual a la suma de los inversos de las diferentes resistencias.

El inverso de una resistencia es su conductancia:

$$G = \frac{1}{R} \quad (\text{ver 2.2})$$

Sustituyendo las resistencias por sus respectivas conductancias en la relación anterior obtenemos una relación entre la conductancia equivalente y las diversas conductancias.

En la conexión en paralelo la conductancia equivalente es igual a la suma de las diversas conductancias.

Si se trata de sólo dos resistencias conectadas en paralelo podemos calcular la resistencia equivalente de una manera más sencilla con otra fórmula.

$$\frac{1}{R_e} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

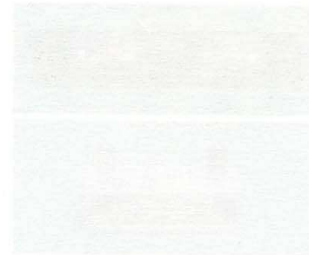
$$\frac{1}{R_e} = \frac{R_2}{R_1 \cdot R_2} + \frac{R_1}{R_1 \cdot R_2}$$

$$\frac{1}{R_e} = \frac{R_2 + R_1}{R_1 \cdot R_2}$$

Ejemplo:

**Ampliación de la gama de medida de amperímetros**  
(instrumento de bobina móvil)

Con un amperímetro (gama de medida: 60 mV, resistencia interna: 200 Ω) debemos medir una corriente de aproximadamente 1 A de intensidad. Para ello determinamos que el valor de fondo de escala sea 1,5 A.



**Conductancia equivalente de una conexión en paralelo**

$$\frac{1}{R_e} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}$$

$$G_e = G_1 + G_2 + \dots + G_n$$

**Resistencia equivalente de dos resistencias conectadas en paralelo**

$$R_e = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

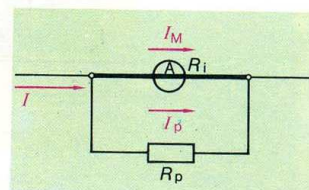


Fig. 4.11. Circuito con un shunt para la ampliación de la gama de medida de un amperímetro.

Unidad Operativa SENATI - Abancay



Fig. 4.12. Shunts (resistencias en paralelo).

¿Cuál es la resistencia (shunt) que debemos conectar en paralelo al instrumento de medida para reducir la intensidad de la corriente que circula por éste? Para poder calcular  $R_p$  necesitamos saber:

- la tensión  $U$  aplicada a la resistencia
- la intensidad  $I_p$  de la corriente que pasa por la resistencia

$$R_p = \frac{U}{I_p}$$

La tensión de fondo de escala puede calcularse a partir de los datos característicos del instrumento de medida.

$$U = I_M \cdot R_i$$

Para poder calcular la intensidad  $I_p$  de la corriente de fondo de escala debemos restar la intensidad  $I_M$  de la intensidad  $I$  de la corriente total.

$$I_p = I - I_M$$

Si sustituimos en la fórmula de la resistencia  $U$  e  $I_p$  por sus respectivas ecuaciones, obtenemos:

$$R_p = \frac{I_M \cdot R_i}{I - I_M}$$

$$I_M = \frac{U}{R_M}$$

$$R_p = R_i \frac{I_M}{I - I_M}$$

$$I_M = \frac{0,06 \text{ V}}{200 \Omega}$$

$$R_p = 200 \Omega \frac{0,3 \cdot 10^{-3} \text{ A}}{1,5 \text{ A} - 0,3 \cdot 10^{-3} \text{ A}}$$

$$I_M = 0,3 \text{ mA}$$

$$R_p = 0,04 \Omega$$

#### Ejercicios sobre 4.2

1. Explicar por qué en la conexión en paralelo circula la corriente de mayor intensidad por la menor resistencia.

¿Cuál es la 1.ª ley de Kirchhoff?

¿Cuánto vale la resistencia equivalente de cinco resistencias, cada una de  $30 \Omega$ , conectadas en paralelo?

Tres resistencias  $R_1 = 20 \Omega$ ,  $R_2 = 40 \Omega$  y  $R_3 = 40 \Omega$  se conectan en paralelo. La intensidad de la corriente por  $R_1$  vale  $6 \text{ A}$ .

a) ¿Cuál es la intensidad de las corrientes  $I_2$  e  $I_3$ ?

b) ¿Cuál es la intensidad de la corriente total?

c) ¿Cuánto vale la tensión?

Se conectan en paralelo cuatro resistencias,  $R_1 = 800 \Omega$ ,  $R_2 = 1200 \Omega$ ,  $R_3 = 1600 \Omega$  y  $R_4 = 2400 \Omega$ . La intensidad de la corriente total vale  $0,5 \text{ A}$ .

a) ¿Cuánto vale la resistencia equivalente?

b) ¿Cuánto vale la tensión?

c) ¿Cuáles son las intensidades de las corrientes que circulan por las resistencias?

Dos resistencias  $R_1 = 400 \Omega$  y  $R_2$  están conectadas en paralelo. La intensidad de la corriente total vale  $I_g = 1 \text{ A}$  y la corriente de la que circula por la primera resistencia  $I_1 = 0,6 \text{ A}$ .

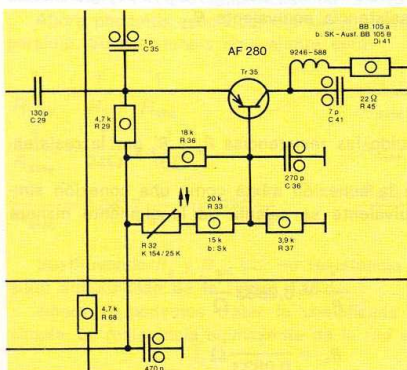
a) ¿Cuánto vale la tensión?

- b) ¿Cuál es el valor de la resistencia equivalente  $R_e$ ?
- c) ¿Cuál es el valor de  $R_2$ ?

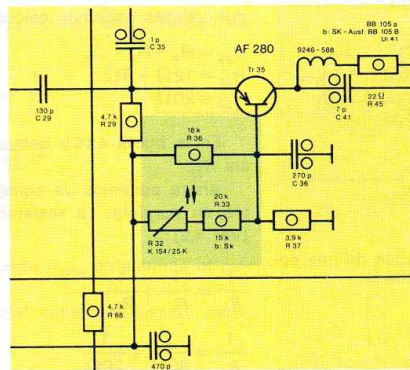
**4.3. Conexiones mixtas**

En la figura 4.13 hemos reproducido una parte del circuito de un televisor. Junto con otros componentes de los que hablaremos más tarde, están montadas varias resistencias. Algunas están separadas, otras conectadas en serie, en paralelo y finalmente otras combinadas en serie y paralelo.

Las conexiones mixtas son combinaciones de conexiones en serie y conexiones en paralelo.

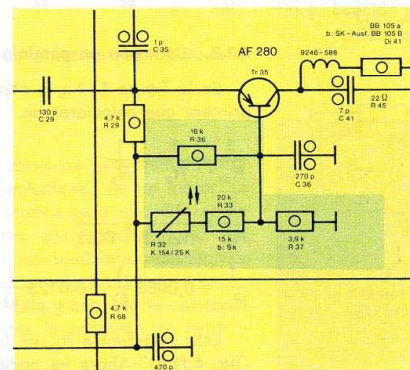


**Fig. 4.13.** Parte del esquema de un televisor.



**Fig. 4.14.** Ejemplo de conexión en serie ampliada.

= Resistencia de valor fijo



**Fig. 4.15.** Ejemplo de conexión en paralelo ampliada.

La conexión destacada en la figura 4.14 es una conexión en serie de  $R_{33}$  y  $R_{32}$ , a las que se ha conectado  $R_{36}$  en paralelo. Esta conexión se denomina conexión en serie ampliada.

La conexión destacada en la figura 4.15 es una conexión en paralelo de  $R_{36}$  por un lado, y de  $R_{32}$  en serie con  $R_{33}$  por otro, a la que se ha conectado además  $R_{37}$  en serie. Esta conexión se denomina conexión en paralelo ampliada.

A continuación vamos a tratar con más detenimiento estas dos combinaciones. Podríamos hacerlo experimentalmente, pero como en principio se trata simplemente de aplicaciones de las conexiones en serie y en paralelo, podemos utilizar los conocimientos que ya hemos obtenido.

#### 4.3.1. Conexión en serie ampliada

Para calcular la resistencia equivalente de una conexión mixta vamos a proceder por pasos.

El primer paso consistirá en calcular aquella parte del circuito que se componga de una conexión simple, o sea, de una en serie. En el presente ejemplo se tratará, pues, de la conexión en serie formada por  $R_2$  y  $R_3$ . A partir de estos dos valores podemos calcular la resistencia equivalente  $R_{23}$ .

$$\begin{aligned} R_{23} &= R_2 + R_3 \\ R_{23} &= 12\Omega + 8\Omega \\ R_{23} &= 20\Omega \end{aligned}$$

En la figura 4.16 b) hemos sustituido las resistencias  $R_2$  y  $R_3$  por la resistencia  $R_{23}$ .

Ahora podemos ya considerar a la conexión mixta como una conexión simple en paralelo. La resistencia equivalente se calcula de la siguiente manera (ver 4.2):

$$\begin{aligned} \frac{1}{R_e} &= \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_{23}} & \frac{1}{R_e} &= 0,0833 \frac{1}{\Omega} \\ \frac{1}{R_e} &= \frac{1}{30\Omega} + \frac{1}{20\Omega} & R_e &= \frac{1}{0,0833} \Omega \\ \frac{1}{R_e} &= 0,033 \frac{1}{\Omega} + 0,05 \frac{1}{\Omega} & R_e &= 12\Omega \end{aligned}$$

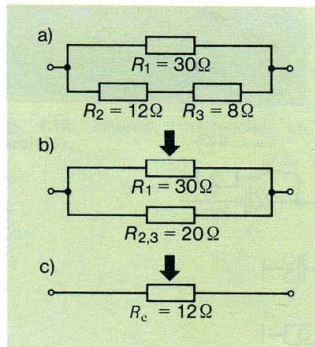


Fig. 4.16. Simplificación de una conexión en serie ampliada.

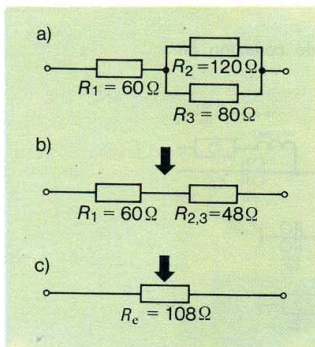


Fig. 4.17. Simplificación de una conexión en paralelo ampliada.

#### 4.3.2. Conexión en paralelo ampliada

En la figura 4.17 a), la conexión simple es la paralelo de  $R_2$  y  $R_3$ . Ésta será la primera que calcularemos.

$$\begin{aligned} \frac{1}{R_{23}} &= \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} & \frac{1}{R_{23}} &= 0,0208 \frac{1}{\Omega} \\ \frac{1}{R_{23}} &= \frac{1}{120\Omega} + \frac{1}{80\Omega} & R_{23} &= \frac{1}{0,0208} \Omega \\ \frac{1}{R_{23}} &= 0,0083 \frac{1}{\Omega} + 0,0125 \frac{1}{\Omega} & R_{23} &= 48\Omega \end{aligned}$$

Esta resistencia  $R_{23}$  es la equivalente de la conexión en paralelo de  $R_2$  y  $R_3$  (fig. 4.17 b). Ahora ya podemos tratar el circuito como una conexión en serie simple.

$$\begin{aligned} R_e &= R_1 + R_{23} \\ R_e &= 60\Omega + 48\Omega \\ R_e &= 108\Omega \end{aligned}$$

**4.3.3. Redes eléctricas**

Una red eléctrica es un circuito eléctrico ramificado en el que existen varias conexiones mixtas y a veces también varias fuentes de tensión. En este apartado sólo vamos a calcular la resistencia equivalente de una red con una única fuente de tensión (fig. 4.18 a).

En primer lugar busquemos la parte del circuito que constituya una conexión simple. Tenemos primero la conexión en serie de  $R_4$ ,  $R_5$  y  $R_6$ .

Calculamos la resistencia equivalente de esta conexión en serie.

$$R_{456} = R_4 + R_5 + R_6$$

$$R_{456} = 4\Omega + 9\Omega + 3\Omega$$

$$R_{456} = 16\Omega$$

Sustituycamos  $R_4$ ,  $R_5$  y  $R_6$  por esta resistencia equivalente  $R_{456}$ , con lo que obtenemos el circuito simplificado de la 4.18 b.

Ahora podemos reconocer claramente que  $R_3$  y  $R_{456}$  forman una conexión en paralelo. Su resistencia equivalente será:

$$\frac{1}{R_{3456}} = \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_{456}}$$

$$\frac{1}{R_{3456}} = \frac{1}{24\Omega} + \frac{1}{16\Omega}$$

$$\frac{1}{R_{3456}} = 0,0417 \frac{1}{\Omega} + 0,0625 \frac{1}{\Omega}$$

$$\frac{1}{R_{3456}} = 0,1042 \frac{1}{\Omega}$$

$$R_{3456} = \frac{1}{0,1042} \Omega$$

$$R_{3456} = 9,6\Omega$$

Sustituyendo  $R_3$  y  $R_{456}$  por su resistencia equivalente  $R_{3456}$  obtenemos el circuito simplificado de la figura 4.18 c.

Ahora ya podemos tratar la complicada red inicial como un circuito serie simple. La resistencia equivalente de la red es:

$$R_c = R_1 + R_{3456} + R_2$$

$$R_c = 6\Omega + 9,6\Omega + 6\Omega$$

$$R_c = 21,6\Omega$$

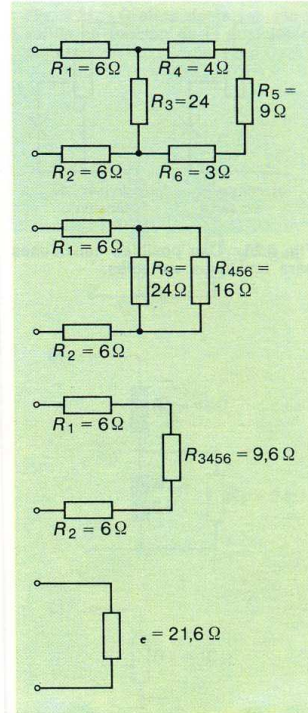
En problemas complicados de este tipo no es recomendable realizar todo el cálculo en un solo paso sino en varios.

**4.3.4. Divisor de tensión**

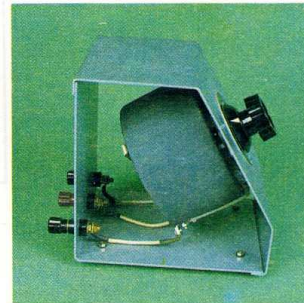
Es frecuente en la práctica el precisar tensiones variables, por ejemplo para regular la luminosidad de lámparas, el número de revoluciones de un motor, la temperatura de estufas eléctricas, etc. La industria fabrica para ello diferentes aparatos, como por ejemplo transformadores ajustables, oscurecedores, etc. Sin embargo, también pueden obtenerse tensiones variables mediante resistencias ajustables, también llamadas potenciómetros o reostatos (fig. 4.19).

Por ejemplo, para modificar la tensión de una bombilla y con ella la corriente que circula por ésta y su luminosidad podemos utilizar la conexión en serie y también el divisor de tensión (fig. 4.20).

En la conexión en serie la bombilla brilla más intensamente cuando está desconectada la resistencia en serie, o sea cuando el cursor está unido directamente con uno de los polos de la fuente (cursor arriba en la figura 4.20a). La mínima intensidad de corriente circula cuando la resistencia en serie está totalmente conectada en el circuito (cursor abajo en la figura 4.20a). Sin em-



**Fig. 4.18.** Simplificación de una red.



**Fig. 4.19.** Potenciómetro para cargas medias. Unidad Operativa SENATI - Abanca

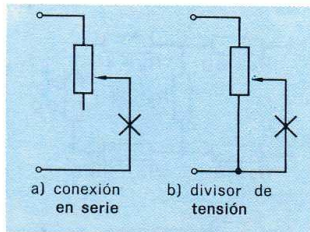


Fig. 4.20. Dos posibles conexiones para tensiones variables.

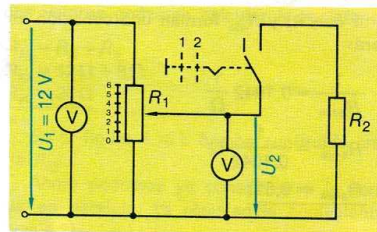
bargo, con sólo mover el cursor es imposible conseguir que la bombilla no quede sometida a tensión.

En cambio, en el circuito divisor de tensión no hay aplicada tensión a la bombilla cuando el cursor se encuentra abajo (fig. 4.20 b), mientras que cuando el cursor está arriba la bombilla queda sometida a la tensión total (como en la conexión en serie).

El divisor de tensión proporciona a la carga una tensión variable. En el experimento 4-5 estudiaremos cómo varía la tensión en la carga al mover el cursor a diferentes posiciones dadas.

#### Experimento 4-5: Divisor de tensión

##### Montaje



##### Realización

Mover el cursor del potenciómetro a cada una de las posiciones 0 a 6, midiendo la tensión  $U_2$  para cada una. La tensión de entrada se mantiene constante (voltímetro para controlarlo). Según la posición del conmutador realizaremos las medidas en vacío, con una carga de  $4\ \Omega$  y con una carga de  $24\ \Omega$ .

##### Resultados

N.º	Posición del cursor	$U_2$ en V (en vacío)	$U_2$ en V ( $R_2 = 24\ \Omega$ )	$U_2$ en V ( $R_2 = 4\ \Omega$ )
1	0	0	0	0
2	1	2	1,7	1,1
3	2	4	3,3	1,7
4	3	6	4,8	2,4
5	4	8	6,5	3,4
6	5	10	8,8	5,5
7	6	12	12	12

Los valores del experimento 4-5 están representados en el diagrama de la figura 4.21, en el que hemos representado la tensión de salida  $U_2$  (eje vertical) en función de la posición del cursor (eje horizontal).

Cuando el divisor de tensión funciona en vacío, cada variación de la posición del cursor provoca la misma variación de la tensión. Sin embargo, cuando se carga el divisor de tensión, la variación de la tensión ya no es proporcional a la

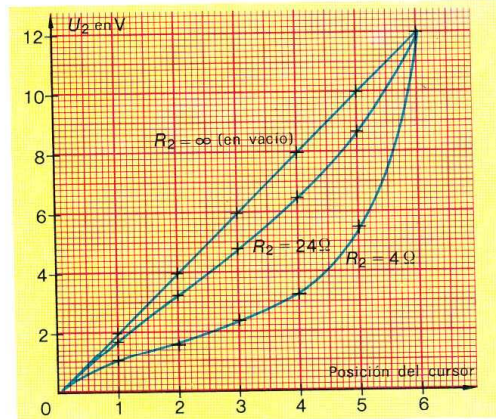


Fig. 4.21. Gráfica de la tensión de salida en función de la posición del cursor.

variación de la posición del cursor. Esta desviación es tanto mayor cuanto menor es el valor óhmico de la carga en relación al del potenciómetro.

En la práctica debemos tener en cuenta el hecho siguiente:

En un divisor de tensión el potenciómetro debiera tener aproximadamente el mismo valor óhmico que la resistencia de carga. Cuanto menor sea el potenciómetro más se aproximarán los resultados a la situación ideal en vacío.

Supongamos ahora el potenciómetro dividido en dos por el punto donde se encuentra el cursor y unidas las dos partes por conductores. Podemos considerar entonces que el circuito del divisor de tensión es una conexión en serie ampliada. Hemos representado en la figura 4.22 para la posición 2 del cursor y una carga  $R_2 = 24 \Omega$ .

Las resistencias  $R_2$  y  $R_1''$  están conectadas en paralelo. Su resistencia equivalente (en este caso  $R_x$ ) vale:

$$\frac{1}{R_x} = \frac{1}{R_1''} + \frac{1}{R_2} \qquad \frac{1}{R_x} = 0,167 \frac{1}{\Omega}$$

$$\frac{1}{R_x} = \frac{1}{8\Omega} + \frac{1}{24\Omega} \qquad R_x = \frac{1}{0,167} \Omega$$

$$\frac{1}{R_x} = 0,125 \frac{1}{\Omega} + 0,0417 \frac{1}{\Omega} \qquad \underline{R_x = 6\Omega}$$

Esta resistencia  $R_x$  está conectada en serie con  $R_1'$ . Con la resistencia equivalente de la conexión en serie podemos calcular la corriente total que circula:

$$R_c = R_1' + R_x; \quad R_c = 16\Omega + 6\Omega; \quad \underline{R_g = 22\Omega}$$

La intensidad de la corriente total vale, pues:

$$I_1 = \frac{U_1}{R_c} \quad I_1 = \frac{12V}{22\Omega} \quad \underline{I_1 = 0,545 A}$$

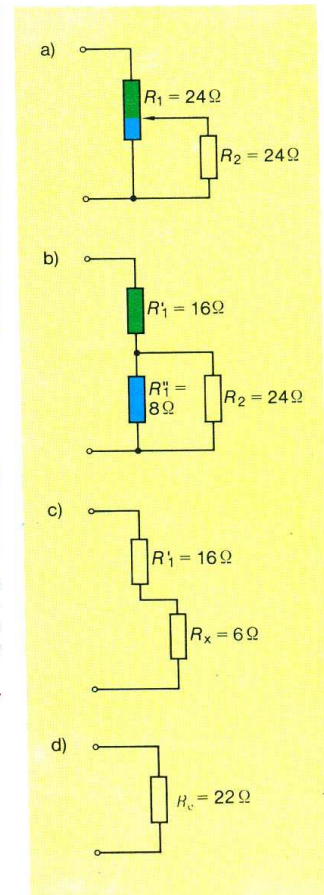


Fig. 4.22. Simplificación de un divisor de tensión.



Esta corriente provoca en la resistencia  $R_1'$  una caída de tensión  $U_1'$ , que es la diferencia entre la tensión de entrada  $U_1$  y la tensión de salida  $U_2$ .

$$\begin{aligned} U_1' &= I_1 \cdot R_1' & U_2 &= U_1 - U_1' \\ U_1' &= 0,545 \text{ A} \cdot 16 \Omega & U_2 &= 12 \text{ V} - 8,7 \text{ V} \\ U_1' &= 8,7 \text{ V} & U_2 &= 3,3 \text{ V} \end{aligned}$$

La corriente de intensidad  $I_1$  se divide en el punto en que se encuentra el cursor.  $I_2$  es la intensidad de la corriente que circula por la resistencia de carga.

$$I_2 = \frac{U_2}{R_2} \quad I_2 = \frac{3,3 \text{ V}}{24 \Omega} \quad I_2 = 0,14 \text{ A}$$

La corriente diferencia  $I_1''$  circula por  $R_1''$ . Para calcularla disponemos de dos ecuaciones:

$$\begin{aligned} I_1'' &= \frac{U_2}{R_1''} & \text{y} & \quad I_1'' = I_1 - I_2 \\ I_1'' &= \frac{3,3 \text{ V}}{8 \Omega} & I_1'' &= 0,545 \text{ A} - 0,14 \text{ A} \\ I_1'' &= 0,41 \text{ A} & I_1'' &= 0,41 \text{ A} \end{aligned}$$

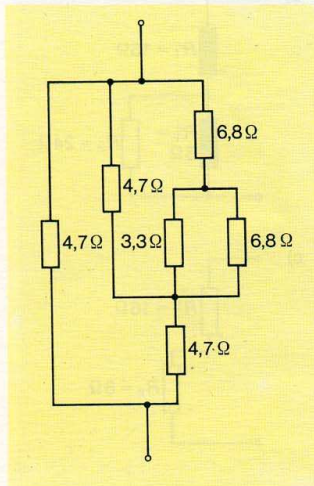


Fig. 4.23. Conexión correspondiente al ejercicio 5.

#### Ejercicios sobre 4.3

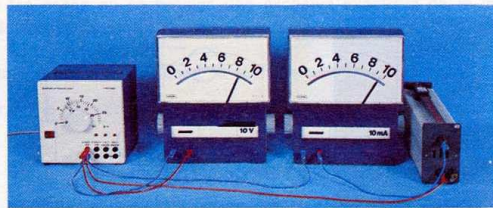
- ¿Cómo varía la intensidad de la corriente total al conectar en paralelo una resistencia a una conexión en serie y mantener constante la tensión?
- ¿Cómo varía la intensidad de la corriente total al conectar en serie una resistencia a una conexión en paralelo y mantener constante la tensión?
- Una fuente de tensión de  $U = 12 \text{ V}$  alimenta una conexión en serie con  $R_1 = 82 \Omega$  y  $R_2 = 22 \Omega$ .
  - ¿Cuánto vale la intensidad de la corriente?
  - ¿Cuánto vale la intensidad de la corriente total si se conecta en paralelo a esta conexión en serie una tercera resistencia  $R_3 = 47 \Omega$ ?
- Dos resistencias  $R_1 = 39 \Omega$  y  $R_2 = 18 \Omega$  se conectan en paralelo a  $6 \text{ V}$ . Posteriormente debe cambiarse la fuente de tensión por otra con una tensión de  $10 \text{ V}$ . Como las corrientes que circulan por las resistencias no deben variar, se conecta una tercera resistencia  $R_3$  en serie con las dos conectadas en paralelo. ¿Cuánto debe valer  $R_3$ ?
- Calcular la resistencia equivalente del circuito representado en la figura 4.23.

## 5. Medida de resistencias eléctricas

### 5.1. Medida indirecta de resistencias con un voltímetro y un amperímetro

#### 5.1.1. Circuito con error en la tensión

Queremos comprobar el valor de la resistencia eléctrica de la figura 5.1. Sin embargo, carecemos de un instrumento de medida que indique directamente el valor de la resistencia (óhmetro). Por ello debemos realizar medidas de tensión e intensidad, y calcular la resistencia eléctrica a partir de los valores medidos. El circuito de medida es el de la figura 5.2. En este método de medida debe elegirse la tensión de modo que no sobrecarguemos la resistencia.



Los valores medidos son  $U = 8,5 \text{ V}$  e  $I = 9,5 \text{ mA}$ . Con ellos podemos calcular la resistencia:

$$R = \frac{U}{I}$$
$$R = \frac{8,5 \text{ V}}{0,0095 \text{ A}}$$
$$R = 895 \Omega$$

Según el código de colores la resistencia tiene un valor de  $820 \Omega$ . No obstante el valor calculado es considerablemente mayor. Incluso teniendo en cuenta la tolerancia (en este caso del 5 %) es excesivo el valor calculado.

Partiendo del supuesto de que el valor de la resistencia se encuentra dentro del margen de tolerancia, esto es entre  $779 \Omega$  y  $861 \Omega$ , la excesiva desviación sólo puede ser debida a los valores medidos.

Todo instrumento de medida presenta una resistencia interna. Cuando se le

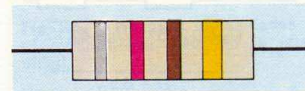


Fig. 5.1.

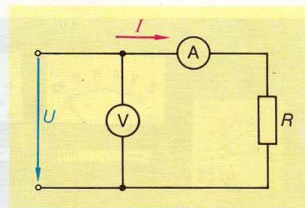


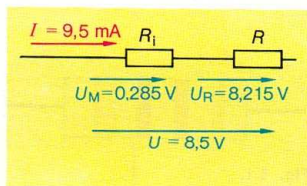
Fig. 5.2. Circuito para medir una resistencia (conexión con error en la tensión).

utiliza en una medida circula una corriente a través del instrumento, o sea a través de su resistencia interna. Esta corriente provoca una caída de tensión.

El circuito de medida de la figura 5.2 muestra que el amperímetro está conectado en serie con la resistencia. Por ambos circula la misma corriente.

En la figura 5.3 están representados los valores de tensiones e intensidades. En el presente ejemplo el amperímetro tiene una resistencia interna  $R_i = 30 \Omega$ , en la que cae por tanto una tensión  $U_M = 0,285 \text{ V}$ . Para obtener la tensión en la resistencia hay que restar esta tensión  $U_M$  que cae en el instrumento de medida de la tensión aplicada, que es la que medimos.

La resistencia se encuentra, pues, sometida a una tensión  $U_R = 8,215 \text{ V}$ . Entonces el valor de la resistencia es:



$$R = \frac{U_R}{I}$$

$$R = \frac{8,215 \text{ V}}{0,0095 \text{ A}}$$

$$R = 865 \Omega$$

Fig. 5.3. Intensidad y tensiones en la conexión con error en la tensión.

En el circuito de medida de la figura 5.2 el voltímetro para calcular la resistencia indica una tensión errónea. Por ello denominamos a este circuito **circuito con error en la tensión**.

#### 5.1.2. Circuito con error en la intensidad

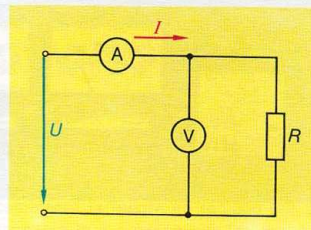
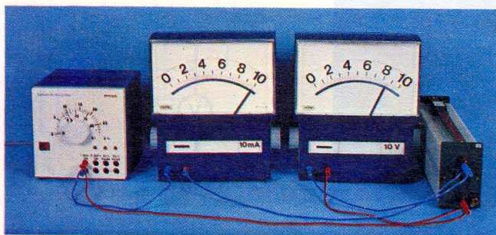


Fig. 5.4. Circuito para medir una resistencia (conexión con error en la intensidad).

Si conectamos el voltímetro directamente en paralelo con la resistencia (fig. 5-4), la tensión que midamos será correcta. Pero, sin embargo, como por el voltímetro también circula una corriente, el amperímetro indicará ahora una intensidad errónea para calcular la resistencia. De aquí el nombre de **circuito con error en la intensidad**.

Utilizamos los mismos instrumentos de medida que en el caso anterior. Los valores medidos son ahora  $U = 8,5 \text{ V}$  e  $I = 9,9 \text{ mA}$ .

La resistencia interna del voltímetro vale  $100 \text{ k}\Omega$ . Como está sometido a la misma tensión que la resistencia, por él circulará una corriente de intensidad.

$$I_M = \frac{U}{R_i}; \quad I_M = \frac{8,5 \text{ V}}{100000 \Omega}; \quad I_M = 0,085 \text{ mA}$$

La intensidad de la corriente que circula por la resistencia es igual a la intensidad total menos la que circula por el voltímetro. En la figura 5.5 hemos

indicado los valores de intensidades y tensión. Mediante la ley de Ohm podemos calcular el valor de la resistencia:

$$R = \frac{U}{I}$$

$$R = \frac{8,5V}{0,009815 A}$$

$$R = 866 \Omega$$

Cuando se determina el valor de una resistencia mediante medidas de tensión y corriente debe tenerse en cuenta en las fórmulas el error provocado o bien por el amperímetro o bien por el voltímetro.

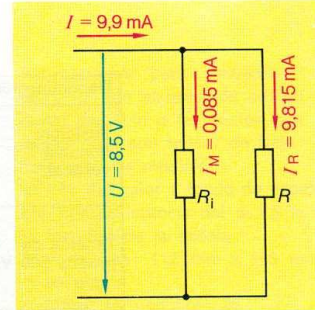


Fig. 5.5. Tensión e intensidades en el circuito con error en la intensidad.

**Circuito con error en la tensión**

$$R = \frac{U - I \cdot R_{i(U)}}{I}$$

**Circuito con error en la intensidad**

$$R = \frac{U}{I - \frac{U}{R_{i(I)}}$$

U: tensión medida  
I: intensidad medida

$R_{i(I)}$ : Resistencia interna del amperímetro

$R_{i(U)}$ : Resistencia interna del voltímetro

En la mayoría de los casos no se precisa una excesiva exactitud de la medida, y entonces podemos prescindir en general de las correcciones en las dos fórmulas.

En el ejemplo siguiente vamos a calcular la resistencia sin correcciones.

Circuito con error en la tensión:

$$R = \frac{U}{I}$$

$$R = \frac{8,5V}{0,0095 A}$$

$$R = 895 \Omega$$

Circuito con error en la intensidad:

$$R = \frac{U}{I}$$

$$R = \frac{8,5V}{0,0099 A}$$

$$R = 859 \Omega$$

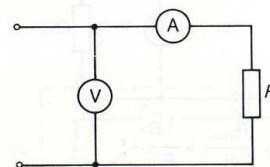
El resultado de la medida con el circuito con error en la intensidad es el que más se aproxima al valor correcto de la resistencia. Existe un criterio según el cual podemos decidir cuál de los dos circuitos es el más conveniente en cada caso.

En el **circuito con error en la tensión** el error se produce al conectar el amperímetro en serie con la resistencia. El error será tanto menor cuanto menor sea la caída de tensión en el amperímetro en relación con la tensión en la resistencia.

El error será tanto menor cuanto menor sea  $\frac{R_{i(I)}}{R}$

En el **circuito con error en la intensidad** el error se produce al conectar el voltímetro en paralelo con la resistencia. El error será tanto menor cuanto menor sea la intensidad de la corriente que circula por el voltímetro en relación con la de la corriente por la resistencia.

**Circuito con error en la tensión**

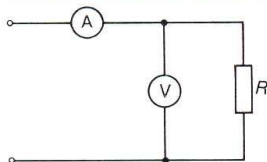


cuando  $\frac{R}{R_{i(U)}} > \frac{R_{i(I)}}{R}$

Tabla 5.1: Símbolos para la caracterización de instrumentos de medidas eléctricos

Denominación	Símbolo	Denominación	Símbolo	Denominación	Símbolo
Posición nominal vertical		Posición nominal horizontal		Posición nominal inclinada Ángulo de inclinación, p. ej., 60°	
Tensión de prueba 500 V		Tensión de prueba mayor que 500 V, p. ej., 2 kV		Sin prueba de tensión	
Corriente continua		Corriente alterna		Corriente continua y alterna	
Corriente trifásica		Instrumento de bobina móvil con imán permanente		Instrumento de medida de cocientes con bobina móvil	
Instrumento de hierro móvil		Instrumento de medida electrodinámico, sin hierro		Instrumento de medida electrodinámico, con hierro blindado	
Instrumento de medida de cocientes electrodinámico, sin hierro		Instrumento de medida de cocientes electrodinámico, con hierro blindado		Instrumento de medida electroestático	

## Circuito con error en la intensidad



cuando  $\frac{R_{i(I)}}{R} > \frac{R}{R_{i(U)}}$

El error será tanto menor cuanto menor sea  $\frac{R}{R_{i(U)}}$

Esto significa en la práctica: En base a las resistencias internas de los instrumentos de medida, datos que se conocen, y al valor esperado de la resistencia se comprueba con cuál de los dos circuitos se obtendrá un error mínimo. El circuito que dé el error menor es el que se utiliza.

## 5.1.3. Datos característicos de amperímetros y voltímetros

El método que acabamos de describir para determinar el valor de una resistencia mediante medidas de tensión y de intensidad implica que se utilicen los instrumentos de medida adecuados. Para ello es necesario conocer sus datos característicos.

Sobre la escala del instrumento se encuentran una serie de inscripciones con un determinado significado según la norma VDE 0410. El primer símbolo indica el tipo de instrumento. A continuación siguen como mínimo el símbolo de la clase, el símbolo sobre la posición en que debe utilizarse, el símbolo de la tensión de prueba y el del tipo de corriente.

Los instrumentos de medida se clasifican en instrumentos de uso industrial e instrumentos de precisión. El símbolo de la clase indica cuál es la máxima

desviación entre el valor indicado y el valor real, expresada en tanto por ciento del valor de fondo de escala.

	Signo de la clase			
	1	1,5	2,5	5
Instrum. de uso industrial	1	1,5	2,5	5
Instrum. de precisión	0,1	0,2	0,5	—

En el ejemplo del apartado 5.1.2. se trataba de un instrumento de uso industrial de la clase 1,5. Al medir la tensión se encontraba en la gama de 10 V (éste era el valor de fondo de escala). Por tanto el error máximo es un 1,5 % de 10 V, o sea, 0,15 V en más o en menos.

En ambos circuitos de medida indicó 8,5 V. Por tanto, el valor real de la tensión se encontraba entre 8,35 V y 8,65 V ( $8,5 V \pm 0,15 V$ ).

Los mismos razonamientos han de aplicarse también al amperímetro.

Los valores de las resistencias internas suelen encontrarse indicados en la parte posterior del instrumento. En la figura 5.6 hemos representado los datos de un polímetro.

La resistencia interna depende de la gama de medida conectada. En las gamas de medida de tensión suele existir un factor de conversión constante. En la figura 5.6 vale 4 kΩ/V. En la gama de medida de 30 V se obtiene la resistencia interna multiplicando este valor de fondo de escala por el factor:

$$R_{i(u)} = 30 V \cdot 4 \frac{k\Omega}{V} = 120 k\Omega$$

En las gamas de medida de intensidad suele indicarse para cada gama de medida la caída de tensión para el fondo de escala. Según la figura 5.6 será para 30 mA (10 mV):

$$R_{i(i)} = \frac{U_M}{I} = \frac{10 mV}{30 mA} = 0,333 \Omega$$

## 5.2. Medida directa de resistencias

Es posible también medir resistencias con **sólo un amperímetro** o con **sólo un voltímetro**.

### 5.2.1. Medida directa de resistencias según el principio de medida de la intensidad

Para realizar esta medida partamos del circuito de la figura 5.2. Si en este circuito conocemos exactamente la tensión de la fuente podemos prescindir de medir la tensión. El amperímetro puede calibrarse directamente en ohm. En la figura 5.7 hemos representado este circuito.

Para proteger el amperímetro calibrado en ohm y la fuente de tensión el **óhmetro** posee una resistencia en serie  $R_v$ , que limitará la corriente en caso de cortocircuito. Cuando la resistencia a medir sea  $R = 0 \Omega$  la corriente de medida presentará su máxima intensidad y la desviación de la aguja del instrumento será máxima. Sin embargo, cuando la resistencia sea infinita (circuito abierto) la intensidad de la corriente y la desviación de la aguja serán cero. Por tanto, las escalas de los óhmetros discurrirán **de derecha a izquierda** (figura 5.8).

Polímetro-mV para corriente continua con sistema de cuadro móvil sensible a la tensión con alojamiento con tensor de fleje

Tolerancia de medición:  $\pm 1\%$  del valor a fondo de escala con una resistencia del  $\pm 1,5\%$  de la longitud de la escala

Dimensiones: 112 mm × 165 mm × 65 mm

Campos de medición: 26

3 mV	300 mV	30 V	$R_i = 4 k\Omega/V$
10 mV	1 V	100 V	
30 mV	3 V	300 V	
100 mV	10 V	1000 V	
300 μA (4 mV)	30 mA (10 mV)		
1 mA (7 mV)	100 mA (12 mV)		
3 mA (8 mV)	300 mA (15 mV)		
1 A (30 mV)			
3 A (50 mV)			
10 A (150 mV)			

Fig. 5.6. Datos de un polímetro.

### Óhmetro

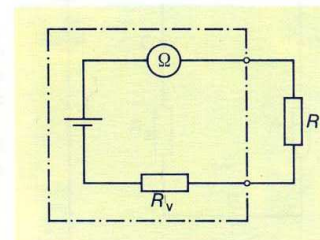


Fig. 5.7. Conexión de un óhmetro de indicación directa según el principio de medida de la intensidad.

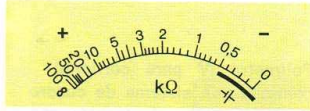


Fig. 5.8. Escala de un óhmetro según el principio de medida de intensidad.

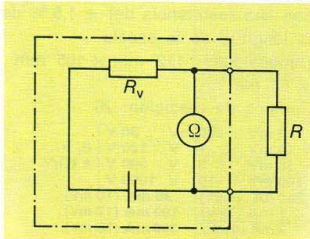


Fig. 5.9. Conexión de un óhmetro de indicación directa según el principio de medida de tensión.

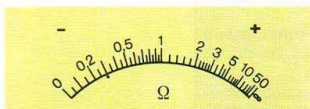
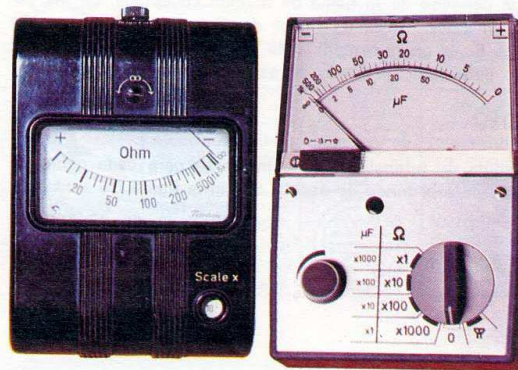


Fig. 5.10. Escala de un óhmetro según el principio de medida de tensión.

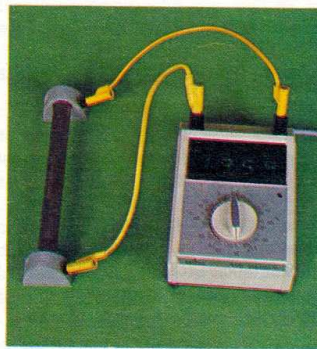
Fig. 5.11. Óhmetros.



medida debe efectuarse un ajuste para compensar las variaciones de tensión de la fuente. Para ello se unen los dos cables de conexión, o sea que se cortocircuita la entrada del instrumento de medida, y se ajusta la aguja a cero.



Fig. 5.12. Óhmetro de indicación digital.



### 5.2.2. Medida directa de resistencia según el principio de medida de la tensión

La medida de resistencias según el principio de la medida de la intensidad (descrita en 5.2.1) se emplea fundamentalmente para grandes valores resistivos, pues para resistencias pequeñas la fuente de la tensión se podría descargar con excesiva rapidez. Además la fuente de tensión podría sobrecargar la resistencia a medir.

Con el principio de medida de la tensión se obtiene una reducción de la tensión y también de la intensidad de medida. El circuito de medida está representado en la figura 5.9. El voltímetro calibrado en ohm se conecta en paralelo a la resistencia a medir. Los valores resistivos crecen de izquierda a derecha (fig. 5.10).

### 5.2.3. Instrumentos de indicación directa utilizados en la práctica

Para la determinación de resistencias, también de las de paso, se utilizan por ejemplo los instrumentos representados en la figura 5.11. Antes de cada



Fig. 5.13. Instrumento para medir aislamientos.

Junto a los instrumentos descritos hasta aquí existen otros con indicación digital directa (fig. 5.12).

La medida del grado de aislamiento posee una importancia especial. Se trata de una medida de resistencia en la gama de grandes valores óhmicos. Según las normas vigentes la tensión de medida debe ser una tensión continua. Debe ser de igual valor que la tensión de la red de la instalación, pero como mínimo 500 V. En la figura 5.13 hemos representado un aparato de medida que cumple estos requisitos. En general este tipo de aparatos no son adecuados para medir conductores y componentes debido a las elevadas tensiones a las que funcionan.

### 5.3. Medida de resistencias mediante puentes

#### 5.3.1. Principio de medida de un circuito puente

El circuito de la figura 5.14 se compone de dos circuitos en serie de dos resistencias ( $R_1$  en serie con  $R_2$ , y  $R_3$  en serie con  $R_4$ ) conectados en paralelo a una fuente de tensión común.

La corriente de intensidad  $I_1$  circula tanto por  $R_1$  como por  $R_2$ , y la corriente  $I_3$ , por  $R_3$  y también por  $R_4$ . Entre los puntos A y B se encuentra aplicada la tensión de la batería. Esta tensión queda dividida por las resistencias  $R_1$  y  $R_2$  en  $U_{AC}$  y  $U_{CB}$ .

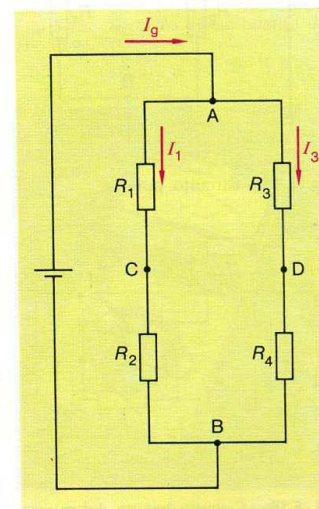
También se produce una división de la tensión en las resistencias  $R_3$  y  $R_4$ , que dan lugar a las tensiones  $U_{AD}$  y  $U_{DB}$ . En el **circuito puente** se conecta un amperímetro entre los puntos C y D (ver fig. 5.15). Este instrumento no indicará el paso de corriente cuando entre los puntos C y D no exista tensión. En este caso se dice que el puente está equilibrado o ajustado.

Vamos a estudiar ahora las condiciones necesarias para que el puente esté equilibrado, condiciones que nos permitirán comprender el principio de medida de resistencias mediante un circuito puente.

Para las cuatro resistencias tenemos:

$$\begin{aligned} U_{AC} &= I_1 \cdot R_1 & U_{CB} &= I_1 \cdot R_2 \\ U_{AD} &= I_3 \cdot R_3 & U_{DB} &= I_3 \cdot R_4 \end{aligned}$$

La condición de equilibrio es:  $U_{CD} = 0$ .



Un Fig. 5.14. Alva SENATI — Abanca

Prof. Edoán Gamazza Romanes



Esta condición se cumplirá cuando  $U_{AC} = U_{AD}$  y  $U_{CB} = U_{DB}$ , o sea cuando la tensión de la batería quede dividida en la misma proporción en las dos ramas del puente.

$$\frac{U_{AC}}{U_{CB}} = \frac{U_{AD}}{U_{DB}}$$

Las tensiones pueden sustituirse por  $I \cdot R$ , y simplificar a continuación las intensidades:

$$\frac{I_1 \cdot R_1}{I_1 \cdot R_2} = \frac{I_3 \cdot R_3}{I_3 \cdot R_4}$$

**Condición de equilibrio del puente**

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$$

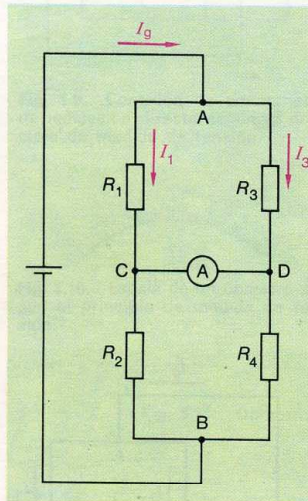


Fig. 5.15. Circuito puente.

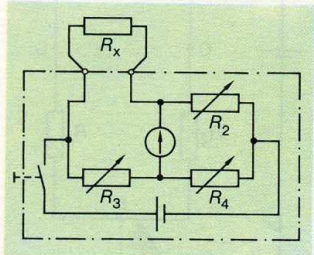


Fig. 5.16. Circuito básico del puente de Wheatstone.

### 5.3.2. Medida de resistencias mediante el puente de Wheatstone

La figura 5.16 muestra el circuito básico de un puente de Wheatstone.<sup>1</sup> En lugar de la resistencia  $R_1$ , se ha conectado la resistencia a medir  $R_x$ . Hay que ir modificando los valores de las resistencias  $R_2$ ,  $R_3$  y  $R_4$  hasta que el puente esté equilibrado. Si se conocen estas tres resistencias  $R_2$ ,  $R_3$  y  $R_4$  (fig. 5.16) se puede calcular la resistencia  $R_x$ :

$$R_x = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_4}$$

No es necesaria una tensión constante. Sólo hace falta que sea suficientemente grande para obtener un buen ajuste con el instrumento indicador.

Este modo de medir resistencias es en la práctica aún demasiado complicado. Más fácil de manejar es el **puente de Wheatstone de hilo** (fig. 5.17).

El ajuste del puente se consigue cambiando la resistencia de comparación  $R_v$ , por otras de diferentes valores y modificando la posición del cursor sobre el alambre resistivo  $R_s$ . Las resistencias  $R_3$  y  $R_4$  son resistencias fijas. En este tipo de puente la medida puede leerse directamente (fig. 5.17).

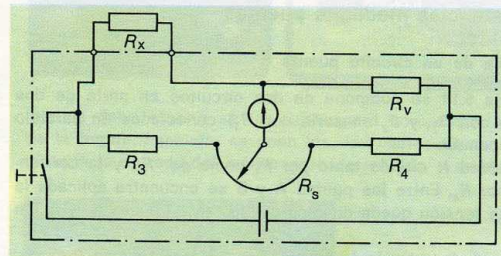


Fig. 5.17. Circuito de un puente de Wheatstone de hilo.

Los puentes de Wheatstone son adecuados para medir resistencias entre aproximadamente  $0,1 \Omega$  y aproximadamente  $1 \text{ M}\Omega$ .

### 5.3.3. Medida de resistencias con el puente de Thomson

El puente de Wheatstone no es apropiado para la medida de resistencias muy pequeñas porque en él la resistencia de los conductores que unen la re-

<sup>1</sup> Sir Charles Wheatstone, físico inglés, 1802-1875.

sistencia a medir  $R_x$  con los bornes del instrumento de medida falsearía el resultado. Sin embargo, los conductores pueden compensarse mediante resistencias adicionales. Un circuito sencillo del puente de Thomson<sup>1</sup> es el representado en la figura 5.19.

La resistencia a medir  $R_x$  se conecta al aparato, y con conductores iguales se conecta la resistencia de comparación  $R_v$  (puede ser un hilo resistivo).

Quando el puente está en equilibrio tenemos: 
$$\frac{R_5}{R_v} = \frac{R_3}{R_4} = \frac{R_5}{R_6}$$

Las resistencias internas se modifican de modo que se cumpla siempre la siguiente relación:

$$\frac{R_3}{R_4} = \frac{R_5}{R_6}$$

Los puentes de Thomson precisan una tensión de alimentación mayor que los de Wheatstone. Por ello deben alimentarse mediante una fuente de tensión exterior (por ejemplo, la red).

Los puentes de Thomson son apropiados para la medida de resistencias muy pequeñas con valores entre unos  $0,1 \mu\Omega$  y unos  $100 \Omega$ .

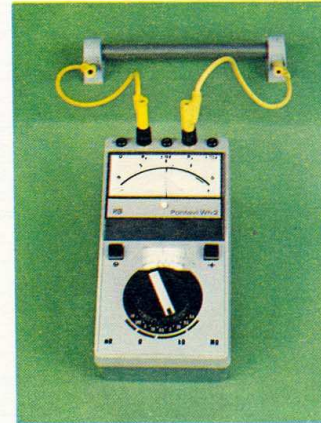
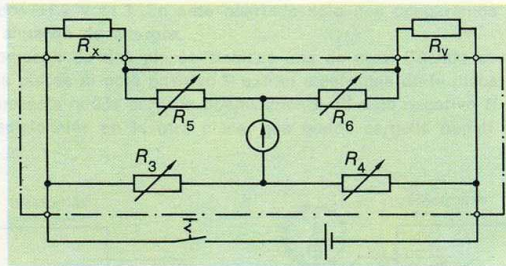


Fig. 5.18. Puente de medida de Wheatstone. Se accionan simultáneamente dos escalas, con lo que puede leerse directamente el valor medido.

Fig. 5.19. Circuito de un puente de Thomson.

**Ejercicios sobre 5**

1. Se debe determinar el valor de una resistencia mediante medidas de tensión e intensidad. La resistencia vale aproximadamente  $300 \Omega$ . El amperímetro posee una resistencia interna de  $10 \Omega$  y el voltímetro, de  $100\,000 \Omega$ . ¿Cuál es el circuito de medida a utilizar?
2. ¿Por qué discurre de derecha a izquierda la escala de un óhmetro (amperímetro calibrado en  $\Omega$ )?
3. ¿Cuáles son las condiciones de equilibrio de un puente?
4. ¿Por qué es nula la indicación del instrumento de medida de un puente equilibrado?
5. ¿Por qué es tan grande el error al medir resistencias muy pequeñas con el puente de Wheatstone?
6. ¿Para qué fines es más apropiado medir con un puente de Thomson que con uno de Wheatstone?
7. En un circuito con error en la intensidad se miden los siguientes valores:  $I = 200 \text{ mA}$  en la gama de medida de  $300 \text{ mA}$  ( $55 \text{ mV}$ ) y  $U = 5 \text{ V}$  en la gama de  $7 \text{ V}$  ( $100 \text{ k}\Omega/\text{V}$ ) (clase 0,5).

<sup>1</sup> Sir William Thomson (Lord Kelvin of Largs), físico inglés, 1824-1907.



Fig. 5.20. Puente de medida de Thomson.

Unidad Operativa Señali - Abanca

- a) ¿Cuánto vale la resistencia sin corrección?
  - b) ¿Cuánto vale la resistencia con corrección?
  - c) ¿Cuánto valdría la resistencia (sin corrección) si ambos instrumentos hubiesen indicado un 0,5 % de más?
  - d) ¿Cuánto valdría la resistencia (sin correcciones) si ambos instrumentos hubieran indicado un 0,5 % de menos?
  - e) ¿Cuánto valdría la resistencia si el amperímetro hubiera indicado un 0,5 % de más y el voltímetro un 0,5 % de menos?
8. ¿Cuáles serían los resultados del ejercicio 7 si se hubiera utilizado el circuito con error en la tensión?

## 6. Transmisión de la energía

### 6.1. Trabajo eléctrico

En toda fuente de tensión se transforma energía en energía eléctrica, dando lugar a la aparición de una carga eléctrica y una tensión eléctrica. La energía así obtenida debe poseer la capacidad de realizar un trabajo.

A continuación vamos a tratar más detenidamente el trabajo eléctrico. Para ello emplearemos un dispositivo que es capaz de almacenar una cantidad conocida de energía eléctrica: el condensador. Este componente será tratado exhaustivamente en los apartados 11.2 y 11.3. En este apartado sólo nos ocuparemos de su característica de almacén de energía.

El condensador se compone de dos placas aisladas una de otra. Cuando se conecta una tensión a las placas el polo positivo P extrae electrones de la placa conectada a él, con lo que ésta queda cargada positivamente. El polo negativo N «introduce» electrones adicionales en la otra placa, que queda cargada negativamente (ver fig. 6-1).

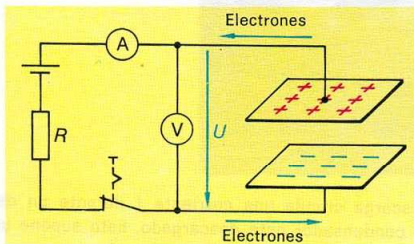


Fig. 6.1. Proceso de carga de un condensador.

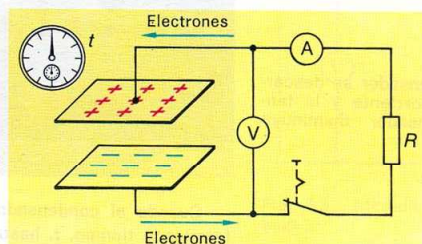


Fig. 6.2. Proceso de descarga de un condensador.

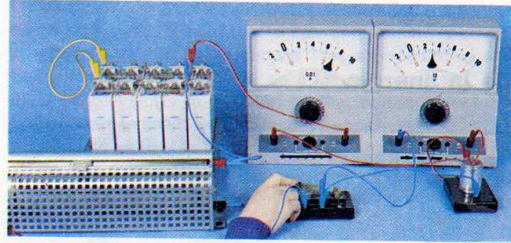
La carga negativa que se extrajo de la placa superior se encuentra almacenada en la inferior. Decimos que el condensador está cargado. Esto podemos demostrarlo con un voltímetro, que indicará la existencia de una tensión. Esta tensión perdurará aunque desconectemos la fuente de tensión del condensador. Por tanto, este último almacena energía eléctrica.

Según se vio en 1.4.2.1,  $E = U \cdot Q$ .

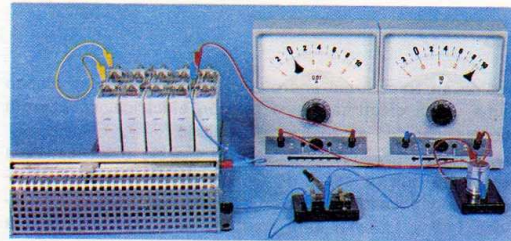
Esta energía eléctrica puede recuperarse como trabajo eléctrico si conectamos un circuito de consumo.

$$E = W \Rightarrow W = U \cdot Q$$

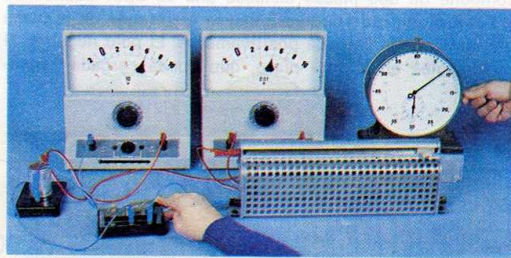
**Fig. 6.3.** El condensador se carga. Circula una corriente y la tensión del condensador aumenta. El condensador almacena energía.



**Fig. 6.4.** El circuito eléctrico queda interrumpido y no circula corriente. En el condensador se mide una tensión. Por tanto, ha almacenado energía.



**Fig. 6.5.** El condensador se descarga. Circula una corriente y la tensión del condensador disminuye con el tiempo.



Cuando el condensador se descarga circula una corriente  $I$  durante un determinado tiempo,  $t$ , hasta que el condensador esté descargado. Esto supone un movimiento de cargas.

Sabemos que:  $Q = I \cdot t$  (ver 1.5.2).

Por tanto, obtenemos para el trabajo eléctrico:

$$W = U \cdot Q$$

$$W = U \cdot I \cdot t$$

#### Trabajo eléctrico

Símbolo  $W$

$$W = U \cdot I \cdot t$$

$$[W] = \text{V A s}$$

$$[W] = \text{W s}$$

#### Trabajo es tensión por intensidad por tiempo

$$1 \text{ J} = 1 \text{ V} \cdot 1 \text{ A} \cdot 1 \text{ s}$$

El trabajo eléctrico y el mecánico tienen el mismo símbolo. ¿Coinciden también sus unidades? Vamos a comprobarlo comparándolas.

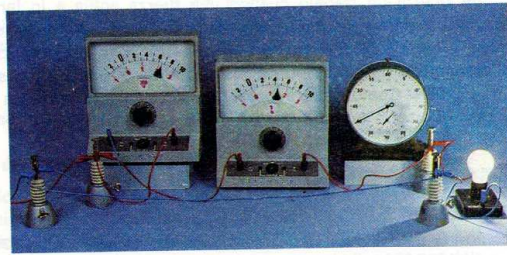
Trabajo mecánico	Trabajo eléctrico
$[W] = N \cdot m$	$[W] = V \cdot A \cdot s$
	$[W] = V \cdot A \cdot s \quad 1V = 1 \frac{Nm}{As}$
	$[W] = \frac{N \cdot m}{A \cdot s} \cdot A \cdot s$
	$[W] = N \cdot m$

El resultado muestra que ambas unidades son equivalentes. Por tanto:  
 $1 Nm = 1 V A s$

### 6.2. Medida del trabajo eléctrico

Para medir el trabajo mecánico realizado por un motor es necesario disponer de un gran aparato técnico. En cambio el trabajo eléctrico es fácil de medir. Para ello se precisan solamente un voltímetro, un amperímetro y un cronómetro, pudiéndose obtener el resultado por cálculos simples (fig. 6.6).

Todavía más sencillo es la utilización de un contador eléctrico. Este aparato se compone básicamente de un circuito de tensión (que equivale a un voltímetro) y de un circuito de intensidad (que equivale a un amperímetro). Ambos actúan sobre un dispositivo contador que indica el trabajo teniendo en cuenta el tiempo de conexión (fig. 6.7).



Contador eléctrico

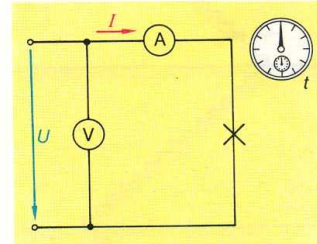


Fig. 6.6. Medida indirecta de trabajo.

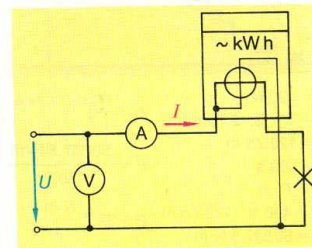
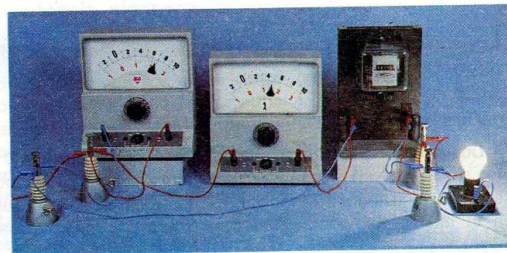


Fig. 6.7. Medida directa de trabajo (medidas de tensión e intensidad sólo como comprobación).



Fig. 6.8. Contador eléctrico.

La unidad de trabajo, y por tanto también la de trabajo eléctrico, es el joule. En electrotecnia se le llama también watt-segundo Ws (ver 6.3), pero como es muy pequeña, en problemas técnicos se han impuesto otras unidades mayores. Estas unidades son el watt-hora, Wh, y el kilowatt-hora, kWh.

$$1 \text{ Wh} = 3600 \text{ W s} = 3,6 \cdot 10^3 \text{ W s} = 3,6 \text{ kW s}$$

$$1 \text{ kWh} = 3600000 \text{ W s} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ W s} = 3,6 \text{ MW s}$$

Por ello los contadores eléctricos utilizados en la práctica suelen estar calibrados en kWh (fig. 6.8).

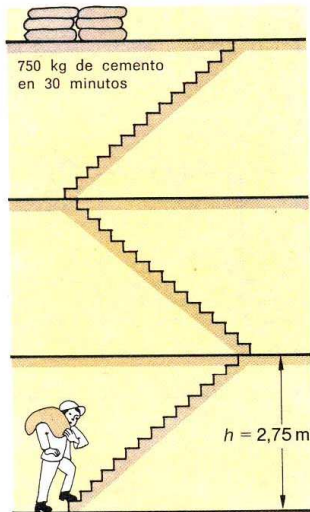
En la placa indicadora de un contador se encuentra indicada, junto a otras características como tensión, intensidad, etc., la constante del contador  $c_z$ .

Esta constante indica el número de revoluciones del disco contador que equivalen a 1 kWh.

Ejemplo:

$$c_z = 180 \frac{1}{\text{kWh}}$$

(180 revoluciones por kilowatt-hora)



$$F = 490 \text{ N}$$

$$h = 15 \cdot 3 \cdot 2,75 \text{ m}$$

$$h = 123,75 \text{ m}$$

$$t = 180 \text{ s}$$

$$W = F \cdot h$$

$$W = 490 \text{ N} \cdot 123,75 \text{ m}$$

$$W = 60637,5 \text{ N m}$$

$$P = \frac{W}{t}$$

$$P = \frac{60637,5 \text{ N m}}{1800 \text{ s}}$$

$$P = 33,7 \frac{\text{N m}}{\text{s}}$$

$$P = 33,7 \text{ W}$$

Fig. 6.9. Ejemplo de realización de trabajo mecánico.

### 6.3. Potencia eléctrica

Antes de poder hablar de la potencia eléctrica y de las magnitudes de las que depende debemos retroceder brevemente a la magnitud «trabajo».

Se realiza un trabajo cuando una fuerza actúa a lo largo de un camino. Por ejemplo, cuando un peón sube 500 kg de cemento al tercer piso (cada piso mide 2,75 m) de un edificio en construcción está realizando un trabajo. Para el transporte de cada uno de los sacos de 50 kg debe desarrollar una fuerza de unos 490 N. Como debe superar 10 veces la diferencia de alturas entre los tres pisos, recorrerá en total un camino  $h = 82,5 \text{ m}$ .

$$W = F \cdot h$$

$$W = 490 \text{ N} \cdot 82,5 \text{ m}$$

$$W = 40425 \text{ N m}$$

Por tanto, el peón ha desarrollado un trabajo de 40 425 Nm. Pero, ¿qué potencia ha desarrollado? Para calcularla hay que tener en cuenta además el tiempo que tardó. Si se dio prisa habrá desarrollado más potencia que si subió muy lentamente las escaleras. Pero en ambos casos habrá realizado el mismo trabajo.

La potencia es tanto mayor cuanto menor es el tiempo en que se realiza un trabajo.

Ahora podemos hacer un nuevo razonamiento:

Dos peones transportan durante 30 minutos ( $t = 1800 \text{ s}$ ) cemento al tercer piso ( $h = 8,25 \text{ m}$ ). El primero transporta en este tiempo 500 kg, mientras el segundo peón logra transportar 750 kg. Por tanto, el segundo peón ha realizado en el mismo tiempo más trabajo, o sea que habrá desarrollado una potencia mayor.

La potencia es tanto mayor cuanto mayor es el trabajo realizado y menor el tiempo necesario para ello.

La unidad de potencia es el **watt**.<sup>1</sup>  
 En la figura 6.9 podemos observar la actividad del segundo peón. También hemos calculado la potencia y el trabajo.  
 Para la potencia eléctrica tenemos las mismas relaciones que para la mecánica.

$$\text{Potencia} = \frac{\text{Trabajo}}{\text{Tiempo}}$$

El trabajo eléctrico es igual al producto de tensión por intensidad por tiempo (ver. 6.1). Sustituyamos esta expresión en la fórmula para calcular la potencia.

Potencia eléctrica	Trabajo eléctrico
$P = \frac{W}{t}$	$W = U \cdot I \cdot t$
$P = \frac{U \cdot I \cdot t}{t}$	

**Potencia eléctrica es tensión por intensidad**

$$1 \text{ W} = 1 \text{ V} \cdot 1 \text{ A}$$

**Órdenes de magnitud de las potencias de aparatos eléctricos**

Micrófono	p. ej.	0,000 000 005 W
Radio portátil	p. ej.	5 W
Televisor en color	aprox.	100 W
Bombilla (220 V)	p. ej.	100 W
Frigorífico	aprox.	120 W
Horno eléctrico	aprox.	10 000 W
Locomotora eléctrica	p. ej.	1 000 000 W

**Órdenes de magnitud de las potencias de centrales eléctricas**

Central hidroeléctrica	124 000 kW
Central termoeléctrica	356 000 kW
Central hidroeléctrica de agua acumulada	440 000 kW
Central nuclear	670 000 kW

**6.4. Medida de la potencia eléctrica**

La fórmula para calcular la potencia eléctrica ya muestra que es muy fácil medir potencias eléctricas. Solamente se necesitan un amperímetro y un voltímetro. Multiplicando los dos valores medidos se obtiene la potencia (fig. 6.10).

Sin embargo, para aplicaciones técnicas existen también aparatos en los que el voltímetro y el amperímetro actúan sobre la misma aguja indicadora, con lo que puede leerse directamente la potencia (fig. 6.11).

Un watímetro eléctrico, esto es, un aparato para medir la potencia, tiene una estructura más sencilla que un contador eléctrico. No tiene ningún dispositivo contador aunque sí posee un circuito de tensión y uno de intensidad (fig. 6.11) igual que el contador.

<sup>1</sup> James Watt, ingeniero inglés, 1736-1819.

**Potencia mecánica**

Símbolo  $P$   
 Símbolo de la unidad  $W$

$$P = \frac{W}{t} \quad P = \frac{F \cdot s}{t}$$

$$1 \text{ W} = 1 \frac{\text{N m}}{\text{s}}$$

$$[P] = \frac{\text{N m}}{\text{s}}$$

**Potencia eléctrica**

Símbolo  $P$   
 Símbolo de la unidad  $W$

$$P = U \cdot I$$

$$[P] = \text{V A}$$

**Watímetro**





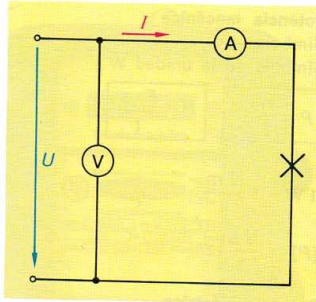


Fig. 6.10. Medida indirecta de potencia.

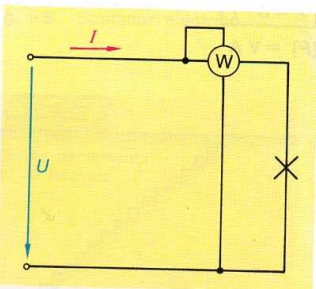
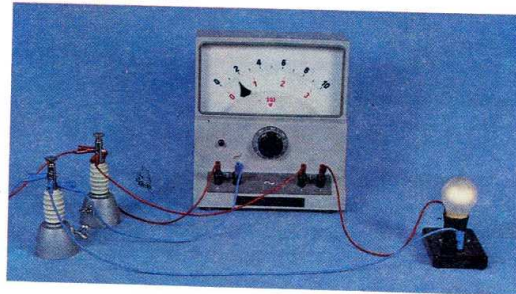


Fig. 6.11. Medida directa de potencia.



Al conectar un watímetro debe prestarse especial cuidado en no intercambiar los dos circuitos. El **circuito de tensión** presenta una **gran resistencia** y debe conectarse a la tensión total aplicada. El **circuito de intensidad** presenta una **pequeña resistencia** y debe conectarse en el circuito por el que pasa la corriente. Si se le conectara a la tensión total, podría circular por él una corriente tan intensa que el aparato quedaría deteriorado.

Un aparato de medida puede resultar dañado incluso aunque esté conectado correctamente y su aguja no indique el valor máximo. Este caso puede darse sobre todo en los instrumentos conmutables. Vamos a explicarlo con un ejemplo:

En un watímetro el circuito de tensión se ajusta a la gama de 300 V y el circuito de intensidad, a la de 1 A. Por tanto, el margen de medida es de 300 W.

La carga cuya potencia se debe medir se encuentra sometida a 100 V y por ella circula una corriente de 2,5 A. El instrumento de medida indica el valor correcto, o sea, 250 W.

El valor medido se encuentra dentro del margen de medida del watímetro. Sin embargo, éste quedará dañado, pues su circuito de intensidad está sobrecargado en un 150 %.

Otro método muy sencillo de medir la potencia de una carga es la determinación mediante un contador eléctrico, como se ha representado en la figura 6.13. Por ejemplo, si tenemos que controlar el consumo de potencia de un

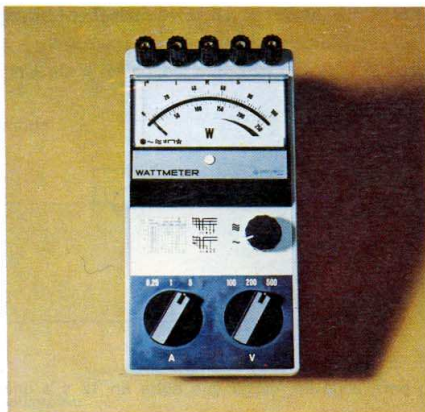


Fig. 6.12. Watímetro.

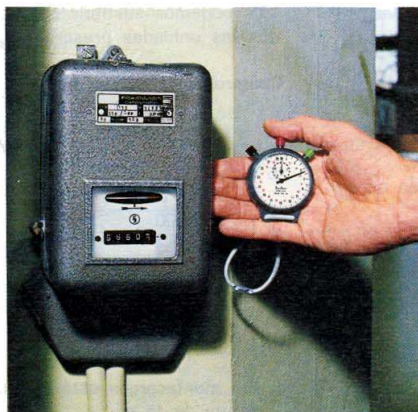


Fig. 6.13. Determinación de la potencia con un contador y un cronómetro.

tostador eléctrico en una vivienda y no disponemos de watímetro, será suficiente un cronómetro (también puede servir un reloj con segundero).

**Realización de las medidas**

Conectemos a la instalación exclusivamente el aparato cuyo consumo de potencia queramos medir; en nuestro caso, pues, el tostador eléctrico. El giro del disco del contador indica que el aparato está funcionando. La marca roja del disco nos permite contar el número de revoluciones. Mediremos el tiempo que transcurre durante un número determinado de revoluciones.

**Ejemplo:**

La constante del contador vale  $c_z = 180 \frac{1}{\text{kWh}}$ . El disco del contador precisa 100 s para efectuar 10 revoluciones.

Por tanto el tostador eléctrico consume durante los 100 s un trabajo eléctrico  $W = \frac{10}{180} \text{ kWh} = 0,06 \text{ kWh}$ .

Tenemos, pues, para la potencia:

$$P = \frac{W}{t}$$

$$P = \frac{0,06 \text{ kW h}}{100 \text{ s}}$$

Transformamos los 100 s en horas h para poder simplificar:

$$P = \frac{0,06 \text{ kW h}}{0,03 \text{ h}} \quad 100 \text{ s} = \frac{100}{3600} \text{ h} = 0,03 \text{ h}$$

(redondeado)

$$P = 2 \text{ kW}$$

Para la determinación de potencias con un contador podemos utilizar directamente una fórmula. Como también se trata de una ecuación con unidades,

Unidad Operativa SENATI – Abancay

Prof. Efraín Gamarra Samanez  
I.C.E.E. (A)

**Determinación de potencias mediante un contador**

$$P = \frac{n \cdot 3600}{t \cdot c_z}$$

$n$ : número de revoluciones en el tiempo medido  $t$

$t$ : tiempo de revolución en s

$c_z$ : constante del contador en  $\frac{1}{\text{kWh}}$

$P$ : potencia calculada en kW

sólo podemos sustituir las magnitudes que aparecen en la fórmula por valores con las unidades prescritas.

**Comprobación del ejemplo:**

$$n = 10 \quad t = 100 \text{ s} \quad c_z = 180 \frac{1}{\text{kWh}}$$

$$P = \frac{n \cdot 3600}{t \cdot c_z}$$

$$P = \frac{10 \cdot 3600}{100 \cdot 180} \text{ kW}$$

$$P = 2 \text{ kW}$$

**Ejercicios sobre 6.1 a 6.4**

- Un montacargas está calculado para 2000 kg, carga que sube en 12 s a una altura de 15 m.
  - ¿Qué trabajo realiza en cada subida?
  - ¿Cuánto vale la potencia?
- Un motor de corriente continua a 220 V está funcionando durante 10 horas. La intensidad nominal vale 41,6 A.
  - ¿Cuánto vale la potencia consumida?
  - ¿Qué trabajo eléctrico ha desarrollado?
- Un aparato eléctrico de 220 V está 6 minutos en funcionamiento. El disco del contador eléctrico efectúa durante este tiempo 72 revoluciones.

$$c_z = 360 \frac{1}{\text{kWh}}$$

- ¿Qué energía consume en los 6 minutos?
  - ¿Cuánto vale la potencia consumida?
  - ¿Cuánto vale la intensidad?
  - ¿Qué energía consumiría en 3 horas?
- Razonar por qué la magnitud tiempo no aparece en la fórmula de la potencia eléctrica.
  - ¿Qué ocurre si se conecta el circuito de tensión de un watímetro en el circuito principal por donde circula la corriente?
  - ¿Qué ocurre cuando se somete el circuito de intensidad de un watímetro a la tensión total?
  - ¿Qué indicará un watímetro si no se conecta su circuito de tensión? Razonar la respuesta.

**6.5. Potencia en un circuito eléctrico****6.5.1. Potencia eléctrica en una resistencia**

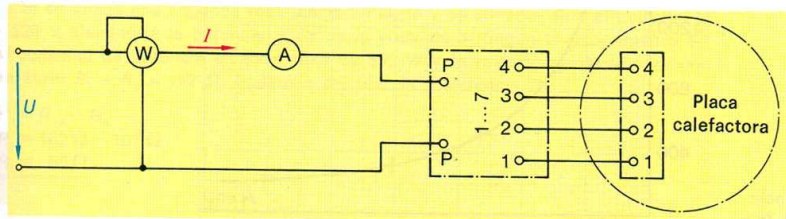
La misión principal de las técnicas energéticas eléctricas es el transporte y la transformación de la energía eléctrica. A continuación vamos a estudiar un circuito en el que se transforma energía eléctrica en energía térmica. Este es el caso, por ejemplo, en cualquier cocina eléctrica.

Con un conmutador de 7 posiciones (una posición de desconexión y seis diferentes posiciones de conexión) se gobierna la potencia de la placa calefactora.

**Experimento 6-1:**

**Relación entre la intensidad de la corriente y la potencia en una placa de cocina eléctrica**

**Montaje**



**Realización**

La placa calefactora con  $P = 2000 \text{ W}$  se conecta a su tensión nominal  $U = 220 \text{ V}$ . Para cada una de las 7 posiciones del conmutador se miden la potencia y la intensidad de la corriente.

N.º	1	2	3	4	5	6	7
Posición	0	0•1	1	1•2	2	2•3	3
$P$ en W	0	200	300	450	950	1400	2000
$I$ en A	0	0,91	1,36	2,05	4,32	6,36	9,1
$R = \frac{U}{I}$ en $\Omega$	$\infty$	242	162	107	51	34,6	24,2

$U = \text{constante} \quad U = 220 \text{ V}$

Los valores medidos confirman la ley que dedujimos en 6.3.

Quando la tensión es constante la intensidad es directamente proporcional a la potencia.

Quando en un circuito eléctrico a tensión constante se modifica la intensidad de la corriente, la única causa posible es una variación de la resistencia. Por tanto, al accionar el conmutador de 7 posiciones hemos modificado la resistencia de la placa calefactora.

La realización técnica de esta variación será explicada en los apartados 6.5.2 y 6.5.3. Aquí vamos a limitarnos a estudiar en qué medida se modifica la resistencia y qué consecuencias tiene sobre la potencia.

En la tabla de resultados del experimento 6-1 están calculados los valores resistivos de las diferentes posiciones del conmutador. Muestran claramente que la potencia aumenta cuando disminuye la resistencia. Un estudio más exacto demuestra que entre ambas magnitudes existe una proporcionalidad inversa, que puede observarse en la gráfica (fig. 6.14) correspondiente al experimento 6-1.

La potencia en una carga sometida a tensión constante es inversamente proporcional a la resistencia.

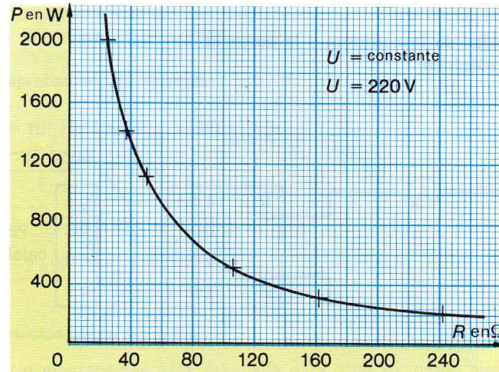


Fig. 6.14. Gráfica de la potencia en función de la resistencia a tensión constante.

#### Potencia eléctrica

$$P = \frac{U^2}{R}$$

$$[P] = \frac{V^2}{\Omega}$$

La proporcionalidad inversa puede expresarse mediante una fórmula que deducimos matemáticamente a continuación

$$P = U \cdot I \quad I = \frac{U}{R}$$

$$P = U \cdot \frac{U}{R}$$

Esta fórmula no sólo confirma la proporcionalidad inversa entre la potencia y la resistencia, sino que también expresa que la potencia crece con el cuadrado de la tensión.

La potencia eléctrica es proporcional al cuadrado de la tensión aplicada e inversamente proporcional a la resistencia. Cuanto menor sea la resistencia de la carga tanto mayor será su consumo de potencia.

Como la intensidad de la corriente también depende de la tensión y de la resistencia, podremos asimismo calcular la potencia con ayuda de la intensidad.

Si en la fórmula de partida sustituimos  $U$  por  $I \cdot R$ , obtenemos una tercera fórmula para la potencia, de gran importancia en la práctica:

$$P = U \cdot I \quad U = I \cdot R$$

$$P = I \cdot R \cdot I$$

$$P = I^2 \cdot R$$

$$[P] = A^2 \Omega$$

En resumen, la potencia se puede calcular con las tres fórmulas siguientes:

$$P = U \cdot I$$

$$P = \frac{U^2}{R}$$

$$P = I^2 \cdot R$$

#### 6.5.2. Potencia eléctrica en una conexión serie

Las dos primeras posiciones del conmutador de la placa de la cocina eléctrica dan lugar a sendas conexiones en serie.

La figura 6.15 muestra el circuito completo. La placa calefactora posee tres resistencias, de diferentes valores, que pueden interconectarse de diferentes modos con el conmutador de 7 posiciones. La única función de éste es establecer las uniones correspondientes entre  $P_1$ ,  $P_2$  y 1, 2, 3, 4.

La figura 6.16 muestra las conexiones de las tres primeras posiciones del conmutador junto con una representación clara de las conexiones de las resistencias.

En la posición intermedia 1 • 2 sólo se encuentra conectada la resistencia  $R_2$ , que vale  $107 \Omega$  (ver experimento 6-1). Esta resistencia consume a 220 V una potencia de 450 W.

Si se añade una segunda resistencia en serie y se conecta este circuito serie a 220 V, disminuirá la potencia. Esta es la posición 1. Según el experimento 6-1 el consumo de potencia en este caso es 300 W y la resistencia de la conexión en serie  $R_1 + R_2 = 162 \Omega$ . Podemos calcular la resistencia  $R_1$ :

$$R_1 = R_{12} - R_2$$

$$R_1 = 162 \Omega - 107 \Omega$$

$$R_1 = 55 \Omega$$

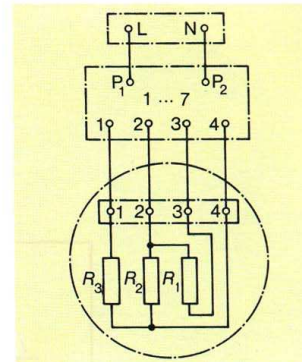
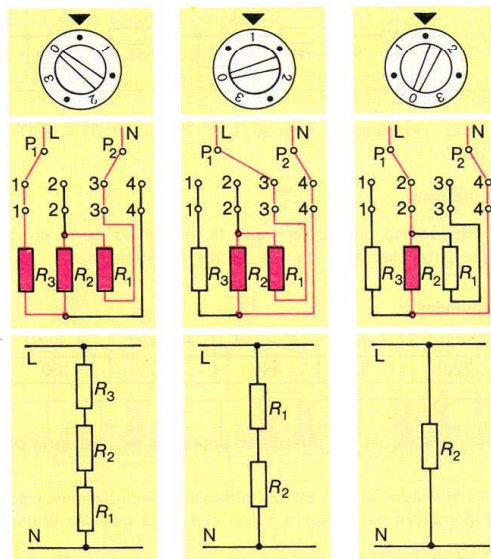


Fig. 6.15. Placa de una cocina eléctrica con conmutador de 7 posiciones.

Fig. 6.16. Posiciones 0 • 1, 1 y 1 • 2 en una cocina eléctrica con conmutador de 7 posiciones.

En la posición 0 • 1 se conectan las resistencias  $R_1$ ,  $R_2$  y  $R_3$  en serie a 220 V. Ahora la resistencia vale  $242 \Omega$  y el consumo de potencia, 200 W.

$$R_3 = R_{123} - R_{12}$$

$$R_3 = 242 \Omega - 162 \Omega$$

$$R_3 = 80 \Omega$$

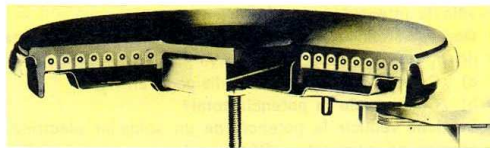


Fig. 6.17. Sección de una placa calefactora.

Unidad Operativa SENATI - Abanca

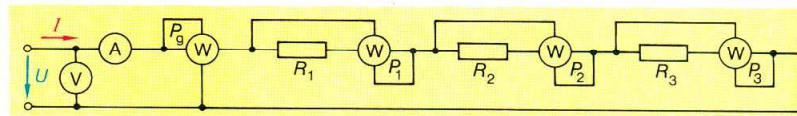


Cuando se añaden resistencias a una conexión en serie disminuye la potencia consumida ( $U = \text{constante}$ ).

Vamos a investigar ahora cuál es el consumo de potencia de las diversas resistencias en la conexión en serie. Para ello podríamos estudiar la placa calefactora en la primera posición del conmutador. Como esto sería relativamente laborioso, pues deberíamos desmontar y abrir la instalación de las placas en la cocina, hagamos el estudio con un circuito experimental montado en el laboratorio.

### Experimento 6-2: Potencia en una conexión en serie

#### Montaje



Tres resistencias  $R_1 = 20 \Omega$ ,  $R_2 = 40 \Omega$  y  $R_3 = 50 \Omega$  se conectan en serie a 220 V.

#### Realización

Mediremos la tensión total, la intensidad de la corriente, la potencia total y las potencias de cada una de las resistencias.

#### Resultados

$U$ en V	$I$ en A	$P_c$ en W	$P_1$ en W	$P_2$ en W	$P_3$ en W
220	2	440	80	160	200

#### Potencia de la conexión en serie

$$P_c = P_1 + P_2 + \dots + P_n$$

La suma de las diferentes potencias es igual a la potencia total.

La resistencia  $R_3 = 50 \Omega$  (la mayor) disipa la mayor potencia, pues a la misma intensidad de corriente es en ella en la que cae la mayor tensión.

En la conexión en serie el consumo de potencia y la resistencia son directamente proporcionales.

Los resultados de las medidas pueden controlarse mediante cálculo.

#### Ejercicios sobre 6.5.1 y 6.5.2

- Una plancha eléctrica de 220 V consume una potencia de 1000 W. ¿Cuánto vale la intensidad de la corriente?
- Dos resistencias  $R_1 = 40 \Omega$  y  $R_2 = 80 \Omega$  están conectadas en serie, disipando  $R_1$  una potencia  $P_1 = 45 \text{ W}$ .
  - ¿Cuánto vale la potencia disipada en  $R_2$ ?
  - ¿Cuánto vale la potencia total?
- Se debe reducir la potencia de un soldador eléctrico. La tensión de la red permanece constante. ¿Cómo podemos conseguirlo?



4. Debemos conectar una bombilla de 110 V, 100 W a 220 V mediante una resistencia en serie.
  - a) ¿Cuánto debe valer la resistencia en serie?
  - b) ¿Qué potencia disipa la resistencia?
  - c) En este nuevo circuito, ¿disminuirá la luminosidad de la bombilla?
5. Dos resistencias de caldeo iguales conectadas en serie a 220 V disipan en total 15 W.
  - a) ¿Cuánto vale la intensidad de la corriente?
  - b) ¿Cuánto vale la resistencia equivalente de la conexión en serie?
  - c) ¿Cuál es el valor óhmico de una de las resistencias?
  - d) ¿Qué potencia consumiría una sola de las resistencias si se la conectara directamente a 220 V?
6. Comprobar mediante cálculo los siguientes valores de magnitudes del experimento 6-2:  $I$ ,  $P_e$ ,  $P_1$ ,  $P_2$  y  $P_3$ .

### 6.5.3. Potencia eléctrica de la conexión en paralelo

Las posiciones 2 • 3 y 3 del conmutador de la placa calefactora dan lugar a conexiones en paralelo. La figura 6.18 muestra las conexiones de las posiciones 2, 2 • 3 y 3 del conmutador junto con una representación clara de las correspondientes conexiones de las resistencias.

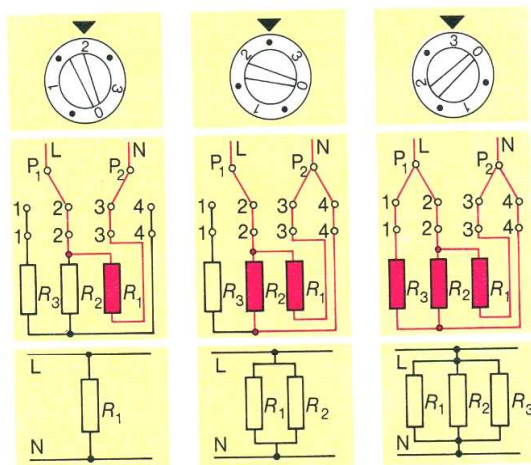


Fig. 6.18. Posiciones 2, 2 • 3 y 3 en una cocina eléctrica con conmutador de 7 posiciones.

En la posición 2 sólo está conectada la resistencia  $R_1 = 51 \Omega$  (ver experimento 6-2), que consume a 220 V una potencia de 950 W.

Si se conecta una segunda resistencia  $R_2$  en paralelo aumenta el consumo de potencia si la tensión permanece constante. Esto corresponde a la posición intermedia 2 • 3. En la posición intermedia 1 • 2 la resistencia  $R_2$  es la única que está conectada, disipando una potencia de 450 W. Por tanto, en la posición 2 • 3 hay que sumar la disipación de  $R_2$  a la de  $R_1$ .

$$P = P_{R_1} + P_{R_2}$$

$$P = 950 \text{ W} + 450 \text{ W}$$

$$P = 1400 \text{ W}$$

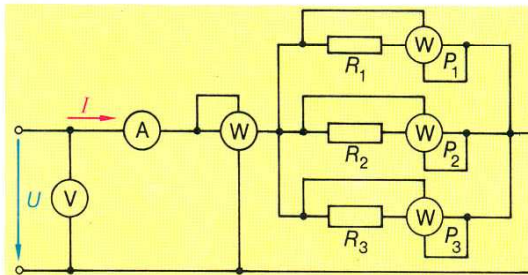
En la posición 3 del conmutador se añade la resistencia  $R_3$  en paralelo. Por tanto, la potencia disipada aumentará al sumarse la disipación en  $R_3$ , llegando en total a 2000 W.

Al añadir resistencias adicionales a una conexión en paralelo aumenta el consumo total de potencia ( $U = \text{constante}$ ).

Vamos a estudiar ahora la relación existente entre resistencia y consumo de potencia en la conexión en paralelo. Para ello nos servirá el experimento 6-3.

### Experimento 6-3: Potencia en una conexión en paralelo

#### Montaje



Tres resistencias  $R_1 = 20 \Omega$ ,  $R_2 = 40 \Omega$  y  $R_3 = 50 \Omega$  se conectan en paralelo a una tensión de 220 V.

#### Realización

Mediremos la tensión, la intensidad de la corriente, la potencia total y las potencias en cada una de las resistencias.

#### Resultados

$U$ en V	$I$ en A	$P_e$ in W
220	20,9	4598

$P_1$ en W	$P_2$ en W	$P_3$ en W
2420	1210	968

#### Potencia de la conexión en paralelo

$$P_e = P_1 + P_2 + \dots + P_n$$

La suma de las diversas potencias es igual a la potencia total.

La resistencia  $R_1 = 20 \Omega$  (la menor) consume la mayor potencia.

En la conexión en paralelo la potencia disipada y la resistencia son inversamente proporcionales.

#### Ejercicios sobre 6.5.3

- Se conectan en paralelo dos resistencias  $R_1 = 40 \Omega$  y  $R_2 = 80 \Omega$ . La potencia disipada en la resistencia  $R_1$  vale  $P_1 = 45 \text{ W}$ .
  - ¿Qué potencia disipa  $R_2$ ?
  - ¿Cuánto vale la potencia total disipada?



- El circuito eléctrico de la cocina de una vivienda está protegido con un disyuntor para 10 A. Junto a otros aparatos menores se encuentran en la cocina un calentador de agua eléctrico, de 2000 W, y un tostador de 1700 W. Cada vez que se conectan simultáneamente los dos aparatos se dispara el disyuntor.  
¿Cómo podemos explicar este hecho?
- Dos resistencias conectadas en paralelo a 220 V disipan en total una potencia de 1800 W. Cuando se conecta una sola a 220 V disipa 1400 W.  
¿Cuánto valen las dos resistencias?
- Comprobar mediante cálculo los valores de las siguientes magnitudes del experimento 6-3:  $I$ ,  $P_c$ ,  $P_1$ ,  $P_2$  y  $P_3$ .

### 6.6. Rendimiento

Un motor eléctrico transforma energía eléctrica en energía mecánica. Simultáneamente se calienta; o sea, que también «produce» energía térmica. Por tanto, podemos llegar a la conclusión de que sólo una parte de la energía consumida se transforma en la energía mecánica deseada.

Toda máquina que transforme energía consume más de la que suministra.

Las pérdidas son la causa de este hecho. La figura 6.19 muestra esquemáticamente la división del trabajo consumido en pérdidas y trabajo útil.

Caracterizaremos el trabajo consumido por  $W_c$  (la potencia consumida por  $P_c$ ), el trabajo útil, por  $W_u$  (la potencia por  $P_u$ ) y las pérdidas de trabajo por  $W_p$  (las pérdidas de potencia por  $P_p$ ).

En los motores eléctricos las pérdidas son por un lado mecánicas (rozamientos de los cojinetes y resistencia del aire) y por otro lado eléctricas (pérdidas en los bobinados de cobre y pérdidas en el núcleo de hierro).

La suma de trabajo de pérdidas y del trabajo útil es el trabajo consumido.

$$W_c = W_u + W_p$$

Análogamente tenemos las potencias:  $P_c = P_u + P_p$ .

En las placas indicadoras de los motores se encuentran indicados, entre otros datos, la potencia, la tensión nominal y la intensidad nominal de la corriente del motor.

Por ejemplo:  $U = 220 \text{ V}$ ,  $I = 12,5 \text{ A}$ ,  $P = 2,2 \text{ kW}$ .

La potencia indicada en este caso es  $P_u = 2,2 \text{ kW}$ .

Por el motor conectado a 220 V circula una corriente de 12,5 A (suponiendo que suministre 2,2 kW). Por tanto la potencia consumida será:

$$\begin{aligned} P_c &= U \cdot I \\ P_c &= 220 \text{ V} \cdot 12,5 \text{ A} \\ P_c &= 2750 \text{ W} \end{aligned}$$

La potencia consumida vale 2750 W, y la potencia útil solamente 2200 W.  
¿Qué porcentaje de la potencia consumida se utiliza?

La respuesta a esta pregunta nos la da el rendimiento.

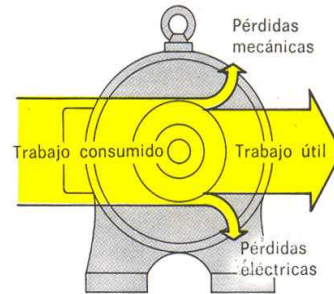


Fig. 6.19. División del trabajo consumido en trabajo útil y pérdidas de trabajo.

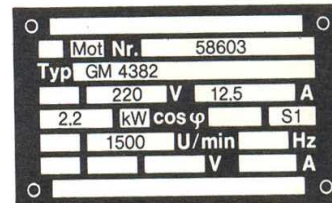


Fig. 6.20. Placa indicadora de un motor de corriente continua.

**Rendimiento**Símbolo  $\eta$ 

$$\eta = \frac{P_u}{P_c}$$

El rendimiento indica qué parte de la potencia consumida se transforma en potencia útil.

$$\eta = \frac{P_u}{P_c}$$

$$\eta = \frac{2200 \text{ W}}{2750 \text{ W}}$$

$$\eta = 0,8$$

Este resultado significa que:

un 80 % se utiliza, un 20 % son pérdidas, o sea que

2750 W se consumen = 100 %

2200 W se utilizan = 80 %

450 W se pierden = 20 %

La potencia consumida se iguala al 100 %.

La potencia útil debe ser siempre menor que el 100 %.

**Ejercicios sobre 6.6**

- Un montacargas eléctrico con motor de corriente continua suministra una potencia útil de 5,5 kW.
  - ¿Cuántos kg de carga puede elevar en 20 s a 4 m?
  - ¿Qué potencia consume la red si su rendimiento es del 82 %?
- Se debe comprar un motor para un ascensor, que debe elevar 1000 kg en 12 s a 3 m. Disponemos de una tensión continua de 400 V. Supongamos que el rendimiento del motor será del 78 %.
  - ¿Qué potencia útil debe suministrar el motor?
  - ¿Qué potencia consumirá el motor de la red?
  - ¿Cuál será la intensidad de la corriente en los cables?
- ¿Por qué el rendimiento es siempre menor que 1?

## 7. Calor eléctrico

### 7.1. Temperatura y calor

Antes de estudiar la obtención de calor mediante electricidad, sus leyes y fórmulas debemos explicar detenidamente las magnitudes físicas temperatura y calor.

Todas las sustancias, sean sólidas, líquidas o gaseosas, pueden calentarse. Su estado de agregación (sólido, líquido o gaseoso) depende del grado de calentamiento.

- Los alimentos y el agua se calientan en una casa con una cocina de gas, una eléctrica u otros aparatos eléctricos especiales.
- Para trabajar (forjar, fundir y soldar) los metales se les calienta con llamas o eléctricamente.
- Los cojinetes mal lubricados de máquinas se calientan debido al rozamiento.

En todos estos casos se transforman diferentes formas de energía en calor. Por tanto, sacamos la conclusión que:

El calor (cantidad de calor) es energía.

La unidad de calor es el **joule**.

**Calor**

Símbolo  $Q$

Símbolo de la unidad J

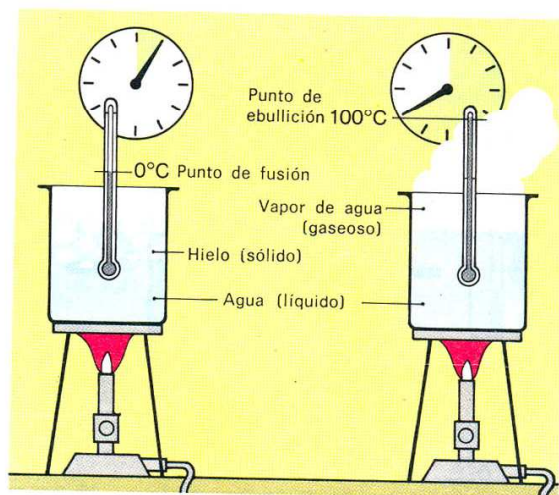


Fig. 7.1. Puntos de fusión y de ebullición.

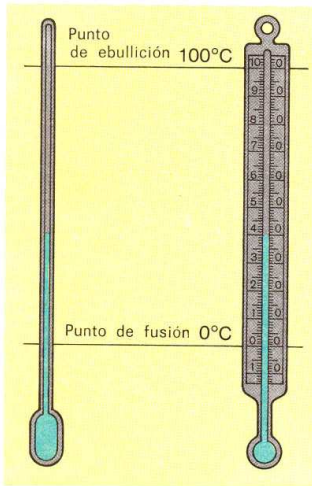


Fig. 7.2. Escala Celsius de temperatura.

#### Temperatura

Símbolo  $T$   
 Símbolo de la unidad K

Para hacernos una idea de lo que es el calor vamos a realizar mentalmente un experimento (fig. 7.1).

Un cubito de hielo sacado de la nevera puede tener una temperatura de  $-4^{\circ}\text{C}$ . Se le calienta lentamente, o sea que se le suministra energía que se transforma en calor. El cubito de hielo se calienta hasta  $0^{\circ}\text{C}$  y se funde convirtiéndose en agua. Este punto se denomina **punto de fusión**.

Sigamos suministrando energía. Después de que el hielo se haya transformado totalmente en agua aumentará la temperatura hasta alcanzar un máximo de  $100^{\circ}\text{C}$ , con lo que habremos alcanzado el **punto de ebullición**. El agua se transforma en vapor, o sea gas, y abandona casi totalmente el pote.

Las moléculas de agua, que en estado sólido (hielo) se encuentran fijas en un punto, efectúan una ligera vibración propia. Como consecuencia del suministro de calor se intensifica esta vibración hasta que finalmente las moléculas se separan unas de otras y abandonan sus lugares fijos. Sin embargo, siguen encontrándose confinadas en un determinado espacio. Si seguimos suministrando energía la vibración sigue intensificándose (el agua borbotea) hasta que finalmente, en el punto de ebullición, es tan fuerte que las moléculas de agua abandonan el pote y se mueven libremente por el espacio.

El calor es la energía de vibración de partículas.

Aunque aún no lo hemos explicado ya hemos empleado el concepto de temperatura.

La unidad de la magnitud temperatura es el **kelvin**.<sup>1</sup>

La temperatura es una medida del estado térmico (estado de vibración).

En la vida diaria se confunden frecuentemente las magnitudes calor y temperatura. No obstante, la diferencia entre ambas puede aclararse fácilmente mediante un ejemplo.

Si se calientan sobre un hornillo eléctrico 1 l de agua y sobre un segundo hornillo igual al primero 10 l de agua durante el mismo tiempo, la energía suministrada será la misma en ambos casos. Sin embargo se alcanzarán diferentes temperaturas finales. La cantidad de agua menor tendrá una mayor temperatura final.

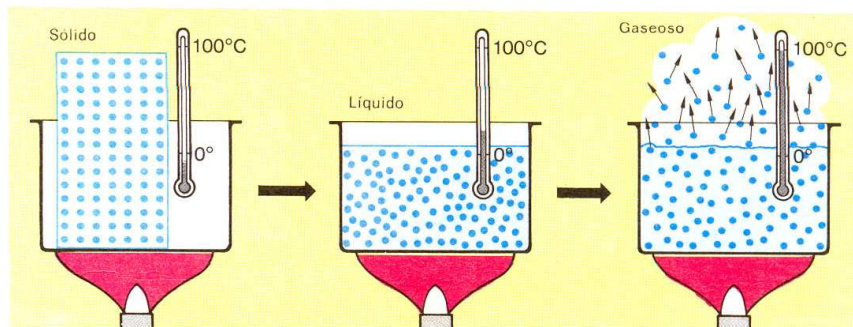


Fig. 7.3. Estados de agregación del agua

<sup>1</sup> Lord Kelvin of Largs (Sir William Thomson), físico inglés, 1824-1907.

**Calor eléctrico**

El físico sueco Anders Celsius (1701-1744) llamaba al punto de fusión del hielo «cero grados» (hoy decimos en su honor «cero grados celsius» 0° C), y al punto de ebullición del agua, «cien grados» (actualmente 100° C).

Como medía la temperatura mediante un termómetro de mercurio (fig. 7.2) dividió la diferencia de dilatación en 100 partes iguales obteniendo así la escala Celsius con los grados Celsius.

Por desdichado que la gama total de temperaturas es mucho más amplia que 100° C. Continúa hacia arriba (más caliente) y empieza más abajo (más frío).

Si el calor es vibración de las partículas y la temperatura una medida del estado de vibración, debe existir un estado en el que todo esté en reposo, el cero absoluto.

El cero absoluto de temperatura se encuentra a  $-273,15^{\circ}\text{C}$ .

Paralelamente a la escala Celsius se introdujo la escala Kelvin de temperaturas. En ella el cero no se encuentra en el punto de fusión del hielo sino en el cero absoluto.

Con ello el punto de fusión del hielo está a 273,15 K y el punto de ebullición del agua a 373,15 K (fig. 7.4).

El físico alemán Daniel Gabriel Fahrenheit (1686-1736) fue el primero en utilizar mercurio en los termómetros en vez del alcohol. En 1716 introdujo la escala que lleva su nombre y que todavía se utiliza en los países anglosajones. Al punto de congelación del agua asigna el valor de 32° F y al de ebullición el de 212° F; divide pues la escala en 180°.

Comparándola con la escala Celsius que divide ese intervalo en 100° resulta

$$\frac{\text{C}-0^{\circ}}{\text{F}-32^{\circ}} = \frac{100}{180} = \frac{5}{9}$$

Y despejando obtenemos las siguientes correspondencias:

$$\text{C} = \frac{5}{9} (\text{F}-32^{\circ});$$

$$\text{F} = 32^{\circ} + \frac{9}{5} \text{C}$$

Ambas escalas coinciden en la temperatura de  $-40^{\circ}$ .

**Temperatura Celsius**

Símbolo  $^{\circ}\text{C}$   
 Símbolo de la unidad  $^{\circ}\text{C}$

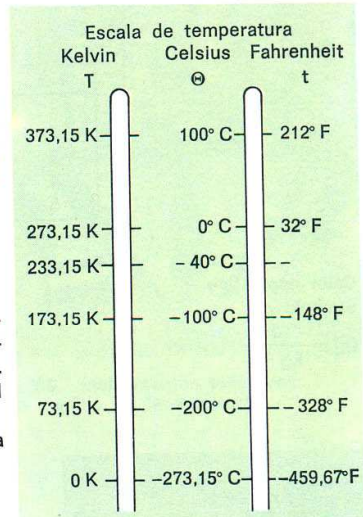
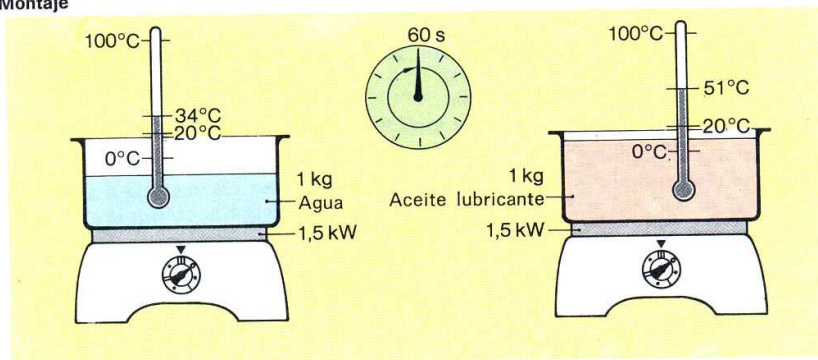


Fig. 7.4. Comparación de las escalas de temperaturas Celsius y Fahrenheit con la Kelvin de temperatura absoluta.

**7.2. Calor específico**

Cuando se le suministra energía a una sustancia se intensifica la vibración de sus partículas. En el experimento 7-1 vamos a investigar cómo se modifica el estado de vibración, o sea la temperatura, de diferentes sustancias cuando se les suministra la misma cantidad de calor.

**Experimento 7-1: Dependencia entre la elevación de temperatura y el material**  
**Montaje**



Unidad Operativa SENATI — Ab:

Prof. Efraín Gamarra Sam



**Realización**

Se calientan 1 kg de agua y 1 kg de aceite con sendos hornillos eléctricos de  $P = 1,5$  kW. A intervalos de tiempo regulares se mide la temperatura en ambos líquidos. Durante el experimento deben removerse los líquidos para distribuir uniformemente la temperatura.

**Resultados**

N.º	$t$ en s	$\vartheta_{ag}$ en °C	$T_{ag}$ en K	$\vartheta_{ac}$ en °C	$T_{ac}$ en K
1	0	20	293	20	293
2	60	34	307	51	324
3	120	48	321	82	355
4	180	62	335	113	386
5	240	76	349	144	417

**Calor específico**Símbolo  $c$ 

$$[c] = \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

La realización del experimento 7-1 y los resultados muestran que en el mismo tiempo el aceite lubricante se calienta más que el agua. Como en ambos casos se suministra la misma potencia durante el mismo tiempo la única explicación posible es que:

Para calentar en 1 K 1 kg de aceite lubricante se necesita menos calor que para calentar 1 kg de agua.

La constante de un material que indica la facilidad con la que se calienta ese material se llama calor específico.

El calor específico indica la cantidad de calor necesaria para elevar en 1 K la temperatura de 1 kg de una sustancia.

Si se deben calentar, por ejemplo, 10 kg de agua en 22 K (por ejemplo, de 20°C a 42°C) se deberá multiplicar el calor específico del agua por la masa  $m$  y por la diferencia de temperatura  $\Delta T$ .

**Tabla 7.1: Calores específicos de algunas sustancias**

Material	$c$ en $\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$	Material	$c$ en $\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$
Plomo	130	Constantán	420
Platino	130	Níquel	460
Estaño	220	Acero	500
Plata	230	Aluminio	920
Cobre	390	Aire	1000
Latón	390	Hielo	2100
Zinc	390	Agua	4190

**Calor absorbido**

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T$$

La cantidad de calor necesaria para calentar una determinada sustancia es tanto mayor

- cuanto mayor es la masa
- cuanto mayor es el calor específico de esa sustancia
- cuanto mayor es la diferencia de temperatura.

**7.3. Aparatos electrocalóricos**

Antes de ocuparnos de los aparatos electrocalóricos vamos a tratar las formas de transmisión del calor de los aparatos a la materia a calentar o al medio ambiente.



Fig. 7.5. Convección del calor.

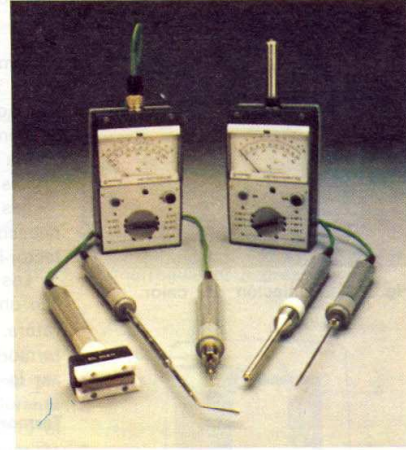


Fig. 7.6. Instrumentos eléctricos para medida de temperaturas.

### 7.3.1. Transmisión del calor

Los aparatos electrocaloríficos son de todos conocidos. En base a tres ejemplos, el soldador, el secador de pelo y la lámpara de cuarzo (sol artificial), vamos a explicar las tres formas posibles de transmisión del calor.

- En el soldador se calienta una pieza de metal que cede el calor a través de la punta del soldador al punto de soldadura. Esta forma de transmisión de calor se denomina **conducción** (fig. 7.7).
- Para ello se utilizan fundamentalmente metales, porque estos materiales son buenos conductores del calor (ver 15.1.2).
- En el secador de pelo (fig. 7.5) un ventilador se encarga de enviar el aire caliente al pelo. En este caso tenemos una **convección** de calor, en el secador convección forzada. En otros muchos casos la convección se origina simplemente con la tendencia a subir de gases o líquidos más ligeros al calentarse (por ejemplo la calefacción de una habitación).
- Mediante la lámpara de cuarzo sólo se calientan los objetos que se encuentran directamente frente al campo de radiación. En este caso el calor se transmite por **radiación** (fig. 7.8), no precisándose ningún medio o agente de transporte. Por tanto la radiación de calor también es posible en el vacío. Un ejemplo de sobras conocido son los rayos solares.



Fig. 7.7. Conducción del calor.

### 7.3.2. Calentadores de agua

#### Calentador a temperatura limitada

Un recipiente, generalmente de vidrio, se llena con la cantidad de agua deseada y a continuación se ajusta la temperatura deseada. Al alcanzar esta temperatura el aparato se desconecta automáticamente, pudiéndose disponer del agua caliente.

El aparato sólo posee un **limitador** de temperatura, que desconecta cuando se alcanza la temperatura deseada, pero que no vuelve a conectar cuando el agua se ha enfriado.



Fig. 7.8. Radiación del calor.

**Calentadores de agua sin presión**

En estos aparatos la salida de agua caliente está siempre abierta al exterior y termina en la zona superior del depósito. Al calentarse el agua se dilata y gotea a través de la salida de agua caliente, con lo que no podrá producirse una sobrepresión. Para sacar el agua caliente se abre el grifo del agua fría, que entra por la parte inferior del aparato e impele el agua caliente superior a través de la salida correspondiente.

Los calentadores de agua sin presión tienen **una única** toma de agua caliente. Los **termosifones** no poseen aislamiento térmico. Se les conecta cuando se necesitan y se desconectan por sí solos al alcanzar la temperatura ajustada (selector-limitador de temperatura). Sólo se les puede conectar a mano.

Los **termorreguladores**, en cambio, almacenan agua caliente, para lo cual tienen un aislamiento térmico. Además contienen un selector-regulador de temperatura. Al extraer agua caliente disminuye la temperatura interna con lo que el termorregulador se conecta automáticamente y vuelve a desconectarse al alcanzar la temperatura seleccionada.

**Termorregulador a presión**

La estructura de los termorreguladores de agua a presión es similar a la de los calentadores sin presión. Pero como deben alimentar varias tomas unidas

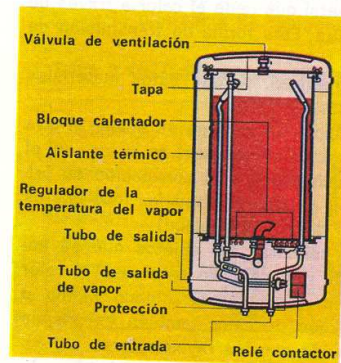


Fig. 7.9. Calentador a temperatura limitada.

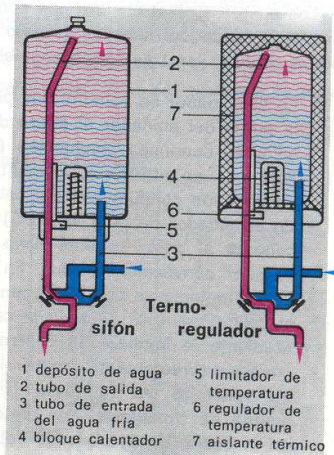


Fig. 7.10. Calentadores de agua sin presión.

a la salida de agua caliente no es posible el dejar ésta abierta permanentemente. Por ello los calentadores de agua para varias tomas deben funcionar a presión (depósito de paredes gruesas).

La válvula contra reflujo (5) impide una compensación de la presión con la red de distribución de agua, pues al calentar el agua se dilata. Una válvula de seguridad (2) se encarga de igualar la presión.

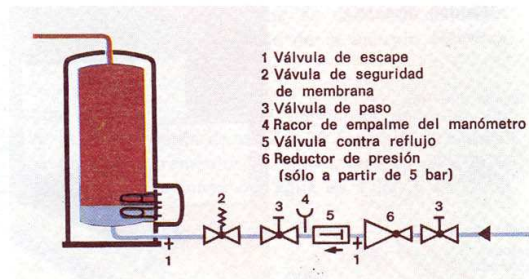


Fig. 7.11. Termorregulador a presión.

### Calentador de agua en circulación

A diferencia de los demás calentadores de agua el calentador de agua en circulación no precisa un tiempo previo de calentamiento. **Gracias a su gran potencia** (por ejemplo, 18 kW, 21 kW, 24 kW, 33 kW) **calienta el agua durante su circulación por el aparato**. Al abrir alguno de los grifos de agua caliente el agua circula por las tuberías del calentador. Un conmutador por flujo conecta inmediatamente el calentador y lo vuelve a desconectar cuando el agua vuelve al reposo. Como el agua sólo se calienta cuando circula no aparece ningún aumento relevante de la presión, por lo que no se precisa válvula de seguridad.

El gran inconveniente de los calentadores de agua en circulación consiste en que cargan bruscamente la red debido a su gran potencia, incluso al tomar cantidades mínimas de agua caliente.

Una posible solución es un aparato que resulta de una combinación del termorregulador y del calentador de agua en circulación. Cuando se necesita poca agua (por ejemplo en un lavabo) se consume primero el agua caliente almacenada. La cantidad de agua correspondiente se vuelve a llenar y a calentar con poca potencia. Cuando se precisan mayores cantidades de agua (por ejemplo, ducha, bañera) el conmutador por flujo conecta automáticamente.

### 7.3.3. Aparatos para calefacción de locales

Para conseguir que la carga de las centrales eléctricas y de la red se reparta uniformemente durante las 24 horas del día, las compañías suministradoras de electricidad ofrecen durante la noche energía a tarifas más baratas.

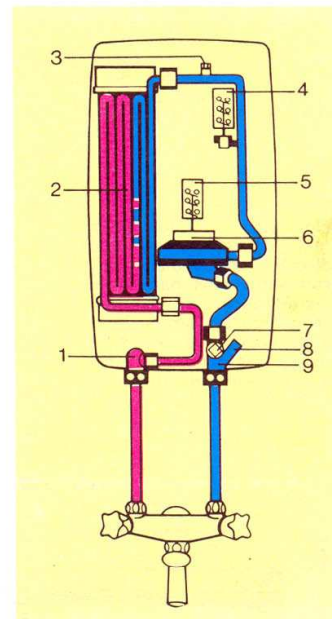
En la calefacción por acumulación se encuentran ladrillos refractarios, aislados térmicamente del exterior, que se calientan durante la noche.

En los aparatos antiguos el calor sale del aparato sin control o a través de tubos de aire.

En los **aparatos de construcción más moderna, un ventilador, activado automáticamente mediante un termostato de ambiente, provoca una circulación forzada del aire**, con lo que se obtiene una buena regulación del calor.

### 7.4. Rendimiento de los aparatos electrocaloríficos

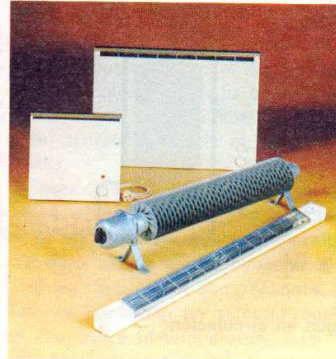
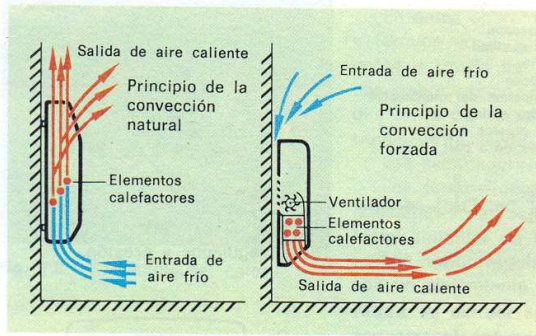
La corriente eléctrica en las resistencias es un movimiento de cargas a través de la red cristalina del material. La corriente eléctrica provoca, pues, vibraciones de dicha red, o sea calor.



1 Salida de agua caliente  
2 Bloque calefactor  
3 Termostato especial  
4 Seguro limitador de presión y temperatura  
5 Interruptor de contacto de metal  
6 Interruptor diferencial de presión  
7 Juego de filtros  
8 Válvula contra reflujo con válvula de cierre  
9 Entrada de agua fría

Fig. 7.12. Calentador de agua en circulación.

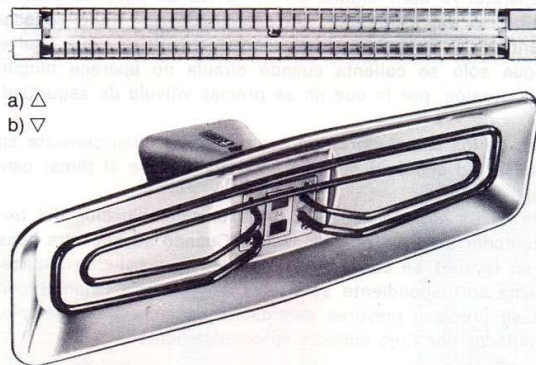
**Caldeo directo**



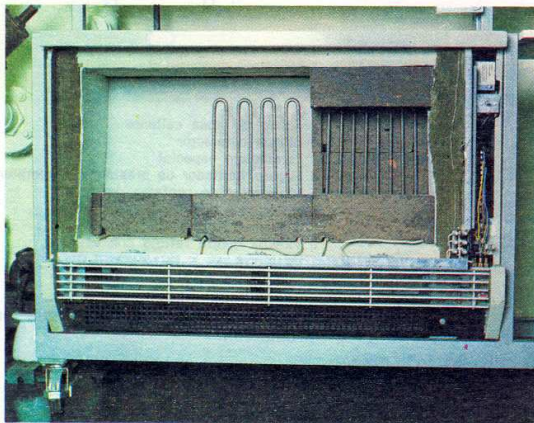
**Fig. 7.13.** Aparatos de caldeo directo con cesión de calor por convección natural y forzada.

**Fig. 7.14.** Aparatos de caldeo directo con cesión del calor por convección y radiación.

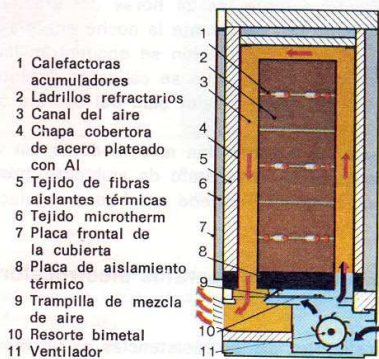
**Fig. 7.15.** Aparatos de caldeo directo con cesión del calor por radiación. Los radiadores de calor son apropiados para calentar locales cerrados o al aire libre. El calor se genera en barras de cuarzo (a) o de acero fino (b). Las pantallas reflectoras concentran los rayos en una determinada dirección.



**Caldeo por acumulación**



**Fig. 7.16.** Calefacción eléctrica por acumulación (vista interior).



**Fig. 7.17.** Calefacción eléctrica por acumulación con ventilador.

El experimento 7-1 muestra que las sustancias que se calientan absorben energía. El calor se obtiene eléctricamente, y proviene de la energía eléctrica que consume el hornillo.

Según el experimento 7-1 cada hornillo eléctrico absorbe 1500 W durante 240 s, lo que equivale a una energía eléctrica

$$\begin{aligned} W &= P \cdot t \\ W &= 1500 \text{ W} \cdot 240 \text{ s} \\ W &= 360000 \text{ W s} \end{aligned}$$

Durante este tiempo el agua se calienta de 20° C a 76° C, o sea que el incremento de temperatura es  $\Delta T = 56 \text{ K}$ . La masa del agua es 1 kg, y su calor específico  $c = 4190 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$ . El calor

absorbido es, pues,

$$\begin{aligned} Q &= m \cdot c \cdot \Delta T \\ Q &= 1 \text{ kg} \cdot 4190 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 56 \text{ K} \\ Q &= 234640 \text{ J} \end{aligned}$$

El hornillo eléctrico produce más calor del que cede al agua. Aparecen, pues, pérdidas, el ambiente se calienta, el hornillo y el pote también, etc.

Energía eléctrica consumida por el hornillo:

$$W_c = P \cdot t$$

Energía cedida por el hornillo y absorbida por el agua:

$$W_u = m \cdot c \cdot \Delta T$$

El rendimiento del hornillo es, pues:

$$\begin{aligned} \eta_{\text{th}} &= \frac{W_u}{W_c} \\ \eta_{\text{th}} &= \frac{m \cdot c \cdot \Delta T}{P \cdot t} \\ \eta_{\text{th}} &= \frac{1 \text{ kg} \cdot 4190 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 56 \text{ K}}{1500 \text{ W} \cdot 240 \text{ s}} \\ \eta_{\text{th}} &= 0,65 \end{aligned}$$

El rendimiento del hornillo eléctrico es reducido; sólo vale un 65 %.

#### Ejercicios sobre 7

1. ¿Qué diferencia existe entre indicar una temperatura en °C o indicarla en K? Razonar la respuesta.
2. ¿Por qué el aceite del experimento 7-1 se ha calentado más que el agua?
3. En un recipiente con 10 kg de agua se encuentra un trozo de cobre de 20 kg. El agua y el cobre se calientan a la misma temperatura. ¿Cuál de las dos sustancias ha absorbido más calor? Razonarlo.
4. ¿Cuánto vale el calor específico del aceite lubricante según los resultados del experimento 7-1, teniendo en cuenta que el rendimiento térmico vale  $\eta_{\text{th}} = 0,58$ ?

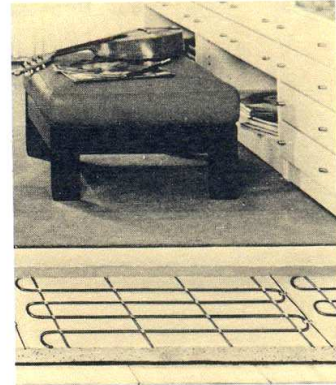


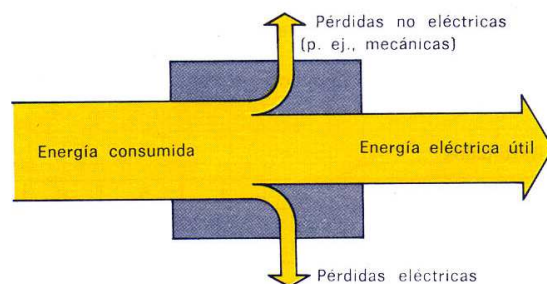
Fig. 7.18. Las varillas calefactoras pueden también disponerse dentro del suelo. Según cual sea su estructura la calefacción podrá ser directa o por acumulación.

5. ¿Cuánto tiempo ha de estar conectado un calentador de agua en circulación de  $P = 21 \text{ kW}$  si debe llenar una bañera con  $200 \text{ kg}$  de agua a  $40^\circ \text{C}$ ? La temperatura a la que entra el agua es  $12^\circ \text{C}$  y el rendimiento térmico del calentador  $\eta_{\text{th}} = 0,78$ .

## 8. Conexiones de fuentes eléctricas de tensión

En 1.4.2.2 hemos tratado diversas fuentes de tensión. Todas ellas tienen en común el ser convertidores de energía, pues convierten diferentes formas de energía en energía eléctrica. Pero esto no se produce sin que aparezcan pérdidas.

El esquema de pérdidas representado en la figura 8-1 es válido en general para todas las fuentes de tensión. Las pérdidas no eléctricas aparecen siempre, careciendo de importancia especial el que la fuente eléctrica de tensión esté cargada o no.



**Fig. 8.1.** Transformación de la energía en una fuente de tensión eléctrica.

Las pérdidas eléctricas aparecen casi exclusivamente cuando la fuente de tensión está cargada. No obstante, aunque algunas fuentes de tensión también tienen pérdidas eléctricas en circuito abierto podremos despreciarlas en general por ser mucho menores que las que aparecen con la fuente cargada.

### 8.1. Fuentes de tensión cargadas

La mayoría de los automóviles de turismo poseen acumuladores de plomo con una tensión nominal de 12 V. Cuando, con el motor parado, todas las cargas están desconectadas, la tensión de la batería vale aproximadamente 12 V. Si conectamos la iluminación interior del coche apenas variará la tensión de la batería. Sin embargo, cuando accionamos simultáneamente el motor de arranque disminuirá perceptiblemente la luminosidad de la bombilla interior. Esto nos indica que la tensión de la batería ha disminuido durante el accionamiento del motor de arranque, que representa una gran carga.

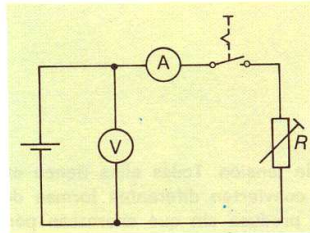
Cuando se carga una fuente de tensión disminuye la tensión en sus terminales.



¿Cómo podemos explicar este fenómeno? Para contestar a esta pregunta realizaremos el experimento 8-1.

### Experimento 8-1: Tensión de una pila seca cargada

#### Montaje



#### Realización

Conectamos una resistencia variable  $R = 8\ \Omega$  a una pila de zinc y carbón de  $U_N = 1,5\ \text{V}$ . Variando la posición del cursor del reostato disminuimos a pasos el valor de la resistencia, hasta llegar al cortocircuito. Mediremos la tensión en los terminales de la fuente  $U_t$  y la intensidad de las corrientes por la resistencia.

*Nota:* Las medidas en cortocircuito deben ser rápidas y sólo con pequeñas fuentes de tensión.

#### Resultados

N.º	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$I$ en A	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,5	2,0	3,0
$U_t$ en V	1,5	1,4	1,3	1,2	1,1	1,0	0,75	0,5	0

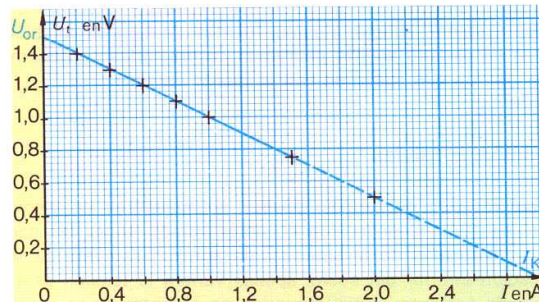


Fig. 8.2. Gráfica de la tensión en los terminales de una pila seca en función de la intensidad de carga.

Los resultados del experimento confirman el fenómeno que ya hemos observado. Para un estudio más detallado es conveniente representar los resultados en una gráfica (fig. 8.2).

Cuando la fuente de tensión no está cargada la **tensión en los terminales**  $U_t$  tiene su valor máximo, que es la **tensión en circuito abierto**. Ésta es la tensión

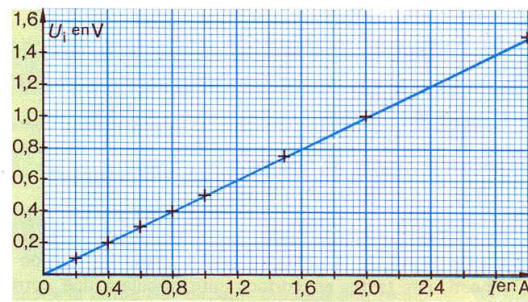
que se obtiene al transformar la energía según determinadas leyes físicas. También se la denomina **fuerza electromotriz (f.e.m.)** y la simbolizaremos por  $U_o$ .

La f.e.m.  $U_o$  es la tensión que se obtiene originariamente al transformar la energía, y puede medirse en los terminales de una fuente de tensión en circuito abierto.

Cuando se carga la fuente de tensión circula una corriente de intensidad  $I$  y simultáneamente disminuye la tensión en los terminales. Como en la fuente de tensión sigue generándose la f.e.m.  $U_o$ , debe aparecer en la fuente una **caída interna de tensión  $U_i$** .

Toda fuente de tensión cargada posee una caída interna de tensión que es la diferencia entre la tensión en los terminales y la f.e.m.

En el presente ejemplo la f.e.m. vale  $U_o = 1,5$  V. Cuanto mayor es la intensidad de la corriente, menor se hace la tensión en los terminales. Por tanto, la caída interna de tensión  $U_i$  aumenta. En la tabla 8.1 hemos calculado la caída interna de tensión para cada punto de medida; también hemos indicado los respectivos valores de la intensidad. Con los valores de la tabla podemos trazar una gráfica de la caída interna de tensión en función de la intensidad de la corriente de carga (fig. 8.3).



**Tensión en los terminales**

$$U_t = U_o - U_i$$

**Fuerza electromotriz**

$$U_o = U_t + U_i$$

Fig. 8.3. Gráfica de la caída interna de tensión de una pila en función de la intensidad de carga.

La tabla 8.1 y la figura 8.3 muestran que:

La caída interna de tensión  $U_i$  es directamente proporcional a la intensidad de la corriente de carga  $I$ .

Si aparece una caída de tensión como consecuencia de una corriente eléctrica debe existir una resistencia: la **resistencia interna  $R_i$**  de la fuente de tensión.

Tabla 8.1

N.º	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$U_o$ en V	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
$U_t$ en V	1,5	1,4	1,3	1,2	1,1	1,0	0,75	0,5	0
$U_i$ en V	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,75	1,0	1,5
$I$ en A	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,5	2,0	3,0

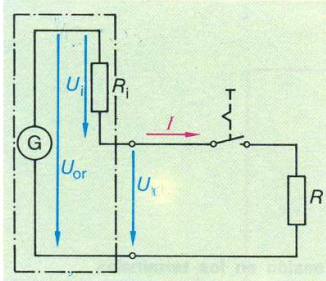


Fig. 8.4. Circuito equivalente de una fuente de tensión.

Cualquier fuente de tensión, generador



Caída interna de tensión

$$U_i = I \cdot R_i$$



Fig. 8.5. Conexión en serie de cuatro pilas secas en una linterna.

Intensidad en cortocircuito

$$I_k = \frac{U_o}{R_i}$$

Se la puede calcular mediante la ley de Ohm a partir de la caída interna de tensión y de las intensidades de carga (para cualquier punto de medida excepto para  $I = 0$  A).

Por ejemplo:  $R_i = \frac{U_i}{I}$ ;  $R_i = \frac{0,4 \text{ V}}{0,8 \text{ A}}$ ;  $R_i = 0,5 \Omega$

Para poder explicar y calcular más fácilmente las relaciones existentes en una fuente de tensión se utiliza el **circuito equivalente** (fig. 8.4).

Toda fuente de tensión se compone del generador de la f.e.m. y de la resistencia interna.

La caída interna de tensión depende de la intensidad de la corriente de carga  $I$  y de la resistencia interna  $R_i$ .

**Circuito abierto** (punto de medida n.º 1)

$$I = 0 \text{ A}, U_o = 1,5 \text{ V}, R_i = 0,5 \Omega$$

$$U_i = I \cdot R_i$$

$$U_i = 0 \text{ A} \cdot 0,5 \Omega$$

$$U_i = 0 \text{ V}$$

Si no circula corriente no puede haber caída de tensión, con lo que la tensión en los terminales será igual a la f.e.m.

**Con carga conectada** (por ejemplo medida n.º 5):

$$I = 0,8 \text{ A}, U_o = 1,5 \text{ V}, R_i = 0,5 \Omega$$

$$U_i = I \cdot R_i$$

$$U_i = 0,8 \text{ A} \cdot 0,5 \Omega$$

$$U_i = 0,4 \text{ V}$$

$$U_t = U_o - U_i$$

$$U_t = 1,5 \text{ V} - 0,4 \text{ V}$$

$$U_t = 1,1 \text{ V}$$

**Cortocircuito** (punto de medida n.º 9)

$$I = 3,0 \text{ A}, U_o = 1,5 \text{ V}, R_i = 0,5 \Omega$$

Como los terminales están cortocircuitados la tensión en ellos debe ser nula. Esto significa no obstante que la caída de tensión interna debe ser igual a la f.e.m. Por tanto, en cortocircuito circulará una corriente de intensidad tal que dé lugar a esta igualdad de tensiones:

$$I_k = \frac{U_i}{R_i} = \frac{U_o}{R_i}$$

$$I_k = \frac{1,5 \text{ V}}{0,5 \Omega}$$

$$I_k = 3,0 \text{ A}$$

En cortocircuito la corriente sólo viene limitada por la resistencia interna.

## 8.2. Conexión en serie de fuentes de tensión

En muchas linternas de mano y faros portátiles se conectan varias fuentes de tensión una tras otra, o sea en serie.

La figura 8.5 muestra la conexión en serie de cuatro pilas secas de 1,5 V cada una. En circuito abierto la tensión total vale 6 V, y si se cierra el circuito,

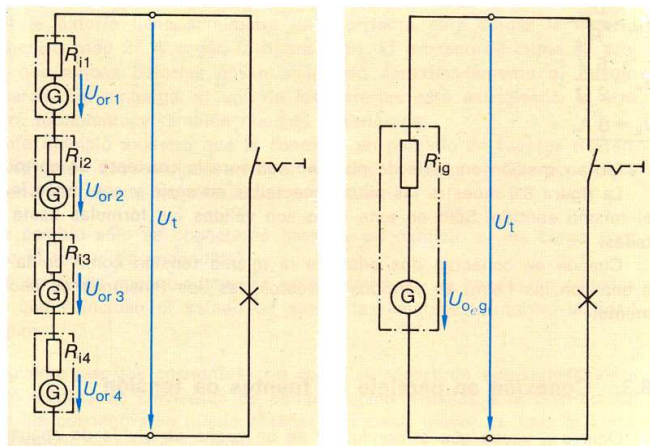


Fig. 8.6. A partir de los circuitos equivalentes de las cuatro fuentes de tensión en serie se obtiene el circuito equivalente de la fuente de tensión resultante.

5,2 V, por tanto cuatro veces la tensión de una sola pila (1,5 V). Luego la conexión en serie de fuentes de tensión da lugar a un aumento de la tensión total, pues las diferentes tensiones se suman.

La f.e.m. de una conexión en serie es igual a la suma de las diversas f.e.m.

En la figura 8.6 hemos representado el circuito equivalente. A continuación, de los circuitos equivalentes de las cuatro pilas secas se obtiene el circuito equivalente de una pila imaginaria que equivale a las otras cuatro.

La resistencia interna equivalente de una conexión en serie de fuentes de tensión es igual a la suma de las diversas resistencias internas.

En el presente ejemplo la carga del circuito provoca una reducción de 0,8 V de la tensión en los terminales, la cual quedará igual a 5,2 V. Por tanto, carece de sentido utilizar en la linterna una bombilla de tensión nominal 6 V, pues nunca podría proporcionar una iluminación máxima.

En la linterna se encuentra montada una bombilla de tensión nominal  $U_N = 4,8$  V, que es incluso menor que la tensión en los terminales cargados. Se parte de la suposición que al irse descargando la pila disminuirá su f.e.m.

¿Cuál es la intensidad de la corriente de cortocircuito de varias pilas conectadas en serie?

La intensidad de cortocircuito de una sola pila valdrá:

$$I_k = \frac{U_{o,1}}{R_{i,1}}$$

$$I_k = \frac{1,5 \text{ V}}{0,5 \Omega}$$

$$I_k = 3 \text{ A}$$

La intensidad de cortocircuito de las cuatro pilas conectadas en serie valdrá:

**f.e.m. equivalente de una conexión en serie**

$$U_{oe} = U_{o1} + U_{o2} + \dots + U_{on}$$

**Resistencia interna equivalente de una conexión en serie**

$$R_{ie} = R_{i1} + R_{i2} + \dots + R_{in}$$

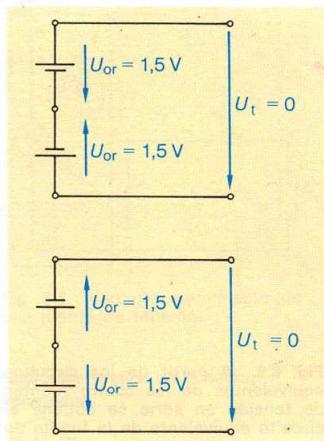


Fig. 8.7. Conexión en serie de dos fuentes de tensión con f.e.m. de sentidos opuestos.

$$I_k = \frac{U_{oe}}{R_{ie}}$$

$$I_k = \frac{6 \text{ V}}{2 \Omega}$$

$$I_k = 3 \text{ A}$$

En la conexión en serie de pilas no aumenta la corriente de cortocircuito. La figura 8.6 muestra las pilas conectadas en serie y con todas las f.e.m. en el mismo sentido. Sólo en este caso son válidas las fórmulas hasta ahora tratadas.

Cuando se conectan dos pilas de la misma tensión como en la figura 8.7, o sea con las f.e.m. en sentidos opuestos, las dos tensiones se anulan mutuamente.

### 8.3. Conexión en paralelo de fuentes de tensión

Ocurre a veces que el conductor de un coche se olvida de apagar los faros al aparcarlo. Cuando vuelve al cabo de muchas horas se encuentra con una desagradable sorpresa. Aunque el piloto de control de la batería aún se enciende, ésta es incapaz de suministrar al motor de arranque una corriente de intensidad suficiente para arrancar.

En este caso puede rogársele a otro conductor amable que ayude con su batería. No es necesario cambiarla, basta que aparque su coche junto al otro y que se conecten las dos baterías en paralelo (fig. 8.8).

Vamos a estudiar más detenidamente este caso. Para ello simplificaremos las características internas de la batería.

<b>Batería 1</b>	<b>Batería 2</b>
$U_{o1} = 10,5 \text{ V}$	$U_{o2} = 12,6 \text{ V}$
$R_{i1} = 0,07 \Omega$	$R_{i2} = 0,03 \Omega$

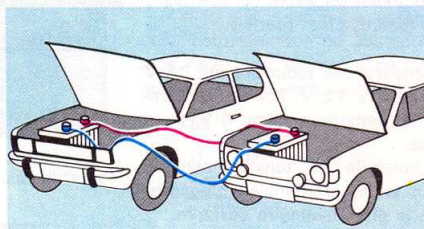


Fig. 8.8. Conexión en paralelo de dos baterías.

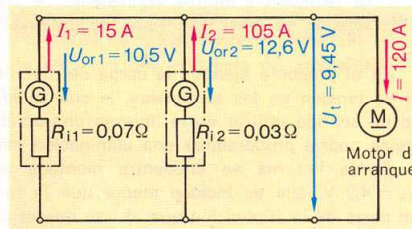


Fig. 8.9. Circuito para la ayuda de arranque.

Supongamos que la intensidad de la corriente necesaria para el arranque vale 120 A.

En la figura 8.9 hemos representado la conexión en paralelo de las dos baterías con el motor de arranque. Con los valores dados pueden calcularse las intensidades  $I_1$ ,  $I_2$  y la tensión en los terminales del motor de arranque. Los resultados se encuentran también en la figura 8.9.

La batería de mayor f.e.m. y menor resistencia interna es la que suministra la corriente más intensa.

Cuando se desconecta el motor de arranque (por ejemplo, cuando el motor ya funciona) la batería llena suministra una corriente para cargar la batería vacía (en nuestro caso 21 A según la figura 8.10). El proceso de carga se prolonga hasta que ambas baterías hayan alcanzado aproximadamente el mismo estado de carga. Sin embargo, si una de las baterías está estropeada, la otra se descargará totalmente y también quedará deteriorada.

El presente ejemplo muestra que la conexión en paralelo de fuentes de tensión puede ser muy desventajoso en determinadas condiciones. En la práctica habrá que tener en cuenta las dos reglas siguientes:

- De ser posible sólo se conectarán baterías en paralelo a una carga (por ejemplo al motor de encendido).
- Cuando se deban conectar baterías en paralelo sólo se emplearán aquellas en las que coincidan el estado de carga, la resistencia interna, la edad y la f.e.m.

En el segundo caso las corrientes con carga se repartirán aproximadamente por igual. No aparecerán corrientes de compensación. Gracias a la distribución por igual de las corrientes se puede obtener una carga mayor de toda la instalación manteniendo constante la tensión.

**Ejercicios sobre 8**

1. ¿Cuánto vale la resistencia interna de una fuente de tensión cuya tensión en los terminales se reduce de 42 V a 39 V cuando suministra una corriente de 12 A?
2. Tres fuentes de tensión iguales, de f.e.m.  $U_o = 13,5 \text{ V}$  y  $R_i = 2 \Omega$ , se conectan en paralelo a una resistencia de  $R = 48 \Omega$ .
  - a) ¿Cuánto vale la f.e.m. total?
  - b) ¿Cuánto vale la resistencia interna equivalente?
  - c) ¿Cuál es la intensidad de la corriente?
  - d) ¿A qué tensión queda sometida la resistencia  $R = 48 \Omega$ ?
  - e) ¿Cuánto valen las pérdidas de tensión en una de las fuentes?
3. ¿Cuánto vale la tensión total de la conexión en serie de la figura 8.11?

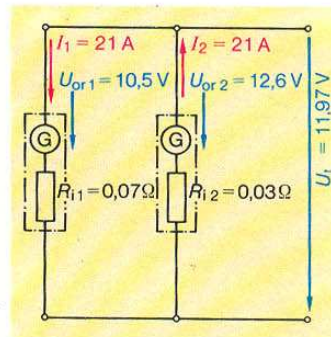


Fig. 8.10. Conexión en paralelo de dos fuentes de tensión diferentes.

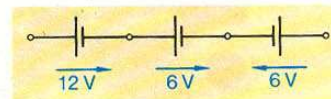
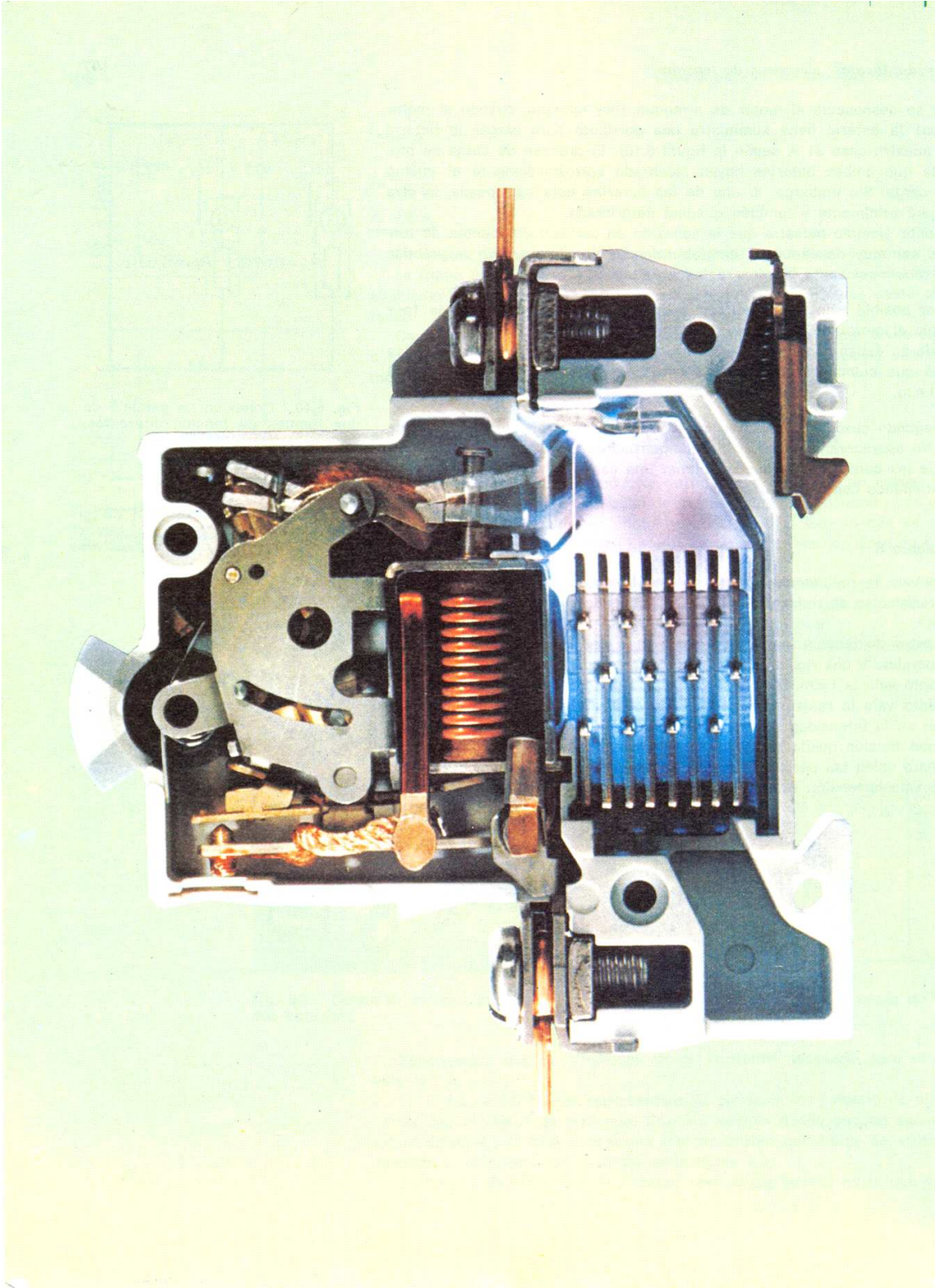


Fig. 8.11.



## 9. Líneas cargadas

### 9.1. Caída de tensión y pérdidas de potencia

El propietario de una caravana (roulotte) monta en ésta una calefacción eléctrica según las instrucciones que se le adjuntan. La calefacción se ha de conectar a 220 V y consume a esta tensión una potencia de 4 kW. Al acabar la instalación la hace comprobar por un técnico, que la pone en funcionamiento y mide los siguientes valores de tensión e intensidad:

$$U = 220 \text{ V}; I = 18 \text{ A.}$$

A continuación el propietario se va de vacaciones y aparca su caravana en un camping. Para poder conectar su calefacción compra 100 m de línea de 3 hilos, de sección  $q = 1,5 \text{ mm}^2$ , pues el enchufe más próximo está bastante alejado de su lugar de acampada.

Después de poner la calefacción en funcionamiento comprueba que ésta no proporciona su máxima potencia.

$$\text{Una nueva medida muestra que: } U = 183,8 \text{ V}; I = 15,2 \text{ A.}$$

Estos valores son bastante menores que los primitivos. La suposición de que la compañía suministradora de electricidad proporcionaba una tensión demasiado baja resultó ser falsa. En los enchufes del camping pueden medirse 220 V.

Por tanto, las pérdidas sólo pueden estar provocadas por la resistencia de la línea (ver 3.2) que da lugar a una conexión en serie con las resistencias de la calefacción.

En la figura 9.1 hemos representado el circuito de la calefacción junto con

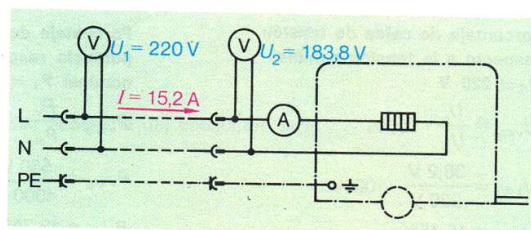


Fig. 9.1. Circuito de medida para comprobar el funcionamiento de la calefacción (con cables largos).

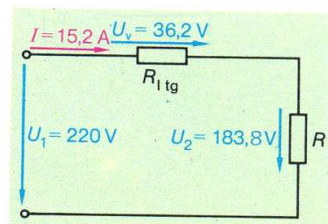


Fig. 9.2. Circuito equivalente de una carga con la resistencia de la línea.



los instrumentos de medida y los resultados de ésta. En la figura 9.2 se encuentra el circuito equivalente correspondiente.

La caída de tensión en la línea depende de la intensidad de la corriente de carga  $I = 15,2 \text{ A}$  y de la resistencia de la línea  $R_1$  (ver 3.2), que se compone de las resistencias de los conductores, el «de ida» y el «de vuelta». La longitud  $l$  es la de la línea (en nuestro caso 100 m). Por tanto, la resistencia de la línea vale:

$$R_1 = R_{L(\text{ida})} + R_{L(\text{vuelta})} = 2 R_c$$

$$R_1 = \frac{2l}{\kappa \cdot q}$$

Por tanto, la caída de tensión vale:

$$U_v = I \cdot R_1$$

$$U_v = \frac{I \cdot 2 \cdot l}{\kappa \cdot q}$$

$$U_v = \frac{15,2 \text{ A} \cdot 2 \cdot 100 \text{ m}}{56 \cdot 10^6 \frac{\text{S}}{\text{m}} \cdot 1,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2}$$

$$U_v = 36,2 \text{ V}$$

#### Pérdida de potencia en una línea

$$P_v = \frac{I^2 \cdot 2 \cdot l}{\kappa \cdot q}$$

Esta caída de tensión provoca en la carga —en nuestro caso las resistencias de la calefacción— una reducción de la potencia. Por lo tanto la línea provoca no sólo una caída de tensión sino también una pérdida de potencia.

Las pérdidas de potencia en una línea cargada son directamente proporcionales a la resistencia de la línea y al cuadrado de la intensidad de la corriente de la carga.

$$P_v = I^2 \cdot R_1$$

$$P_v = \frac{I^2 \cdot 2 \cdot l}{\kappa \cdot q}$$

$$P_v = \frac{15,2^2 \text{ A}^2 \cdot 200 \text{ m}}{56 \cdot 10^6 \frac{\text{S}}{\text{m}} \cdot 1,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2}$$

$$P_v = 550 \text{ W}$$

En la práctica se suelen indicar las pérdidas en tanto por ciento.

#### Porcentaje de caída de tensión respecto a la tensión nominal

$$U_N = 220 \text{ V}$$

$$U_{v/o} \hat{=} \frac{U_v}{U_N} \cdot 100\%$$

$$U_{v/o} \hat{=} \frac{36,2 \text{ V}}{220 \text{ V}} \cdot 100\%$$

$$U_{v/o} \hat{=} 16,45\%$$

#### Porcentaje de pérdidas de potencia respecto a la potencia nominal $P_N = 4000 \text{ W}$

$$P_{v/o} \hat{=} \frac{P_v}{P_N} \cdot 100\%$$

$$P_{v/o} \hat{=} \frac{550 \text{ W}}{4000 \text{ W}} \cdot 100\%$$

$$P_{v/o} \hat{=} 13,75\%$$

La suma de la caída de tensión y la tensión en la carga nos da la tensión nominal.

$$U_v + U_2 = 36,2 \text{ V} + 183,8 \text{ V}$$

$$U_v + U_2 = 220 \text{ V}$$

Esta relación no es válida para la suma de las pérdidas de potencia y la potencia consumida por la carga. El porcentaje de potencia útil es mucho menor que el de tensión útil, pues la potencia depende del cuadrado de la tensión.

### 9.2. Cálculo de líneas eléctricas

¿Qué posibilidades existen para utilizar la instalación del ejemplo anterior de una manera más económica?

Sabemos que es la resistencia de la línea la que provoca las pérdidas. Por tanto deberemos reducirla, para lo cual existen dos posibilidades (ver 3.2):

- acortar la línea.
- aumentar la sección de los conductores.

En la práctica (también en nuestro ejemplo) sólo suele ser realizable la segunda solución.

Toda línea cargada provoca una caída de tensión, que deberá ser lo menor posible. Frecuentemente viene fijada por la compañía suministradora de electricidad.

Por lo general, la caída de tensión en tanto por ciento no puede ser superior al 0,5 % en las líneas que van de la acometida de una casa hasta los contadores. La caída de tensión en tanto por ciento en la instalación que viene después del contador no debe sobrepasar los siguientes valores:

- 1,5 % en las líneas para circuitos de lámparas o enchufes, desde el contador hasta las cargas;
- 3 % en las líneas de cargas con circuito eléctrico propio, desde el contador hasta la carga.»

Esta caída se llama **caída de tensión permisible**  $U_{vper}$ .

$$U_{vper} \cong 3\% \text{ de } 220 \text{ V o bien,}$$

$$U_{vper} = 0,03 \cdot 220 \text{ V de donde resulta,}$$

$$U_{vper} = 6,6 \text{ V}$$

Esta caída permisible es la base para calcular la **sección necesaria del conductor**  $q$ .

$$U_{vper} = \frac{I \cdot 2 \cdot l}{\kappa \cdot q}$$

Por tanto la sección necesaria del conductor será:

$$q = \frac{I \cdot 2 \cdot l}{\kappa \cdot U_{vper}}$$

$$q = \frac{18 \text{ A} \cdot 200 \text{ m}}{56 \cdot 10^6 \frac{\text{S}}{\text{m}} \cdot 6,6 \text{ V}}$$

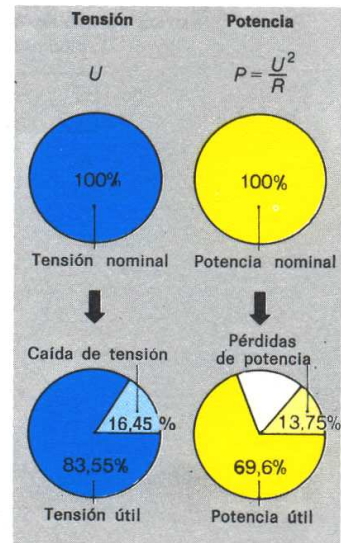


Fig. 9.3. Comparación de los porcentajes de tensión útil y de potencia útil. (Respecto al ejemplo de la página anterior.) Aclaración: Si en una carga entra la tensión nominal completa, aprovecha toda la potencia nominal, pero si hay una caída de tensión (en este caso menor del 16,45 %), entra una tensión menor (aquí el 83,55 %) y aprovecha una potencia también menor (en este caso, el 69,6 % de la nominal). En proporción, la potencia útil es menor que la tensión útil porque depende del cuadrado de ésta.

#### Sección necesaria del conductor

$$q = \frac{I \cdot 2 \cdot l}{\kappa \cdot U_{vper}}$$

$$q = 9,74 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 = \underline{9,74 \text{ mm}^2}$$

Para sólo un 3 % de tensión se aproxima la intensidad de la corriente de carga por la intensidad nominal.

El cálculo de la sección necesaria del conductor da en general un valor no normalizado. Por ello se elige un conductor de sección del valor normalizado superior más próximo. En nuestro caso es  $q = 10 \text{ mm}^2$ .

Obtendremos, pues, una caída de tensión menor que la permisible, lo cual sólo presenta ventajas.

$$U_v = \frac{I \cdot 2 \cdot l}{\kappa \cdot q}$$

$$U_v = \frac{18 \text{ A} \cdot 200 \text{ m}}{56 \cdot 10^6 \frac{\text{S}}{\text{m}} \cdot 10 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2} = \underline{6,4 \text{ V}}$$

Este cálculo entraña una pequeña inexactitud. Dado que la resistencia de los conductores y la de la calefacción forman una conexión en serie, no circulará la corriente nominal de 18 A, sino una corriente de intensidad algo menor, aquí 17,66 A. Con este valor podremos calcular la caída de tensión real,  $U_v = 6,3 \text{ V}$ . Como este valor es aproximadamente igual a 6,4 V, en la práctica será suficiente hacer los cálculos con la intensidad nominal.

### 9.3. Protección de líneas eléctricas

Para que una instalación eléctrica funcione correcta y económicamente es de singular importancia el cálculo de las líneas de alimentación, para lo cual desempeña un papel especial la máxima caída de tensión permisible.

Veamos para ello otro ejemplo.

La caída de tensión permisible de una instalación de 220 V es del 3 %, o sea  $U_{\text{vper}} = 6,6 \text{ V}$ . La línea es muy corta,  $l = 3,5 \text{ m}$ , y debe soportar una corriente de  $I = 75 \text{ A}$ . ¿Cuál será la sección de la línea a utilizar?

$$q = \frac{I \cdot 2 \cdot l}{\kappa \cdot U_{\text{vper}}}$$

$$q = \frac{75 \text{ A} \cdot 2 \cdot 3,5 \text{ m}}{65 \cdot 10^6 \frac{\text{S}}{\text{m}} \cdot 6,6 \text{ V}}$$

$$q = \underline{1,42 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2}$$

Según esto para la instalación sería suficiente una línea con conductores de sección  $q = 1,5 \text{ mm}^2$ .

No obstante, para una intensidad  $I = 75 \text{ A}$  no es permisible una sección tan pequeña. La línea se calentaría excesivamente y el calor podría destruir los aislantes.

Las pérdidas de potencia nos lo aclararán:

$$P_v = \frac{I^2 \cdot 2 \cdot l}{\kappa \cdot q}$$

$$P_v = \frac{75^2 \text{ A}^2 \cdot 7 \text{ m}}{56 \cdot 10^6 \frac{\text{S}}{\text{m}} \cdot 1,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2}$$

$$P_v = \underline{469 \text{ W}}$$

Una explicación del calentamiento excesivo es la razón de la intensidad de corriente a la sección del conductor. Este cociente se denomina **densidad de corriente**, y no puede ser pues excesivamente grande.

La densidad de corriente indica cuántos ampere circulan por metro cuadrado de sección del conductor.

Hay distintas organizaciones (ASTM, AIEE, VDE, etc.) que indican en sus normas la máxima carga permanente permisible en conductores aislados para el montaje de instalaciones de potencia con tensiones de hasta 600 V y 1000 V. Tomemos como ejemplo los valores de la tabla 9,1 que se refieren a temperaturas ambiente de hasta 25°C. Para temperaturas mayores las cargas permanentes permisibles son menores.

En la tabla se distinguen tres grupos de líneas.

Grupo 1: Una o varias líneas situadas en un tubo.

Grupo 2: Líneas de varios conductores, por ejemplo líneas revestidas, líneas paralelas (planas), líneas en tubos, líneas móviles.

Grupo 3: Líneas de un solo conductor, líneas aéreas desnudas y cableado en los armarios de conexiones.

En nuestro ejemplo necesitaremos, pues, una sección de por lo menos  $q = 16 \text{ mm}^2$  (grupo 2).

Antes de construir una instalación eléctrica debemos calcularla. Las líneas eléctricas deben calcularse de manera que cumplan los siguientes requisitos:

**Densidad de corriente**

Símbolo  $J$

$$J = \frac{I}{q}$$

$$[J] = \frac{A}{m^2}$$

**Tabla 9.1: Carga permanente permisible para líneas aisladas, temperatura ambiente hasta 25° C**

Sección nominal mm <sup>2</sup>	Grupo 1		Grupo 2		Grupo 3	
	Cu A	Al A	Cu A	Al A	Cu A	Al A
0,75	—	—	13	—	16	—
1	12	—	16	—	20	—
1,5	16	—	20	—	25	—
2,5	21	16	27	21	34	27
4	27	21	36	29	45	35
6	35	27	47	37	57	45
10	48	38	65	51	78	61
16	65	51	87	68	104	82
25	88	69	115	90	137	107
35	110	86	143	112	168	132
50	140	110	178	140	210	165
70	175	—	220	173	260	205
95	210	—	265	210	310	245
120	250	—	310	245	365	285
150	—	—	355	280	415	330
185	—	—	405	320	475	375
240	—	—	480	380	560	440
300	—	—	555	435	645	510
400	—	—	—	—	770	605
500	—	—	—	—	880	690

Tabla 9.2.: Sección mínima de los conductores de líneas

Tipo de montaje	Sección mínima en mm <sup>2</sup>	
	para	para
Montaje fijo y protegido	1,5	2,5
Líneas en equipo de conmutación y distribución para intensidades de hasta 2,5 A	0,5	—
más de 2,5 A hasta 16 A	0,75	
más de 16 A	1,0	
Montaje al aire libre sobre aisladores		
Distancia entre los puntos de sujeción hasta 20 m	4	16
más de 20 hasta 45 m	6	16 (de varios hilos)
Líneas móviles para la conexión de aparatos portátiles ligeros con un consumo de corriente de hasta 1 A y longitud máxima del cable de conexión de 2 m, cuando así lo indiquen las instrucciones del aparato correspondiente	0,1	—
Aparatos con un consumo máximo de corriente de hasta 2,5 A y longitud máxima del cable de conexión de 2 m, cuando así lo indiquen las instrucciones del aparato correspondiente	0,5	
Aparatos con un consumo máximo de corriente de 10 A, enchufes de aparatos y alargaderas de hasta 10 A de intensidad nominal	0,75	
Aparatos con un consumo de corriente de más de 10 A, enchufes múltiples, enchufes de aparatos y alargaderas con más de 10 A y hasta 16 A de intensidad nominal	1,0	
Hilos para portalámparas	0,75	
Cadenas de luces para interiores		} véase 0710, 3.ª parte
Entre la cadena de luz y el enchufe	0,75	
Entre las diferentes bombillas	0,5	
Líneas aéreas de potencia	véase	

## Fusible



Fig. 9.4. Juego de cortacircuitos de 10 A para baja tensión. De izquierda a derecha, fusible DIA-ZED y fusible NEOZED.

- No puede sobrepasarse la caída de tensión permisible.
- No puede sobrepasarse la máxima carga permisible.
- La resistencia mecánica de las líneas ha de ser suficiente (ver tabla 9.2, extracto de la norma VDE 0100 § 41).

La carga permanente permisible de las líneas eléctricas no debe sobrepasarse. Las líneas se calculan y dimensionan para la corriente de régimen. Por tanto durante el funcionamiento normal apenas aparecen sobrecargas excesivas.

No ocurre lo mismo en caso de una avería. Por ejemplo, durante un cortocircuito pueden sobrepasarse los valores permisibles. En estos casos deben asegurarse las líneas con **dispositivos protectores contra sobrecargas**.

Para las diferentes secciones de las líneas y según su división en grupos también se deben montar dispositivos protectores de diferentes valores. La tabla 9.3 indica los valores de los dispositivos protectores correspondientes a cada una de las secciones nominales según la norma VDE 0100 § 41. Se pueden montar valores inferiores, pero nunca superiores a los permitidos.

No está permitido colocar dispositivos protectores de valores superiores a los prescritos por la VDE.

**Tabla 9.3: Valores de los dispositivos protectores correspondientes a las diferentes secciones nominales de líneas aisladas**

Sección nominal	Grupo 1		Grupo 2		Grupo 3	
	Cu A	Al A	Cu A	Al A	Cu A	Al A
0,75	—	—	13	—	16	—
1	12	—	16	—	20	—
1,5	16	—	20	—	25	—
2,5	21	16	27	21	34	27
4	27	21	36	29	45	35
6	35	27	47	37	57	45
10	48	38	65	51	78	61
16	65	51	87	68	104	82
25	88	69	115	90	137	107
35	110	86	143	112	168	132
50	140	110	178	140	210	165
70	175	—	220	173	260	205
95	210	—	265	210	310	245
120	250	—	310	245	365	285
150	—	—	355	280	415	330
185	—	—	405	320	475	375
240	—	—	480	380	560	440
300	—	—	555	435	645	510
400	—	—	—	—	770	605
500	—	—	—	—	880	690

Los fusibles y los disyuntores son dispositivos protectores, tanto en caso de sobrecarga como en caso de cortocircuito.

**Fusibles (cortacircuitos de baja tensión)**

Los fusibles son la parte más sensible de un circuito eléctrico. Si se sobrepasa la intensidad nominal a que está calibrado un fusible determinado, infaliblemente se funde el hilo protector y el circuito queda abierto.

Los fusibles del **sistema D** se llaman en la práctica **Diazed** y son para intensidades nominales de 20 A a 100 A y tensión nominal de 500 V. En el zócalo llevan un suplemento de ajuste que impide puedan colocarse fusibles para intensidades nominales superiores.

Los fusibles del **sistema DO** se llaman en la práctica **Neozed** (del griego, neo: nuevo) y están contruidos según el mismo principio que los del sistema D, pero son más pequeños. Son para intensidades nominales de 2 A a 100 A y tensión nominal de 380 V ( o de 250 V en corriente continua).

Los fusibles del sistema NH (del alemán, Niederspannungs: tensión baja; Hochleistungs: potencia alta) pueden cortar intensidades muy altas. Son para intensidades nominales hasta de 1250 A y tensión nominal de 500 V o, 600 V en alterna y 440 V en continua. Son de contactos de cuchilla y sólo deben ser manejados por personal especializado, pues no evitan como los anteriores el que se pueda colocar uno para mayor intensidad nominal con sus problemas consiguientes. Deben ponerse y quitarse con empuñaduras de quita y pon.

Todos los fusibles desconectan cuando hay una sobrecarga. El tiempo para ello es tanto más corto cuanto mayor es la sobrecarga. En las tablas siguientes se dan los tiempos de desconexión para protección de cables y líneas. Los fusibles son obligatorios para la protección de los dispositivos de distribución y

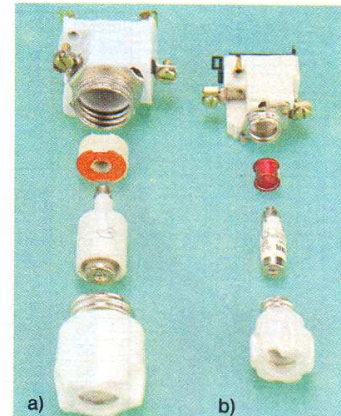


Fig. 9.5. a) Fusible DIAZED (del alemán Diametral abgestufter zweiseitiger Edisonschraubstöpsel - tapón de rosca Edison de dos partes y diámetro de paso escalonado); b) Fusible NEOZED.

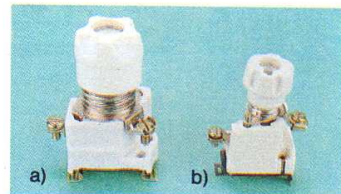


Fig. 9.6. a) Fusible DIAZED; b) Fusible NEOZED.

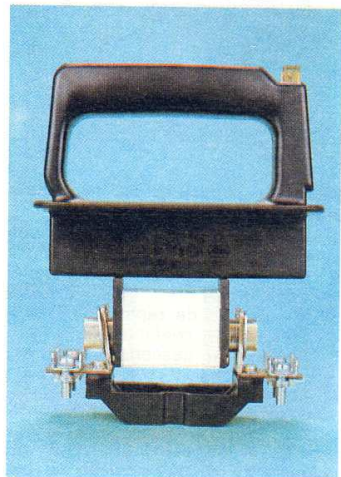


Fig. 9.7. Fusible NH con empuñadura.  
Unidad Operativa SENATI - Abanca

Intensidad nominal de la corriente	Color distintivo del suplemento de ajuste y del testigo de interrupción	Tiempo en segundos para la actuación de los fusibles con intensidades de corriente de					
		$2,5 \cdot I_N$		$3 \cdot I_N$		$4 \cdot I_N$	
		mínimo	máx.	mínimo	máx.	mínimo	máx.
2	rosa	2,2	140	0,15	8	0,004	0,15
4	castaño	3,2	220	0,22	8	0,0076	0,14
6	verde	4	140	0,32	9	0,01	0,15
10	rojo	4,7	200	0,5	13	0,012	0,19
16	gris	5,5	120	0,57	9	0,019	0,15
20	azul	8,3	115	0,83	10,7	0,027	0,17
25	amarillo	9	140	1	12,7	0,03	0,2
35	negro	11	150	1,3	14	0,039	0,27
50	blanco	19	200	1,7	18	0,043	0,36
63	cobreado	18	310	2,2	30	0,055	0,45
80	plateado	21	300	2,4	30	0,055	0,57
100	rojo	30	400	3,2	30	0,07	0,52

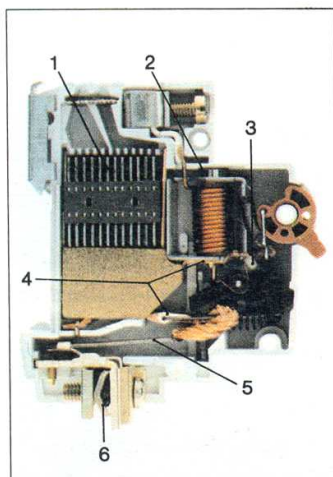


Fig. 9.8. Estructura de un fusible automático.

- 1 Cámara extintora (del arco voltaico).
- 2 Extinción rápida electromagnética.
- 3 Mecanismo de reposición.
- 4 Sistema de contactos.
- 5 Bimetal de desconexión de sobrecargas.
- 6 Bornes de conexión a la línea.

de los semiconductores, de modo que desconectan inmediatamente en caso de sobrecarga. En la práctica se llaman «protecciones rápidas» (de acción rápida), distintas a las protecciones con retardo o «lentas».

#### Fusibles automáticos

En lugar de fusibles se emplean muchas veces fusibles automáticos (figuras 9.8 y 9.10), que tienen la ventaja de poderse volver a conectar después que se hayan disparado. Con los fusibles automáticos se desconectan inmediatamente las corrientes grandes de cortocircuitos y, mediante un desconectador bimetalico, acaban también desconectándose cuando las sobrecorrientes son pequeñas. Los disyuntores están aprobados para intensidades nominales hasta de 63 A y 415 V en tensión alterna.

Los disyuntores para líneas, los de **característica L** según la norma VDE 0641, han de soportar una corriente de prueba 1,3 a 1,5 veces mayor que la intensidad nominal durante una hora sin desconectar; con una corriente 2,4 veces la de la prueba, el tiempo para la desconexión tiene que ser no menor que 0,1 segundo y, si es 3,5 veces la de prueba, antes de 0,1 segundo (figura 9.9).

Para la protección de aparatos están los fusibles automáticos de **característica G**. Para sobrecargas pequeñas desconectan antes que los de característica L y para sobrecargas grandes más tarde (fig. 9.9).

Los elementos de protección deben desconectar cuando aparecen sobrecorrientes. Los casos críticos de desconexión se presentan en los cortocircuitos. Los disyuntores para líneas son para intensidades de 3000 A, 6000 A y 10 000 A. También es esencial el tiempo que transcurre hasta la desconexión desde que aparece el fallo (el cortocircuito), que viene dado por las clases 1, 2 y 3 limitadoras de corriente. A igualdad de cortocircuito, la desconexión es más rápida cada vez que aumenta el número de clase.

#### Selectividad

Los elementos de protección deben montarse al principio de todo circuito eléctrico, así como en aquellos puntos que tienen menos capacidad de carga, como son los puntos donde disminuye la sección.

**Tabla 9.3: Valores de los elementos de protección correspondientes a las diferentes secciones nominales de líneas aisladas**

Sección nominal mm <sup>2</sup>	Grupo 1		Grupo 2		Grupo 3	
	Cu A	Al A	Cu A	Al A	Cu A	Al A
0,75	—	—	6	—	10	—
1	6	—	10	—	10	—
1,5	10	—	10 <sup>1</sup>	—	20	—
2,5	16	10	20	16	25	20
4	20	16	25	20	35	25
6	25	20	35	25	50	35
10	35	25	50	35	63	50
16	50	35	63	50	80	63
25	63	50	80	63	100	80
35	80	63	100	80	125	100
50	100	80	125	100	160	125
70	125	—	160	125	200	160
95	160	—	200	160	250	200
120	200	—	250	200	315	200
150	—	—	250	200	315	250
185	—	—	315	250	400	315
240	—	—	400	315	400	315
300	—	—	400	315	500	400
400	—	—	—	—	630	500
500	—	—	—	—	630	500

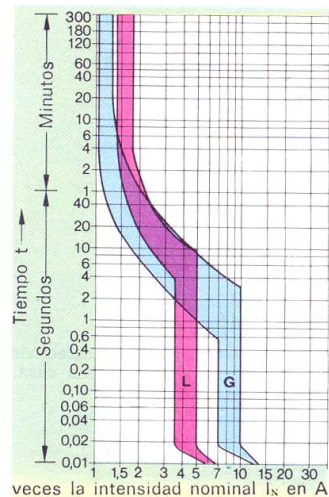
<sup>1</sup> Para cordones con sólo 2 hilos se puede seleccionar un elemento de protección de 16 A apropiado a su capacidad de sobrecarga final fijada internacionalmente

En las instalaciones grandes existen siempre varios circuitos eléctricos y todos ellos deben protegerse por separado anteponiéndoles una protección mayor en su línea mayor de alimentación (como por ejemplo, la línea de entrada que alimenta a todo un piso). Varias líneas de pisos se pueden reunir en una sola y formar la acometida general. Ésta, que tiene a su vez una sección mayor, se vuelve a proteger con otro dispositivo mayor. Así se asegura que en caso de avería sólo actúa el elemento de protección inmediatamente anterior al punto de avería. Uno para 16 A actúa antes que otro para 20 A. Este sistema de protección se llama selectividad.

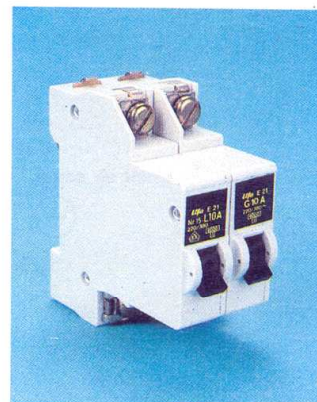
Por selectividad se entiende la protección gradual de una instalación de modo que en caso de avería sólo se desconecte el elemento de protección contra sobrecorrientes inmediato anterior al punto de la avería.

Supongamos (figura 9.12) que en una vivienda el circuito eléctrico para alumbrado está protegido con un disyuntor de 16 A, la cocina eléctrica con un disyuntor de 20 A y el calentador de agua con un fusible de 25 A.

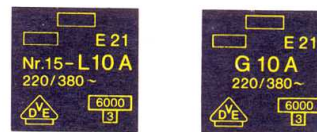
Cuando en este circuito aparezca un cortocircuito, deberá desconectar el elemento más cercano al punto de avería; en ningún caso deberá desconectar F 4 ni F 5.



**Fig. 9.9.** Características L y G.



**Fig. 9.10.** Disyuntor con características L y G.



**Fig. 9.11.** Símbolos de la capacidad de desconexión de cortocircuito y de la clase límite de corriente.



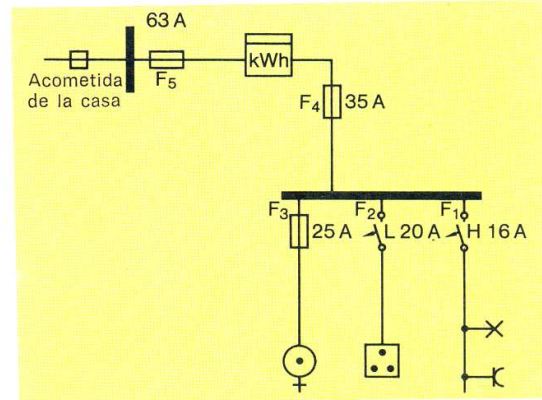


Fig. 9.12. Selectividad en la instalación de una casa.

La selectividad está asegurada en las combinaciones F 1 - F 4 y F 2 - F 4, pero no del todo en la combinación F 3 - F 4, pues un disyuntor de 35 A puede en determinadas condiciones desconectar antes que uno lento de 25 A.

Para garantizar la selectividad debe, siempre que sea posible, protegerse con valores dos pasos superiores al anterior. Así pues, F 4 debería ser de 50 A.

#### Ejercicios sobre 9

1. ¿Qué condiciones deben cumplirse para la instalación correcta, según las normas, de líneas eléctricas?
2. ¿En qué puntos del circuito deben montarse dispositivos de protección contra sobrecargas?
3. ¿Bajo qué condiciones está garantizada la selectividad de una instalación?
4. ¿En qué se diferencian los fusibles lentos de los rápidos?
5. ¿En qué se diferencian los fusibles de los relés disyuntores?
6. ¿Cuál puede ser la longitud máxima de un cable de dos hilos de  $q = 1,5 \text{ mm}^2$  si debe circular una corriente de 16 A y la máxima caída de tensión permisible es 3,3 V?
7. ¿Cuál deberá ser la sección de los conductores a montar para un calentador eléctrico ( $U_N = 220 \text{ V}$ ,  $P_N = 4 \text{ kW}$ ) si la longitud de la línea es 12 m y la caída de tensión permisible el 1,5 %? (Conductores de cobre.)
8. ¿Qué proporción de su potencia nominal  $P_N = 1000 \text{ W}$  recibe una plancha eléctrica si se produce en la línea una caída de tensión del 10 %?

## 10. Circuitos eléctricos técnicos

Un circuito eléctrico completo se compone de la fuente de tensión, los aparatos conmutadores, las líneas, las cargas y los eventuales dispositivos de medida.

La fuente de tensión suele encontrarse en una central eléctrica. Desde el punto de vista de la instalación de consumo se puede suponer que la fuente de tensión es la acometida general.

Los aparatos conmutadores interrumpen o cierran el circuito eléctrico. Pueden accionarse bien a mano o indirectamente (electromagnética, hidráulica, neumáticamente, etc.). Los conductores de las líneas son o bien de cobre o de aluminio. Según su estructura y aislamiento pueden utilizarse para uno o para varios tipos de instalaciones.

Los aparatos de medida sólo suelen ser los contadores para medir el trabajo eléctrico. En algunos casos también se realizan medidas de tensión y de intensidad.

La red más difundida entre nosotros es la **red trifásica de cuatro conductores**, con las tres fases L1, L2 y L3 y el neutro N. El punto neutro del secundario del transformador de la central suele estar puesto a tierra, con lo que las fases tienen una tensión de 220 V respecto a tierra. La tensión entre dos fases es 380 V (ver fig. 10.1). Estos valores de tensión se obtienen de la combinación de tres tensiones alternas desplazadas unas respecto a otras en el tiempo.

Borne de tierra

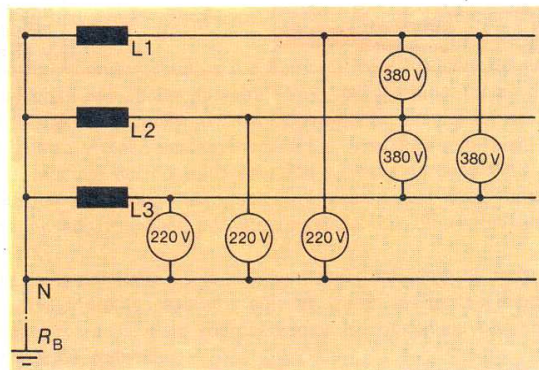


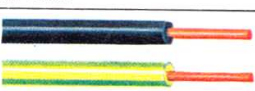











Fig. 10.1. Tensiones en una red trifásica con neutro.

Los edificios de viviendas suelen tener una acometida de cuatro conductores o una de sólo dos (una fase y el neutro). En caso de utilizar una toma de tierra de protección todas las cubiertas metálicas de los aparatos eléctricos de la instalación se conectarán a ella.

### 10.1. Tipos de conductores y sus aplicaciones

Denominación	Figura	Indicativo	Aplicación
Hilos con plástico para portalámparas		TF	Cableado de lámparas
Hilo simple con aislamiento de goma y mayor resistencia al calor		RFH	Para aparatos de alumbrado hasta 300 V
Cables simples con plástico		TFF	Para aparatos de alumbrado, motores fraccionarios y circuitos de tensión baja
Líneas planas		NMC	Montaje en instalaciones empotradas y visibles en locales secos
Líneas revestidas		THWN	Montaje en instalaciones empotradas y visibles en locales secos y húmedos al aire libre
Tubos de cables revestidos		MTW	Montaje en instalaciones empotradas y visibles en locales secos y húmedos y al aire libre
Líneas con revestimiento de plomo		MTWL	Montaje en instalaciones empotradas y visibles en locales secos y húmedos y al aire libre

Cordones flexibles			
Denominación	Figura	Indicativo	Aplicación
Líneas gemelas		SPT	En locales húmedos para esfuerzos mecánicos muy pequeños. No apta para aparatos caloríficos
Líneas sencillas con cubierta de plástico		TFD	En locales húmedos para esfuerzos mecánicos pequeños en aparatos portátiles ligeros
Líneas medias con cubierta de plástico		SRDT	En locales húmedos para esfuerzos mecánicos medios, también para electrodomésticos en locales húmedos
Líneas en tubo de goma (modelo sencillo)		SSJ	En locales húmedos para pequeños esfuerzos mecánicos y aparatos portátiles y caloríficos
Líneas en tubo de goma (modelo resistente)		SJ-RHW	Para esfuerzos mecánicos medios, en locales secos, húmedos y muy húmedos. Según la norma VDE 0165 también está permitido en locales industriales con peligro de explosión. Al aire libre, en locales industriales con peligro de incendios y en aguas para uso industrial

## 10.2. Esquemas de circuitos

En los circuitos de una lámpara del apartado 10.3 se emplean una serie de representaciones esquemáticas que vamos a tratar ahora.

Para el montaje de circuitos eléctricos se necesita una determinada documentación, entre la que puede encontrarse esquemas, diagramas, tablas y descripciones técnicas. En la mayoría de los casos suelen ser suficientes uno o varios esquemas.

El **esquema de conexiones** muestra todos los aparatos con sus conexiones.

El **esquema de conexiones monopolar** muestra todos los aparatos (cajas de fusibles, cajas de distribución, combinaciones de interruptores, bombillas, etc.) y líneas (de dos, tres, cuatro y cinco cables) necesarios. Mediante este esquema se puede efectuar el montaje de todos los aparatos y líneas de conexión.

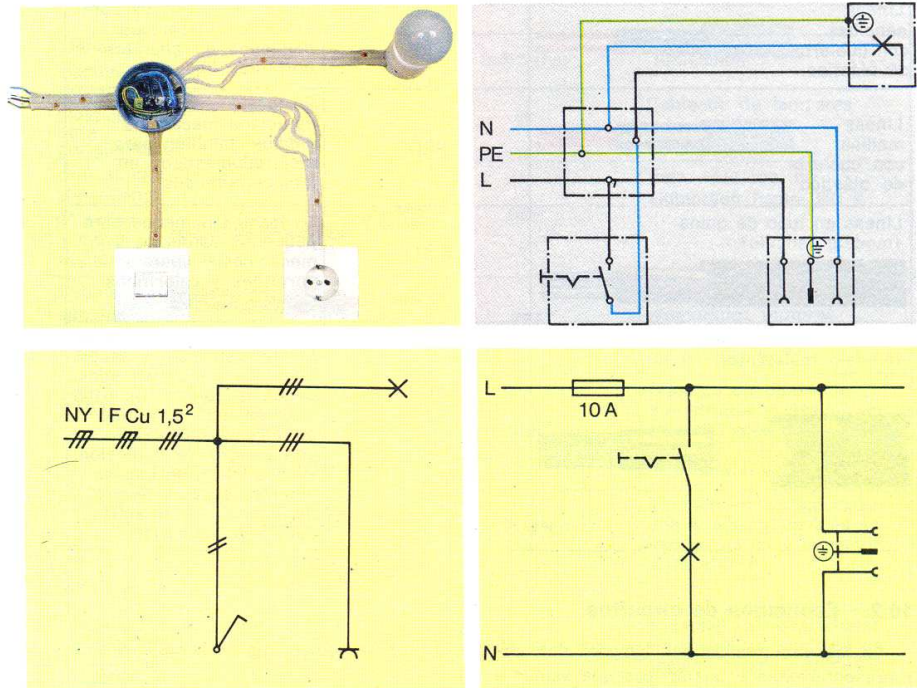
El **esquema de conexión multipolar** reproduce la conexión real a conectar. No obstante resulta complicado y apenas permite reconocer las diferentes funciones eléctricas.

El **diagrama de flujo de la corriente** es la representación completa de la función del circuito. Si de los diferentes aparatos sólo se trazan las partes importantes, éstas aparecerán separadas. Esta representación se denomina por ello **diagrama de flujo de corriente reducido**.

### 10.3. Circuitos de una lámpara

#### Circuito de desconexión con enchufe con toma de tierra

En los circuitos de desconexión se conecta y desconecta un aparato eléctrico (en los esquemas siguientes una bombilla) desde un único interruptor.



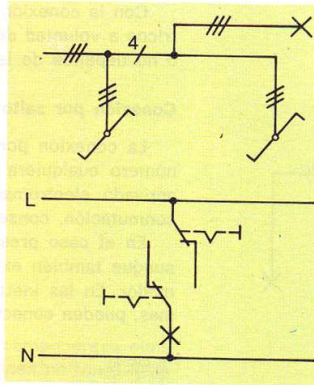
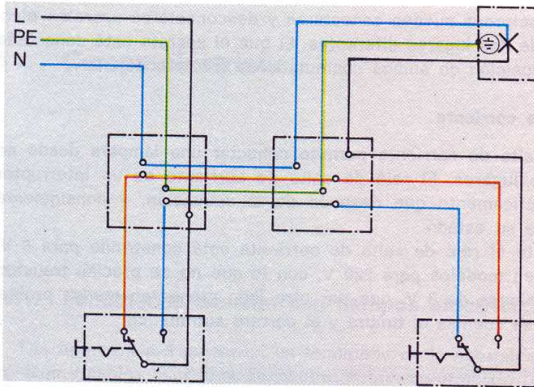
#### Circuito en serie (página derecha, centro)

En el circuito en serie se conectan dos aparatos eléctricos, bien conjuntamente o por separado, desde una sola caja de interruptores. Este circuito es en realidad un circuito de desconexión doble. El interruptor en serie es un interruptor doble, pudiéndose accionar cada interruptor por separado.

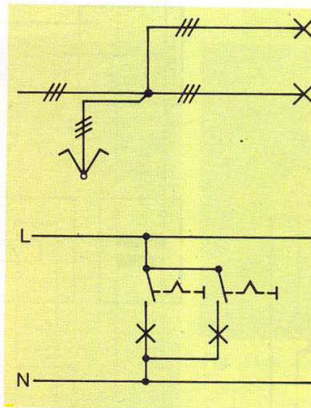
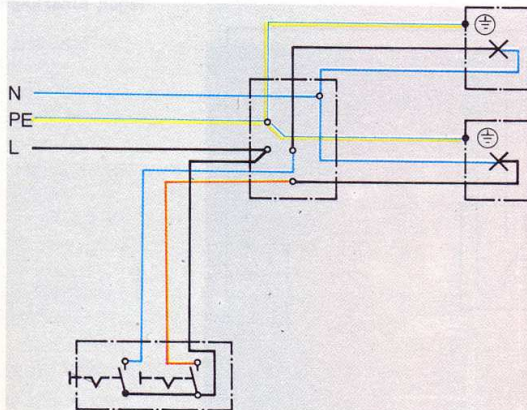
#### Conexión cruzada (página derecha abajo)

Con la conexión cruzada pueden conectarse y desconectarse aparatos eléctricos a voluntad desde tres o más lugares diferentes. En el circuito representado sólo se precisa un conmutador. Al principio y al final de la cadena de conmutadores se encuentran sendos conmutadores recíprocos. Un conmutador cruzado no es más que dos conmutadores recíprocos acoplados mecánicamente; por ello todo conmutador cruzado puede también utilizarse como conmutador recíproco.

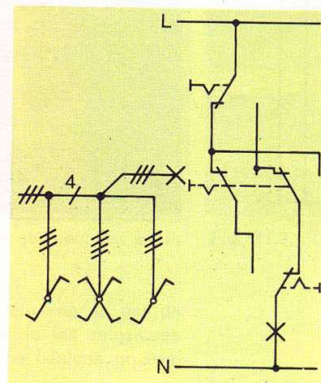
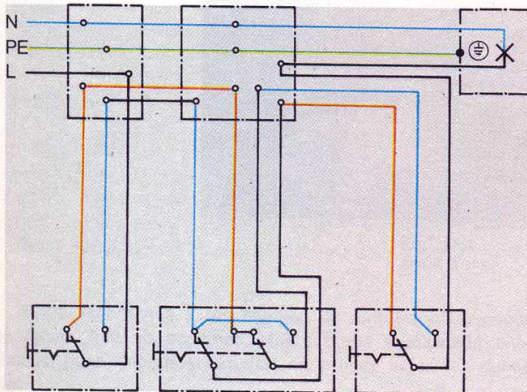
Conexión recíproca



Circuito en serie



Conexión cruzada



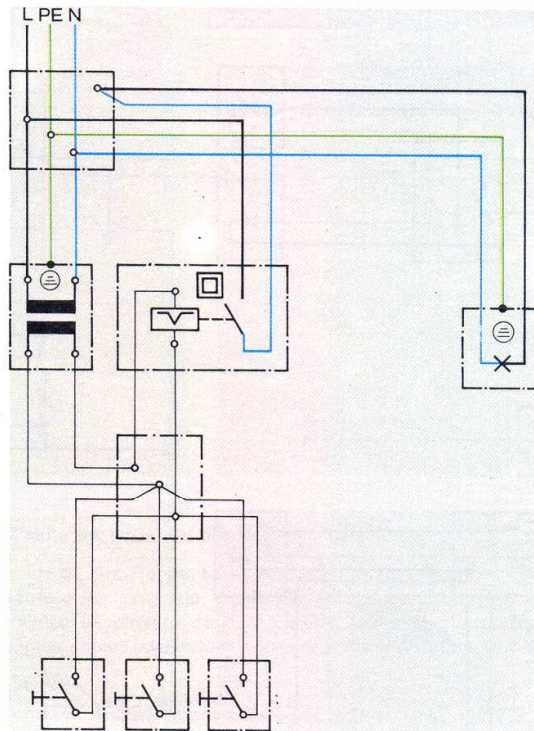
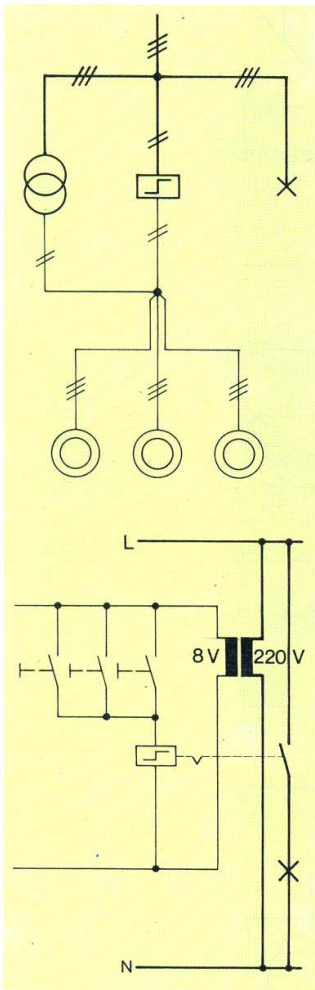
**Conexión recíproca** (página 123 arriba)

Con la conexión recíproca pueden conectarse y desconectarse aparatos eléctricos a voluntad desde dos lugares diferentes. El que el aparato esté conectado o no depende de la posición de ambos conmutadores (recíprocos).

**Conexión por salto de corriente**

La conexión por salto de corriente permite conectar una lámpara desde un número cualquiera de lugares. El relé de salto de corriente es un interruptor activado electromagnéticamente que después de la activación, y consiguiente conmutación, conserva su estado.

En el caso presente el relé de salto de corriente está construido para 8 V, aunque también existen modelos para 220 V, con lo que no se precisa transformador. En las instalaciones de 8 V, que por otro lado presentan menos problemas, pueden conectarse además el timbre y el portero automático.



## 11. Campo eléctrico

### 11.1. Fenómenos básicos con campos eléctricos

Las figuras 1 a 3 muestran un fenómeno de la naturaleza, componentes electrónicos y cables blindados, respectivamente. En principio parecen no tener nada en común, pero no obstante en todas ellas el campo eléctrico desempeña un importante papel.

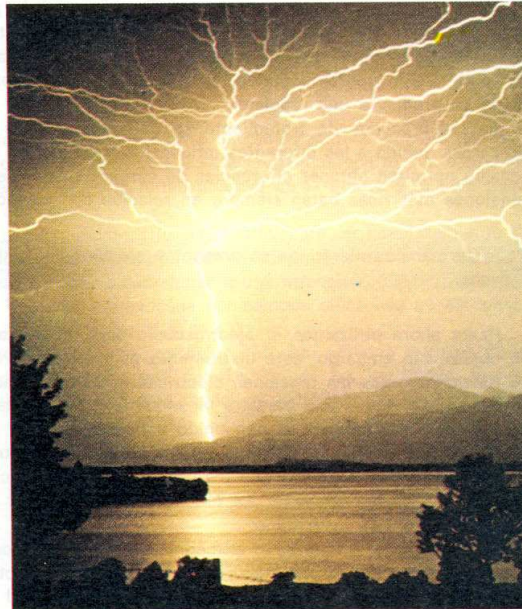


Fig. 11.1. Descarga eléctrica en la atmósfera.

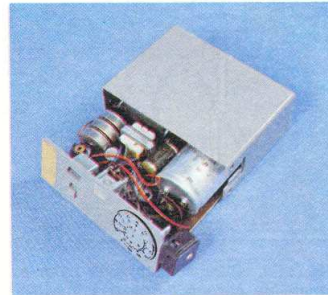


Fig. 11.2. Condensador de un flash.



Fig. 11.3. Cables blindados.

Estos fenómenos y los campos de aplicación indicados sólo son un par de ejemplos. Aún no podemos efectuar una explicación exacta de las relaciones físicas, pues debemos estudiar en primer lugar los conceptos básicos necesarios.



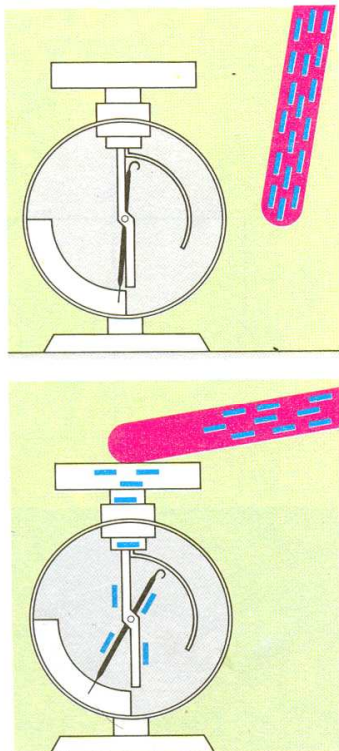


Fig. 11.4. Comprobación de la existencia de cargas eléctricas mediante el electroscopio.

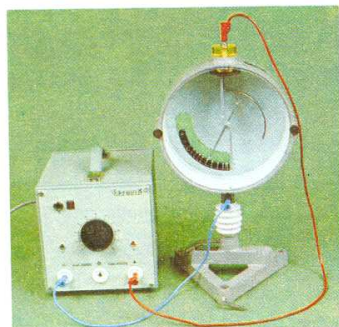


Fig. 11.5. Medida electrostática de tensión.

Para lograr una comprensión exacta del campo eléctrico y una manipulación correcta de los aparatos técnicos correspondientes nos servirán los apartados siguientes.

#### 11.1.1. Causas y efectos de los campos eléctricos

Ya hemos tratado brevemente en el apartado 1.4.1. los fenómenos eléctricos básicos relacionados con campos eléctricos. Mediante frotamiento obtuvimos una separación de cargas. Estas cargas en reposo influían sobre el espacio colindante, con lo que aparecía una zona en la que actuaban fuerzas sobre otras cargas eléctricas.

El campo eléctrico es un espacio en el que actúan fuerzas sobre cargas eléctricas.

Según el tipo o signo de la carga aparece una atracción o una repulsión. Las cargas eléctricas son siempre la causa de los campos eléctricos.

Las cargas dan lugar a campos eléctricos.

El estado de carga de un determinado objeto puede ponerse de manifiesto mediante un electroscopio. Cuando se toca con el objeto cargado el terminal superior del electroscopio algunas cargas se desplazan a la aguja móvil (figura 11.4). Como sobre la varilla fija se encuentran también cargas del mismo signo se producirá una repulsión.

En los procesos de frotamiento se obtienen siempre diferentes cantidades de cargas debido a las diferentes influencias externas. En cambio, las fuentes de tensión permiten obtener diferencias de cargas unívocamente determinadas. Las tensiones eléctricas están siempre en relación con campos eléctricos.

Los campos eléctricos se presentan siempre que existen tensiones eléctricas.

Hasta ahora utilizamos el electroscopio para medir cantidades de carga en un objeto. Sin embargo, este instrumento es también apropiado para la medida de tensiones, pues las tensiones eléctricas aparecen a causa de una separación de cargas. La figura 11.5 muestra un montaje experimental en el que los polos de la fuente de tensión se han unido con la cubierta y con el sistema de la aguja del instrumento de medida. Tenemos, pues, un instrumento electrostático de medida, lo que significa que para mantener la desviación de la aguja no es preciso que circule corriente. La tensión se puede medir simplemente a través de la repulsión de las cargas.

Si observamos atentamente la medida de las cargas con el electroscopio nos daremos cuenta de un fenómeno especial del campo eléctrico. La aguja del instrumento indicador se desviará antes de que toquemos el electrodo de contacto (fig. 11.6). La desviación de la aguja es tanto mayor cuanto menor es la distancia entre la varilla cargada y el electrodo del electroscopio. ¿Cómo podemos explicar este fenómeno?

Toda carga da lugar a un campo eléctrico a su alrededor. Cuando en este campo se encuentren otras cargas aparecerán fuerzas sobre ellas. Como el electrodo de contacto es de metal, en él se hallarán electrones libres, o sea cargas.

El campo eléctrico que se forma alrededor de la varilla (el origen de este campo son cargas negativas) repele a los electrones del electrodo (fig. 11.7).

Por tanto, se producirá un desplazamiento de cargas que quedará indicado por el instrumento de medida. Este fenómeno se denomina **influencia electrostática**.

La influencia eléctrica es una modificación de la distribución de cargas debida a la acción de campos eléctricos.

Gracias a la influencia podemos explicar el por qué podemos atraer materiales descargados con objetos cargados. Como ejemplos nos servirán los experimentos descritos en las figuras 11.8 y 11.9.

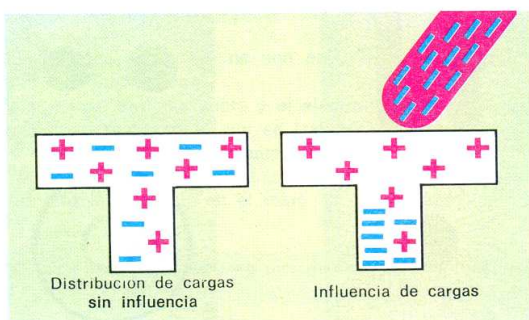


Fig. 11.6. Influencia de la distribución de cargas mediante campos eléctricos.

Fig. 11.7. Influencia electrostática.

En la figura 11.8 se aproxima una bola 1 cargada negativamente a otra bola neutra 2. Los electrones libres de la bola 2 serán repelidos con lo que aparecerá un desequilibrio de cargas. Entre la mitad positiva de la bola 2 y la bola negativa 1 aparecerá una atracción.

La varilla cargada negativamente (fig. 11.9) provocará un desplazamiento de las cargas en los recortes de papel, neutros en conjunto, con lo que el punto de contacto se volverá positivo y dará lugar a una atracción.

La polarización de la materia provocada por campos eléctricos se aprovecha en los filtros de aire electrostáticos (fig. 11.10).

La corriente de aire que contiene partículas de polvo se lleva a través de un campo eléctrico, donde se obtiene una polarización de las partículas, que se depositan sobre los electrodos. De este modo se consigue limpiar la corriente de aire.

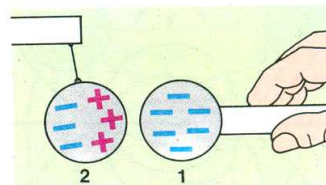


Fig. 11.8. Atracción de una bola metálica neutra por influencia.

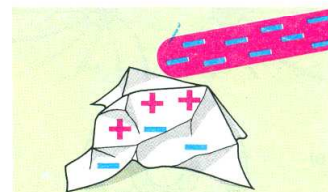


Fig. 11.9. Atracción de recortes de papel por influencia.

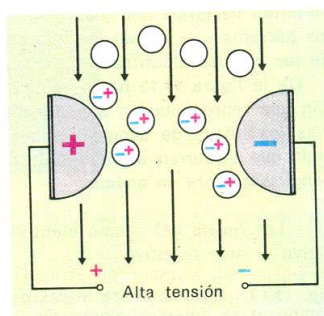


Fig. 11.10. Esquema del funcionamiento de un filtro de aire electrostático.

Unidad Operativa SENATI - Abancay

Prof. Edwin Gamarró Samanés

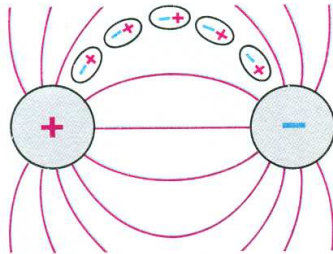


Fig. 11.11. Cadena de virutas polarizadas en un campo eléctrico.

11.1.2. Formas del campo eléctrico

Los campos eléctricos modifican las propiedades del espacio colindante. Sin embargo, no poseemos órganos sensoriales para percibir esta modificación. Sólo podemos reconocer sus efectos y desarrollar modelos a partir de ellos.

Para probar estos efectos esparciremos entre los electrodos, por ejemplo, virutas de plástico. Debido al campo eléctrico obtendremos una orientación determinada de las partículas, con lo que podremos reconocer la estructura del campo eléctrico en un plano (fig. 11.12).

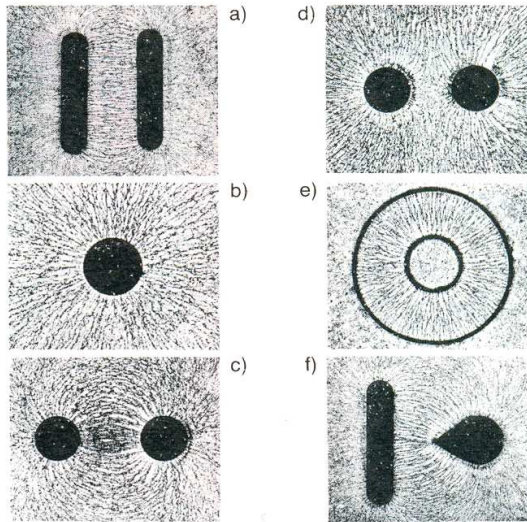
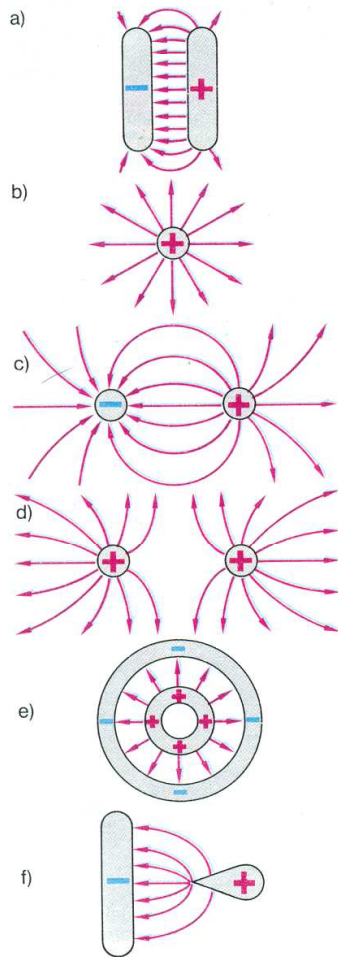


Fig. 11.12. Proyecciones de diversos campos.

Las virutas se orientan simplemente porque el campo eléctrico modifica la distribución de las cargas en ellas. La influencia da lugar a que las cargas positivas y negativas dejen de estar repartidas uniformemente. La figura 11.11 muestra una cadena de virutas entre dos electrodos. Cada partícula se ha convertido en un dipolo (partícula con dos polos).

Las curvas descritas por las partículas se denominan líneas de campo, y nos permiten hacernos una idea o modelo de la estructura del campo eléctrico. En los párrafos que siguen las utilizaremos para representar y explicar los efectos de los campos eléctricos.

De la figura 11.12 hemos obtenido los esquemas de la figura 11.13, que nos dan una representación simplificada de la estructura del campo eléctrico. Además las líneas de campo presentan un determinado sentido. Hemos determinado que discurran del electrodo positivo al electrodo negativo, incidiendo perpendicularmente en ambos.

Las líneas del campo eléctrico tienen un sentido, que va del polo positivo al polo negativo.

Fig. 11.13. Diagramas de líneas de campo entre diversos electrodos.

A partir de los diagramas de las líneas de campo pueden sacarse más conclusiones sobre las leyes que rigen el campo eléctrico. Para ello vamos a observar dos superficies de igual tamaño en dos campos eléctricos diferentes (figuras 11.14 y 11.15).

En la superficie del campo encuadrada en la figura 11.14 las líneas de campo entre las dos placas discurren paralelamente. El campo es uniforme, con lo que también serán uniformes la acción de las fuerzas sobre cargas que se encuentren en esta zona. Decimos que el **campo es homogéneo**.

Si las líneas de campo discurren paralelamente y la separación entre todas ellas es la misma el campo es homogéneo.

En la figura 11.15 las líneas de campo no son paralelas. Por lo tanto el **campo no será uniforme sino inhomogéneo**.

Comparemos ahora el campo entre la punta y el electrodo plano de la figura 11.15 con la afirmación anterior; vemos que se trata de un campo inhomogéneo. Además junto a la punta las líneas de campo están mucho más próximas que en las cercanías del electrodo plano. Esto muestra que en esta zona, junto a la punta, el campo es más intenso que en el resto. En estos puntos es más fácil extraer electrones.

La distancia entre las líneas de campo es una medida de la intensidad del campo eléctrico.

### 11.1.3. Blindaje de campos eléctricos

En muchas instalaciones los campos eléctricos son nocivos, pues provocan por influencia un desplazamiento de cargas, y por tanto una tensión. Por este motivo es necesario realizar blindajes, para los que se emplea cualquier metal, por ejemplo cobre, hierro o aluminio. Los blindajes pueden ser chapas macizas, rejillas o mallas.

Para comprender sus efectos realizaremos el experimento 11-1.

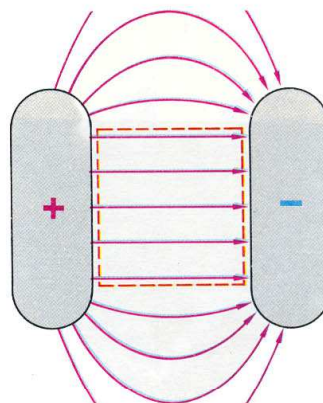


Fig. 11.14. Campo homogéneo.

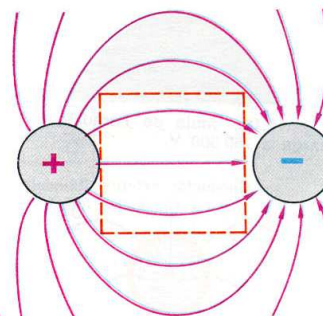
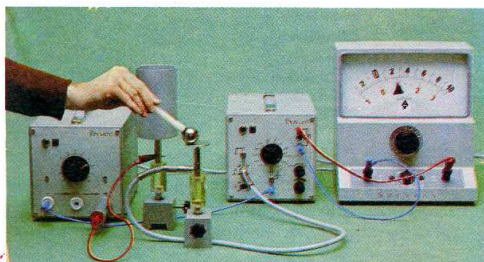


Fig. 11.15. Campo inhomogéneo.

#### Experimento 11-1: Distribución de las cargas en un recipiente

##### Montaje



##### Realización

Extraemos cargas primero del interior y después del exterior del recipiente, que está conectado a uno de los electrodos de la fuente de tensión. Medimos las cargas con el amplificador de medida.

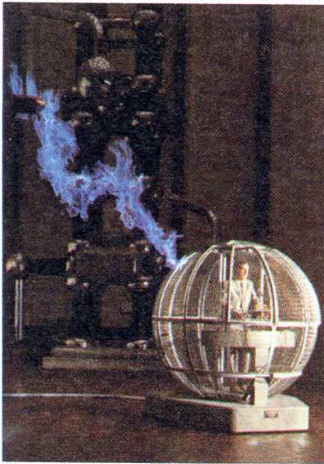


Fig. 11.16. Jaula de Faraday, descarga a 750 000 V.

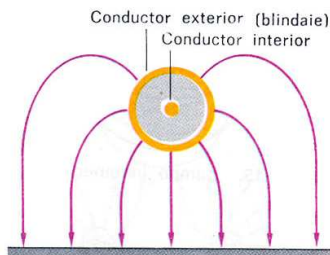


Fig. 11.17. Campo entre un cable blindado y una placa metálica.

### Resultado

En el interior no existen cargas (la aguja no se desvía). Sólo podemos extraer cargas de la parte exterior.

El resultado de este experimento ya lo conocemos de los diagramas de líneas de campo de 11.1.2, donde vemos que en el interior de una zona blindada (rodeada de metal) no existe campo eléctrico, pues las virutas de plástico permanecen desordenadas.

En una zona blindada con metal no hay campo.

¿Cómo podemos explicar este hecho?

Las líneas de campo empiezan en cargas positivas y terminan en las negativas, por tanto tienen un principio y un final. Las cargas quedan ligadas unas con otras por las líneas de campo.

Para el blindaje es suficiente una rejilla de metal o la carrocería de un coche (fig. 11.16).

El efecto de blindaje de determinados cables está representado en la figura 11.17. De este modo se pueden transmitir señales sin perturbaciones.

### Ejercicios sobre 11.1

1. ¿Cuál es la causa de los campos eléctricos?
2. Explicar el funcionamiento de un voltímetro electrostático.
3. Las sustancias eléctricamente neutras pueden ser influenciadas por campos eléctricos. Explicar cómo, tomando como ejemplo una lámina de plástico.
4. ¿Cuál es el sentido con el que se han definido las líneas de campo eléctrico?
5. Dibujar el diagrama de las líneas de campo entre los siguientes electrodos:
  - a) Dos placas paralelas (una positiva y otra negativa).
  - b) El conductor de «ida» y el de «vuelta» de un circuito eléctrico.
  - c) Un cable positivo respecto a tierra (negativa).
6. Explicar cuál es la diferencia entre los campos homogéneos y los no homogéneos.
7. Dibujar dos zonas de un campo eléctrico donde una tenga doble intensidad que la otra (utilizar líneas de campo).
8. ¿En qué punto de la figura 11.13f es máximo el campo eléctrico?

## 11.2. Leyes del campo eléctrico

Vamos ahora a investigar por separado y profundizar mediante experimentos las relaciones descritas hasta aquí.

### 11.2.1. Intensidad del campo eléctrico

Para poder hacer afirmaciones exactas sobre campos eléctricos debemos introducir las magnitudes convenientes. Como el campo eléctrico ejerce unos determinados efectos, el valor de estos efectos, la intensidad del campo eléctrico, será una de las magnitudes buscadas.

La acción de las fuerzas sobre cargas se utiliza para determinar la intensidad del campo eléctrico.

Para demostrar estas relaciones es conveniente utilizar campos homogéneos, que son los que aparecen entre dos placas paralelas conectadas a una fuente de tensión. Este tipo de dispositivos se denominan condensadores planos.

Como el campo en el interior tiene la misma intensidad en todos los puntos

(campo homogéneo, líneas paralelas a distancias iguales) también deberá ser uniforme la acción de las fuerzas.

Si en este campo introducimos una bola cargada, su desviación (fig. 11.18) nos mostrará la fuerza que actúa. Esta fuerza será tanto mayor cuanto mayor sea la carga.

Medidas más exactas darán como resultado una proporcionalidad directa:

$$F \sim Q$$

Esta relación se puede transformar en una ecuación introduciendo una constante.

$$F = k \cdot Q$$

Despejando k de la ecuación obtenemos:

$$k = \frac{F}{Q}$$

Esta fórmula nos indica que al ir aumentando la carga también aumentará la fuerza que actúa sobre ella. Por ejemplo, si duplicamos la carga obtendremos una fuerza doble. El cociente es siempre constante. Por tanto esta constante sólo depende del campo que dio lugar a la fuerza, y se denomina **intensidad del campo eléctrico**.

La intensidad del campo eléctrico indica cuánto vale la fuerza que actúa sobre una carga en un campo.

La intensidad de campo en el condensador plano depende de su estructura y de la fuente de tensión conectada. Entre estas magnitudes y la intensidad de campo debe existir una relación. Para estudiarla realizaremos el experimento 11-2.

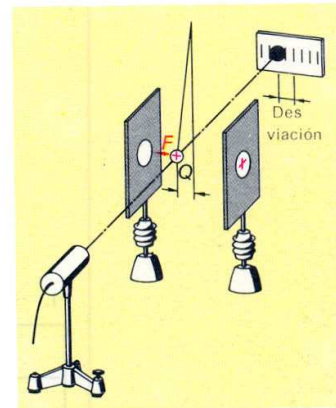


Fig. 11.18. Acción de una fuerza sobre cargas en un campo eléctrico.

**Intensidad del campo eléctrico**

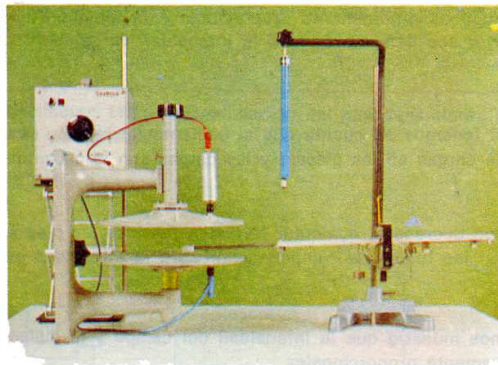
Símbolo  $E$

$$E = \frac{F}{Q}$$

$$[E] = \frac{N}{C}$$

**Experimento 11-2: Intensidad de campo en el condensador plano**

**Montaje**



Colgada de una varilla aislada se encuentra una lámina metálica. Un extremo de la varilla está sujeto a una balanza que se encuentra en equilibrio.

**Realización**

Con la fuente de tensión llevamos una carga  $Q$  a la lámina de metal. A continuación la introduciremos en el campo por medio del dispositivo para medir la fuerza. La carga permanecerá constante durante todas las medidas.

Series de medida:

1. Manteniendo constante la separación entre las placas variaremos la tensión entre ellas y mediremos la fuerza.
2. Manteniendo constante la tensión variaremos la separación entre las placas y mediremos la fuerza.

**Resultados**

1.

N.º	F en mN	U en kV
1	0,16	1
2	0,30	2
3	0,50	3
4	0,64	4

$Q = \text{constante}$

$d = \text{constante}$   
 $d = 50 \text{ mm}$

2.

N.º	F en mN	d en mm
1	0,64	25
2	0,46	35
3	0,36	45
4	0,30	55

$Q = \text{constante}$

$U = \text{constante}$   
 $U = 2 \text{ kV}$

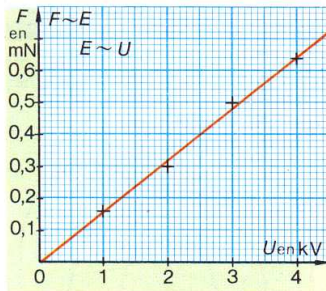


Fig. 11.19. Fuerza sobre cargas en función de la tensión en un campo eléctrico homogéneo.

Al valorar los resultados debemos tener en cuenta que no se ha medido directamente la intensidad del campo, pero que podemos calcularla mediante la fórmula:

$$E = \frac{F}{Q}$$

Como la carga  $Q$  permanece constante en todas las medidas, la fuerza que hayamos medido será directamente proporcional a la intensidad del campo eléctrico ( $E \sim F$ ).

Si marcamos los puntos medidos en una gráfica y los unimos obtendremos las siguientes relaciones:

- La intensidad del campo es directamente proporcional a la tensión (figura 11.19). Cuanto mayor sea ésta mayor será la intensidad de campo.

$$E \sim U$$

Esto resulta evidente si tenemos en cuenta que al aumentar la tensión también aumenta el número de cargas en las placas; y las cargas son la causa del campo.

- La intensidad de campo decrece al aumentar la distancia entre las placas. Cuanto más largas son las líneas de campo, menor será la intensidad de éste.

Una valoración exacta nos muestra que la intensidad del campo y la distancia entre placas son inversamente proporcionales.

$$E \sim \frac{1}{d}$$

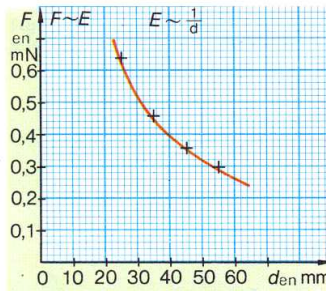


Fig. 11.20. Fuerza sobre cargas en función de la distancia entre placas en un campo eléctrico homogéneo.

La tensión y la separación entre placas determinan la intensidad del campo entre las placas del condensador. Si expresamos las dos proporcionalidades en una sola fórmula obtenemos:

$$E \sim \frac{U}{d}$$

La unidad de intensidad de campo eléctrico, como ya sabíamos de su definición general, es el newton/coulomb. No obstante, de la proporcionalidad del condensador plano obtenemos la unidad volt/metro. De momento ambas relaciones parecen diferentes, pero vamos a demostrar que son iguales.

Para iniciar la demostración partamos de que el trabajo mecánico es igual al trabajo eléctrico. La ecuación de unidades es:  $1 \text{ V A s} = 1 \text{ Nm}$ .

Despejando en esta ecuación  $1 \text{ V/m}$  y sustituyendo  $1 \text{ A s}$  por  $1 \text{ C}$ , obtenemos:

$$1 \frac{\text{V}}{\text{m}} = 1 \frac{\text{N}}{\text{C}}$$

La relación de proporcionalidad puede también escribirse en forma de ecuación, pues los valores numéricos coinciden. Obtenemos así una sencilla fórmula para calcular la intensidad de campo en el condensador plano.

La separación entre placas no se puede reducir a voluntad, pues podría producirse un arco voltaico. Cuando el campo eléctrico es muy intenso el aire deja de comportarse como aislante. La **rigidez dieléctrica** del aire vale aproximadamente  $3,2 \text{ kV/mm}$ , lo que significa que a una tensión de unos  $3,2 \text{ kV}$  y una separación de aproximadamente  $1 \text{ mm}$  se produce un arco voltaico.

**Intensidad de campo eléctrico en el condensador plano**

$$E = \frac{U}{d}$$

$$[E] = \frac{\text{V}}{\text{m}}$$

**11.2.2. Capacidad de un condensador**

De los experimentos precedentes sabemos que los condensadores pueden admitir cargas eléctricas. Con los experimentos siguientes vamos a explicar más detalladamente esta propiedad, empleando para ello un condensador de uso corriente.

Los condensadores para aplicaciones técnicas presentan multitud de formas. Sin embargo, todos se construyen según el mismo principio.

**Estructura básica de un condensador:**

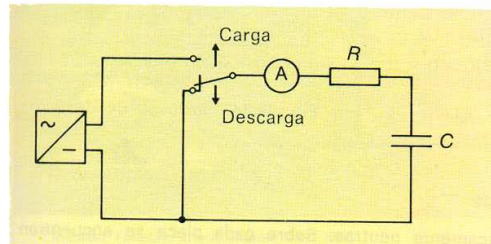
Dos conductores eléctricos entre los que se encuentra un aislante (dieléctrico).

**Condensador**



**Experimento 11-3: Comprobación del almacenamiento de cargas en un condensador**

**Montaje**



Abanca



**Realización**

El condensador se conecta a la fuente de tensión y posteriormente se descarga a través de un instrumento de medida.

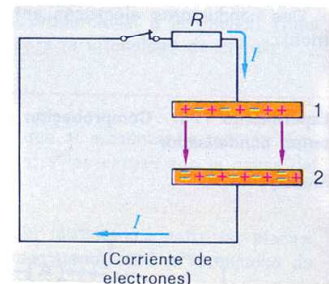
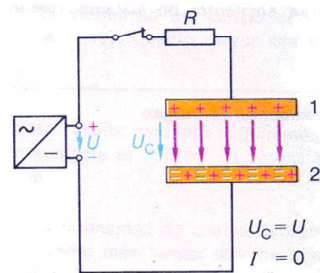
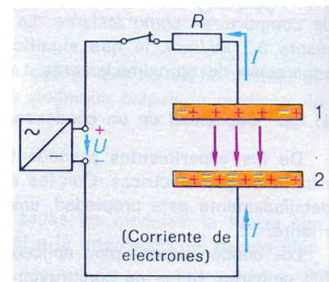
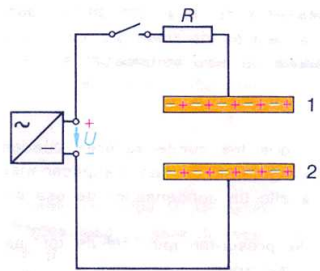
**Resultado**

Después de accionar el conmutador la aguja del amperímetro se desvía brevemente y vuelve a cero a continuación. Ha habido, pues, una circulación de cargas hacia las placas. Durante la descarga la aguja se desvía brevemente en sentido opuesto.

Las cargas han retornado (inversión del sentido de la corriente).

Vamos a estudiar ahora más detenidamente el resultado del experimento 11-3. Para ello diferenciaremos los siguientes estados y procesos:

1. Condensador descargado
2. Proceso de carga
3. Condensador cargado
4. Proceso de descarga

**1. Condensador descargado**

Las placas son eléctricamente neutras. Sobre cada placa se encuentran el mismo número de cargas positivas que negativas (fig. 11.21).

**2. Proceso de carga**

Por los conductores circula brevemente una corriente. El polo positivo extrae electrones de la placa 1, mientras que el polo negativo induce electrones adicionales en la placa 2. La tensión en el condensador aumenta (fig. 11.22).

**3. Condensador cargado**

Cuando el condensador está cargado su tensión es igual a la de la fuente. Ya no circula corriente. El condensador actúa como un aislante. Sin embargo, ha almacenado cargas (fig. 11.23).

**4. Proceso de descarga**

Si se desconecta la fuente de tensión y se unen ambas placas a través de una resistencia las cargas pueden compensarse mutuamente. La tensión en el condensador baja a cero (fig. 11.24).

El condensador es un almacén de cargas.

Según cual sea su estructura cada condensador poseerá una determinada capacidad eléctrica, o sea que podrá almacenar un determinado número de cargas. La unidad de capacidad eléctrica es el **farad**.<sup>1</sup>

**Capacidad eléctrica**  
 Símbolo C  
 Símbolo de la unidad F

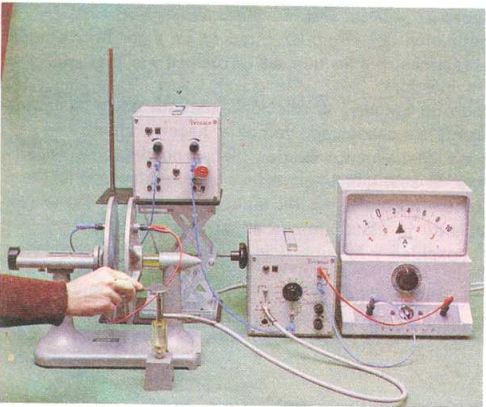
La capacidad eléctrica de un condensador es la cantidad de cargas que puede almacenar.

Por tanto la cantidad de carga de un condensador dependerá de su capacidad.

Por otro lado la cantidad de carga depende de la tensión, pues ésta es la causa del proceso de carga. Mediante el experimento 11-4 vamos a estudiar la relación exacta existente entre la tensión y la carga.

**Experimento 11-4: Relación existente entre la carga y la tensión en un condensador**

**Montaje**



<sup>1</sup> Michael Faraday, físico inglés, 1791-1867.

**Realización**

El condensador se carga a una determinada tensión. A continuación se descarga a través de un instrumento de medida de cargas. Como éstas son muy pequeñas conectaremos un amplificador antes del instrumento de medida.

**Resultado**

N.º	Q en $10^{-9}$ A s	U en V
1	6	50
2	13	100
3	24	200
4	35	300

$d = \text{constante}$   $d = 50 \text{ mm}$

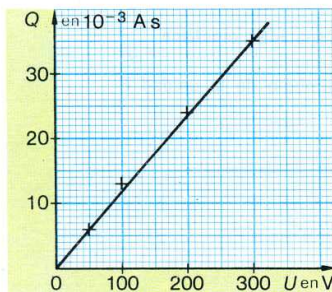


Fig. 11.25. Carga en función de la tensión en un condensador.

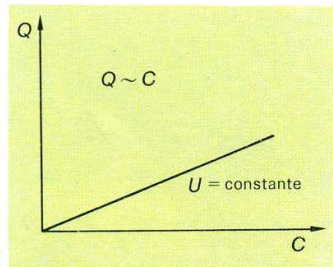
**Carga de un condensador**

$$Q = C \cdot U$$

**Capacidad eléctrica**

$$C = \frac{Q}{U}$$

$$1 \text{ F} = \frac{1 \text{ C}}{1 \text{ V}} \quad [C] = \frac{\text{A s}}{\text{V}}$$



Si trazamos los resultados del experimento 11-4 en una gráfica (fig. 11.25), obtenemos la siguiente proporcionalidad:

$$Q \sim U$$

Esta proporcionalidad directa nos indica que al crecer la tensión crecerá la carga en la misma proporción.

Hasta ahora no hemos tratado la relación existente entre la carga y la capacidad. Sin embargo, podemos obtenerla mediante un sencillo razonamiento. Cuanto mayor sea la capacidad mayor será también la cantidad de carga almacenada. Por tanto, la carga y la capacidad son directamente proporcionales.

$$Q \sim C$$

Uniendo ambas proporcionalidades obtenemos la relación:

$$Q \sim C \cdot U$$

Como las unidades y los valores numéricos de ambos miembros coinciden podemos escribir esta propiedad en forma de ecuación.

Despejando  $C$  obtenemos una fórmula para el cálculo de la capacidad eléctrica.

Sustituyendo las magnitudes  $Q$  y  $U$  por las unidades que ya conocemos obtendremos la ecuación de definición del farad. Un farad es un valor muy grande, excesivo para aplicaciones prácticas, por lo que en la técnica se usan sus submúltiplos (ver contracubierta interior).

Aún no nos hemos ocupado de estudiar la relación existente entre la estructura física de un condensador y su capacidad. Vamos a hacerlo ahora.

El condensador se compone básicamente de dos placas conductoras separadas una determinada distancia. O sea, que la superficie de las placas y la separación entre ellas deberán tener una determinada influencia sobre la capacidad. La influencia del material aislante la estudiaremos en el apartado 11.2.3.

La dependencia entre la capacidad y la superficie puede obtenerse razonando como sigue.

Si aumentamos la superficie de las placas del condensador las cargas también tendrán más sitio a su disposición. Por tanto, la capacidad es proporcional a la superficie (fig. 11.27):

$$C \sim A$$

Fig. 11.26. Carga en función de la capacidad en un condensador.

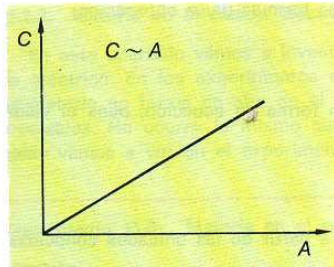


Fig. 11.27. Capacidad en función de la superficie en un condensador.

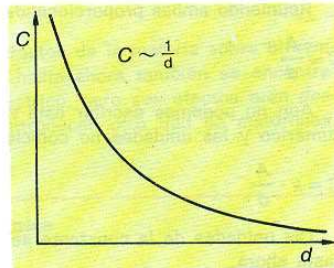
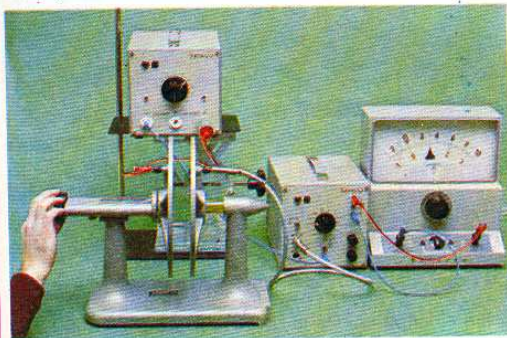


Fig. 11.28. Capacidad en función de la separación entre placas en un condensador.

Para estudiar el efecto de la separación entre placas sobre la capacidad realizaremos el experimento 11-5.

**Experimento 11-5: Capacidad en función de la separación entre placas**

**Montaje**



**Realización**

Modificamos la separación entre placas y observamos el amperímetro.

**Resultado**

Cuando se reduce la separación circulan más cargas hacia las placas. Cuando se aumenta la separación las cargas retornan a la fuente.

El experimento 11-5 nos muestra que la capacidad aumenta al reducir la distancia, pues circulan más cargas hacia las placas. Un aumento de la separación provoca una reducción de la capacidad.

Experimentos más exactos nos indicarían la existencia de una proporcionalidad inversa:

$$C \sim \frac{1}{d} \quad (\text{fig. 11.28}).$$

Reuniendo ambas proporcionalidades en una fórmula única obtenemos:

$$C \sim \frac{A}{d}$$

Aún no podemos escribir esta relación en forma de ecuación, pues el valor numérico y las unidades no coinciden.

$$C = k \cdot \frac{A}{d}$$

Las unidades de la constante se obtienen a partir de las unidades conocidas hasta ahora.

$$k = \frac{C \cdot d}{A} \qquad [k] = \frac{\text{A s} \cdot \text{m}}{\text{m}^2}$$

$$[k] = \frac{\text{A s}}{\text{V m}}$$

**Permitividad del vacío**

$$\epsilon_0 = 8,86 \cdot 10^{-12} \frac{\text{A s}}{\text{V m}}$$

La constante k se denomina **constante dieléctrica o permitividad del vacío**  $\epsilon_0$  cuando entre las placas existe el vacío. Sin embargo, para nuestros fines carece de importancia la diferencia entre el aire y el vacío.

Con ayuda de la permitividad del vacío podemos calcular la capacidad del condensador plano con vacío (o aire) entre las placas.

**Capacidad del condensador plano**

$$C = \frac{\epsilon_0 \cdot A}{d}$$

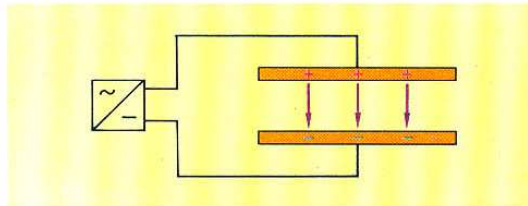


Fig. 11.29. Cargas en las placas en un campo eléctrico sin materia.

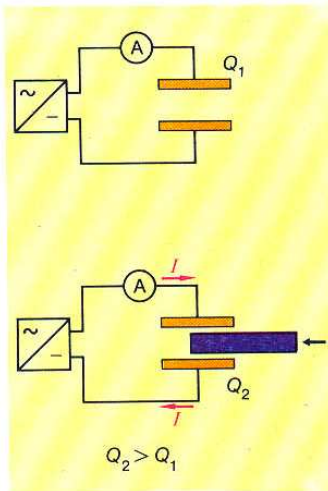


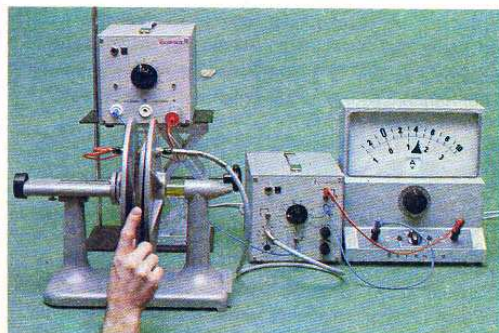
Fig. 11.30. Aumento de las cargas debido a la materia en un campo eléctrico.

**11.2.3. Materia en el campo eléctrico**

En este apartado vamos a investigar los efectos de la materia sobre el campo eléctrico. En los experimentos realizados hasta ahora también se encontraba materia en forma de aire en el campo eléctrico, pero sus efectos eran despreciables. No ocurre lo mismo cuando se introducen otro tipo de materiales, como vamos a ver en el experimento 11-6.

**Experimento 11-6: Materia en el campo eléctrico**

**Montaje**



Un condensador plano está conectado a una fuente de tensión a través de un amperímetro de elevada sensibilidad.

**Realización**

Introduciremos placas de diferentes materiales aislantes (también llamados **dieléctricos**) en el campo y observaremos el amperímetro.

**Resultado**

Al introducir las placas en el campo la aguja del amperímetro se desvía brevemente. La amplitud de la desviación depende del material.

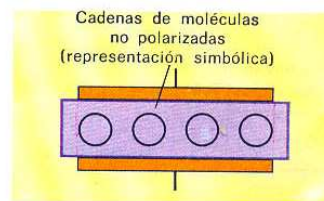
El experimento nos demuestra que hacia las placas del condensador circulan nuevas cargas que se suman a las allí existentes (fig. 11.30). Por tanto, la materia ha dado lugar a nuevos «sitios» en las placas del condensador.

Este fenómeno puede explicarse mediante la estructura molecular o atómica de la materia y las figuras 11.29 a 11.32.

La figura 11.29 muestra la carga existente en el condensador sin materia en el campo eléctrico. En su estado normal la materia es neutra, esto es, las cargas siempre presentes en ella se compensan mutuamente. Desde el exterior el material aparece como neutro (fig. 11.31).

Pero si introducimos el material neutro en un campo eléctrico, las fuerzas del campo atraerán y repelerán a las cargas de los átomos, dando lugar a una polarización (fig. 11.32).

Frente a la placa positiva del condensador aparecerán cargas negativas en el material aislante, que sin embargo quedarán compensadas sobre las placas



**Fig. 11.31.** Moléculas no polarizadas de materia.

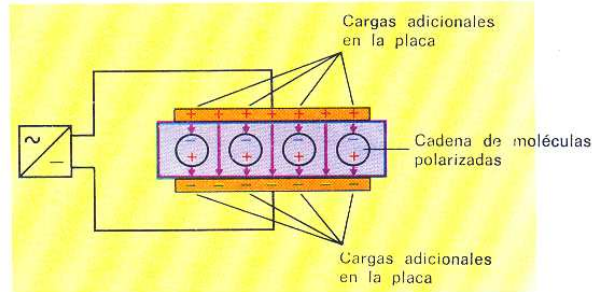


Fig. 11.32. Distribución de cargas debido a la materia polarizada.

por cargas adicionales proporcionadas por la fuente. Por tanto, han aumentado las cargas sobre las placas del condensador y también la capacidad de éste.

La materia en el campo eléctrico aumenta la capacidad de un condensador.

Este aumento de la capacidad debido a la materia existente en el campo debe tenerse en cuenta en la fórmula mediante una nueva constante.

Esta constante se denomina **permitividad relativa**, y nos indica cuál es el efecto del material del dieléctrico sobre la capacidad.

La permitividad relativa nos indica en qué proporción aumenta la capacidad de un condensador respecto al vacío al colocar un determinado dieléctrico entre sus placas.

**Permitividad relativa**  
Símbolo  $\epsilon_r$

**Órdenes de magnitud de las permitividades relativas**

Material	$\epsilon_r$	Material	$\epsilon_r$
Aire	1,0059	Mica	7
Poliestireno	2,5	Pentóxido tántalo	26
Porcelana	5...6	Cerámica	10 a 50000

Las constantes  $\epsilon_r$  y  $\epsilon_0$  suelen reunirse en una sola llamada simplemente **permitividad**.

Con su ayuda podemos calcular la capacidad de un condensador con dieléctrico.

**Permitividad**  
Símbolo  $\epsilon$   
 $\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r$

**Capacidad del condensador plano (con dieléctrico)**

$$C = \frac{\epsilon \cdot A}{d}$$

**Ejercicios sobre 11.2**

1. Razonar por qué es constante el campo eléctrico entre las placas de un condensador.
2. Una carga de  $Q = 60 \cdot 10^{-6}$  A s se ve sometida en un campo eléctrico homogéneo a una fuerza de 1,2 mN. ¿Cuál es la intensidad de dicho campo?
3. Calcular la intensidad del campo eléctrico en un condensador de placas separadas 1,3 mm sometido a una tensión de 220 V.
4. Explicar el concepto de capacidad eléctrica.
5. Explicar por qué se invierte el sentido de la corriente de descarga de un condensador respecto al sentido de la descarga.
6. Si duplicamos la tensión aplicada a un condensador, ¿cómo variará su carga?

7. ¿De qué características físicas y con qué proporcionalidad depende la capacidad de un condensador?
8. Calcular la capacidad de un condensador de los siguientes valores:  
 $A = 0,25 \text{ cm}^2$ ;  $d = 3 \cdot 10^{-6} \text{ mm}$ ; dieléctrico: aire.
9. Si introducimos una placa aislante de plástico entre las placas de un condensador, ¿qué magnitudes variarán si la tensión permanece constante?

### 11.3. Condensadores

#### 11.3.1. Características de los condensadores

Las propiedades de un condensador se indican mediante magnitudes características, entre las cuales destacan la capacidad nominal, la tolerancia, la tensión nominal y la resistencia de pérdidas. Existen aún otra serie de magnitudes características que, sin embargo, escapan al ámbito del presente libro.

#### Capacidad nominal y tolerancia

La capacidad nominal es aquella por la que se caracteriza el condensador a  $20^\circ \text{C}$ . Los valores de capacidades nominales son los de las series IEC (ver 3.5). Existen diversas formas de indicar la capacidad nominal:

- Valor numérico con unidad completa.
- Valor numérico con unidad abreviada.

Ejemplos: 6n8 significa 6,8 nF, 39  $\mu$  significa 39  $\mu\text{F}$ .

- Valor numérico sin unidad.

Se sobreentiende que el valor numérico está indicado en pF o  $\mu\text{F}$ .

- Código de colores.

La tolerancia indica las posibles desviaciones permisibles respecto al valor real de la capacidad.

Ejemplo: capacidad nominal 22 nF, tolerancia  $\pm 10\%$ .

Por tanto, obtenemos un margen de capacidad de 22 nF  $\pm 2,2$  nF, o sea 19,8 nF ... 24,2 nF.

en

#### Tensión nominal

La tensión nominal de un condensador no debe sobrepasarse en ningún caso, pues de sobrepasarla existiría el peligro de perforación del condensador. La tensión nominal es la máxima tensión continua o el valor máximo de una tensión alterna al que puede someterse permanentemente el condensador a una temperatura ambiente de  $40^\circ \text{C}$ .

Este valor también puede indicarse directamente como valor numérico o indirectamente mediante letras minúsculas o signos de colores.

La tolerancia de los condensadores puede indicarse de las siguientes maneras:

- impresa directamente
- símbolos de colores
- letras mayúsculas

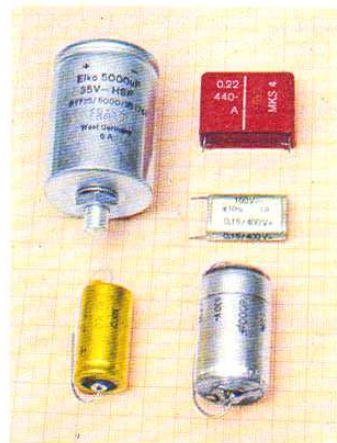
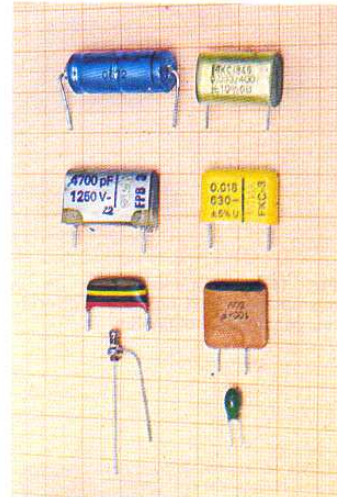


Fig. 11.33. Diferentes tipos de condensadores.

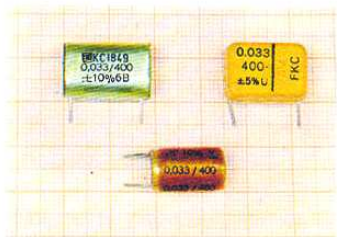


Fig. 11.34. Condensadores de la misma capacidad nominal y diferentes tolerancias.

Unidad Operativa SENATI — Abancay



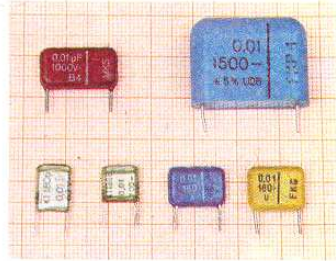


Fig. 11.35. Condensadores de la misma capacidad nominal y diferentes tensiones nominales.

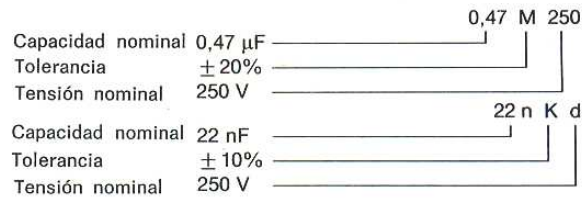
Tabla 11.1: Código para la tensión nominal de condensadores mediante letras minúsculas

Letra minúscula	U en V	Letra minúscula	U en V
a	50 -	g	700 -
b	125 -	h	1000 -
c	160 -	u	250 ~
d	250 -	v	350 ~
e	350 -	w	500 ~
f	500 -		

Tabla 11.2: Código para las tolerancias de condensadores mediante letras mayúsculas

Letra mayúscula	Tolerancia C > 10 pF en %
D	± 5
F	± 1
G	± 2
H	± 2,5
J	± 5
K	± 10
M	± 20
N	± 30
P	+ 100 - 0
Q	+ 30 - 10
R	+ 30 - 20
S	+ 50 - 20
T	+ 50 - 10
Z	+ 100 - 20

Ejemplos de caracterización de condensadores:



**Resistencia de pérdidas**

Los condensadores almacenan cargas, pero no por un tiempo indefinido, pues el dieléctrico no es un aislante ideal.

En realidad el dieléctrico actúa como una resistencia conectada en paralelo, que provoca pérdidas, por lo que se la llama resistencia de pérdidas,  $R_p$ .

Los fabricantes no indican directamente la resistencia de pérdidas, sino el producto de  $R_p$  por  $C$ . Este producto se llama constante de tiempo  $\tau$  y da información sobre la velocidad de la descarga propia del condensador (ver 11.3.3).

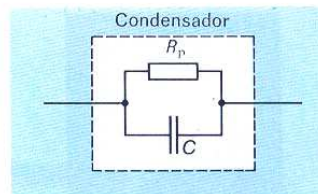


Fig. 11.36. Circuito equivalente de un condensador.

**11.3.2. Tipos de condensadores**

La estructura básica de los condensadores viene ya indicada por su símbolo de conexión. Sin embargo, para aumentar la capacidad las «placas del condensador» se suelen fabricar en forma de láminas metálicas, que pueden enrollarse e introducirse en cubiertas prismáticas o cilíndricas (fig. 11.37).

Según cual sea su estructura los condensadores se clasifican en condensadores fijos (condensadores con capacidad nominal fija) y condensadores variables (con capacidad nominal variable).

Los condensadores fijos se vuelven a clasificar según el tipo de dieléctrico.

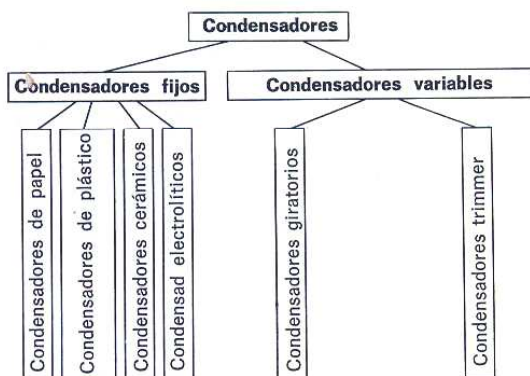


Fig. 11.37. Corte a través de un rollo de condensador con cápsula de plástico.

**Condensadores de papel**

Electrodos	Dieléctrico
<ul style="list-style-type: none"> <li>Lámina de aluminio de 6 a 7 <math>\mu\text{m}</math> de espesor o bien</li> <li>Aluminio vaporizado de 0,02 a 0,05 <math>\mu\text{m}</math> de espesor</li> </ul>	Papel impregnado (por ejemplo, en naftalina o parafina)

Un tipo especial de condensadores de papel son los condensadores de papel metalizado (fig. 11.39). Sobre el dieléctrico (papel) se ha vaporizado una capa metálica extraordinariamente delgada.

Cuando en los condensadores de papel metalizado se produce una perforación, la chispa quemará más la película metálica que el dieléctrico, con lo que

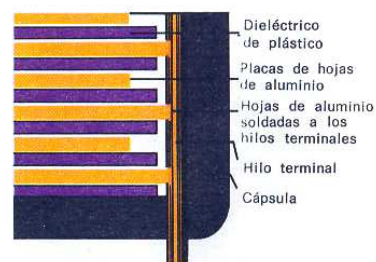


Fig. 11.38. Estructura de los condensadores con hojas de aluminio.



Fig. 11.39. Condensadores de papel metalizado.



Fig. 11.40. Resultado de la autorregeneración en un condensador de papel metalizado.

el punto averiado volverá a quedar aislado. Este fenómeno se denomina autorregeneración (fig. 11.40).

El tiempo de autorregeneración es menor que 10  $\mu$ s.

**Condensadores de plástico**

Los plásticos pueden fabricarse en láminas más delgadas que el papel, gracias a lo cual los condensadores de láminas de plástico son más pequeños que los condensadores de papel.

Electrodos	Dieléctrico	
	Plásticos	Letra característica
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hoja de aluminio</li> <li>Letra característica K o bien</li> <li>• Aluminio vaporizado</li> <li>Letras características MK (autorregenerativos)</li> </ul>	Policarbonato Polipropileno Poliestireno Politereftalato Acetato de celulosa	C P S T U

Ejemplos:

Característica KS.  
 Condensador de plástico con dieléctrico de poliestireno y electrodos de hojas metálicas.

Característica MKC:  
 Condensador de plástico con dieléctrico de policarbonato y electrodos de hojas metalizadas.

**Condensadores cerámicos**

Electrodos	Dieléctrico
Hojas metálicas, hojas metalizadas	Masa cerámica (cerámica de óxido de aluminio) <ul style="list-style-type: none"> <li>• Condensadores NDK (de pequeña permitividad, <math>\epsilon_r</math>: 13 ... 470)</li> <li>• Condensadores HDK (de gran permitividad, <math>\epsilon_r</math>: &gt; 470 ... 50 000)</li> </ul>

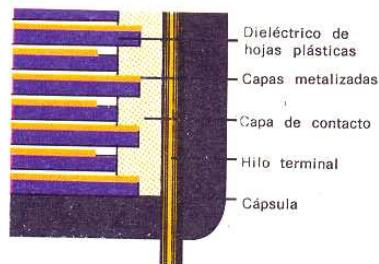


Fig. 11.41. Estructura de los condensadores de plástico y aluminio vaporizado.

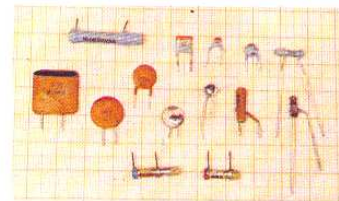


Fig. 11.42. Condensadores cerámicos.

Estos condensadores pueden fabricarse con dimensiones muy pequeñas gracias a las grandes permitividades. Sus formas son diversas, por ejemplo discos, tubos, perlas, etc. (fig. 11.42).

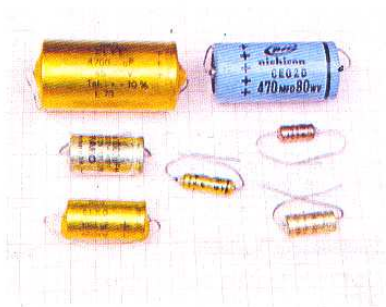
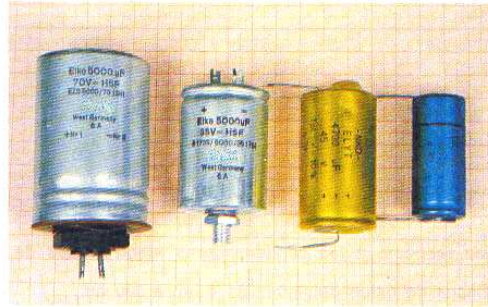


Fig. 11.43. Condensadores electrolíticos de aluminio.

**Condensadores electrolíticos de aluminio**

Estos condensadores se diferencian considerablemente de los hasta ahora descritos. Uno de los electrodos es de aluminio, mientras el otro es un electrolito en contacto con una hoja de aluminio que sirve de contacto exterior.

Durante la fabricación aparece entre los electrodos una capa de óxido; este fenómeno se llama formación. La capa de óxido es muy fina (aproximadamente 1,2 nm por volt) y sólo se forma cuando se conecta el electrodo de aluminio al terminal positivo de la fuente de tensión (fig. 11.44).

Si durante el funcionamiento se aplica una polaridad inversa esta capa se descompone paulatinamente quedando inutilizable el condensador.

Los condensadores electrolíticos deben conectarse con la polaridad adecuada.

**Condensador electrolítico polarizado**

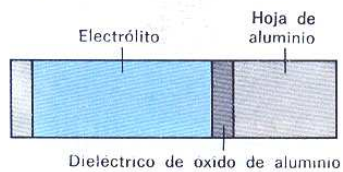


Fig. 11.44. Sección a través de un condensador electrolítico de aluminio.

Electrodo 1 (ánodo)	Dieléctrico	Electrodo 2 (cátodo)
<b>Polo positivo:</b> Lámina de aluminio	Óxido de aluminio (oxidación anódica), obtenido electrolíticamente	<b>Polo negativo:</b> electrolito (papel impregnado)

Durante el funcionamiento circula por el condensador electrolítico una corriente de poca intensidad, que es necesaria para mantener la capa de óxido del dieléctrico (corriente residual).

La capacidad no sólo depende de la separación entre los electrodos, sino también del tamaño de la superficie (ver 11.2.2.). Por ello suelen fabricarse los condensadores electrolíticos con superficies rugosas, con lo que aumenta la superficie eficaz (fig. 11.45).

**Condensadores electrolíticos de tántalo**

Los condensadores electrolíticos de tántalo son condensadores electrolíticos cuyos ánodos son de tántalo.

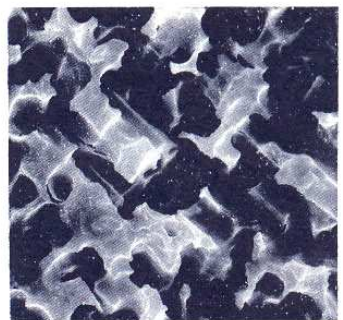


Fig. 11.45. Hoja rugosa de aluminio, ampliada 2500 veces.

Unidad Operativa SENATI - Abancay

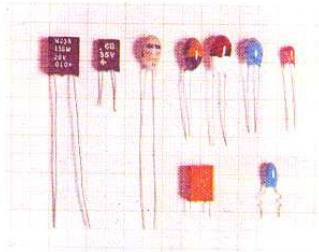


Fig. 11.46. Condensadores electrolíticos de tántalo.

Los condensadores de tántalo son muy pequeños y presentan mejores características que los de aluminio gracias a las buenas propiedades de la capa de óxido.

Electrodo 1 (ánodo)	Dieléctrico	Electrodo 2 (cátodo)
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Polvo de tántalo sinterizado</li> <li>O bien</li> <li>• Lámina de tántalo: <b>polo positivo</b></li> </ul>	Capa de óxido de tántalo (oxidación anódica), obtenido electroquímicamente	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Oxido metálico sólido semiconductor (p. ej., dióxido de manganeso)</li> <li>• Electrólito líquido (ácido): <b>polo negativo</b></li> </ul>

**Condensador variable**



**Condensador ajustable (trimmer)**

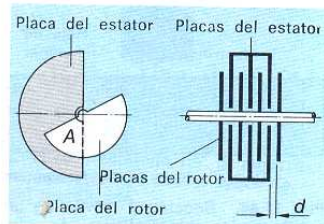
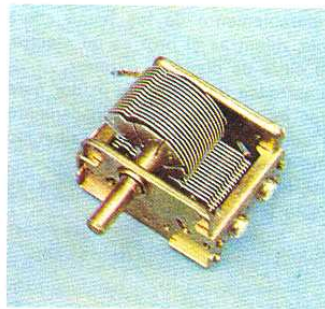


Fig. 11.47. Condensador giratorio.

**Ventajas respecto a los condensadores electrolíticos de aluminio**

- Capas de óxido delgadas, de 4 nm a 500 nm.
- Mayor permitividad,  $\epsilon_r \approx 30$ .
- Mediante la rugosidad la capacidad aumenta unas 40 veces.
- Menores corrientes residuales.



Los condensadores electrolíticos de tántalo se rotulan con códigos de colores. La capacidad indicada se expresa en  $\mu\text{F}$ .

**Condensadores variables**

Estos condensadores suelen tener aire como dieléctrico. En los aparatos de radio, por ejemplo, encontramos un condensador giratorio de este tipo, que sirve para conseguir una sintonía exacta con la emisora que se quiere captar. Un juego giratorio de placas de aluminio (rotor) puede entrar y salir en otro juego fijo de placas (estator). Los valores de los condensadores giratorios se encuentran en la gama entre 15 pF y 550 pF.

Además de los condensadores giratorios existen otros tipos de condensadores variables. La figura 11.48 nos muestra algunos tipos de condensadores ajustables o trimmer. La capacidad se varía moviendo unas placas respecto a otras.



Fig. 11.48. Condensadores trimmer.

**11.3.3. Curvas de tensión e intensidad en un condensador**

En el apartado 11.2.2 quedó claro que la carga y descarga de un condensador se realiza en un determinado intervalo de tiempo, durante el cual varían las dos magnitudes tensión e intensidad.

Las magnitudes que dependen del tiempo pueden visualizarse mediante un osciloscopio.

La fuente de tensión que emplearemos será un generador de onda cuadrada. Este generador no hace más que conectar y desconectar permanentemente la

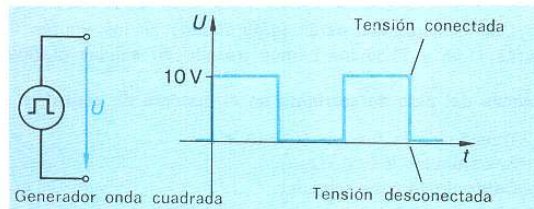


Fig. 11.49. Curva de tensión de un generador de onda cuadrada.

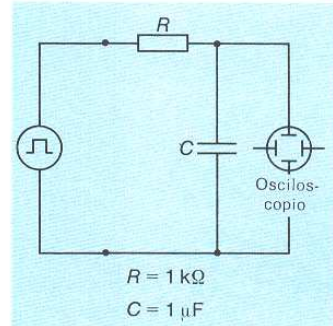


Fig. 11.50. Circuito para medir la tensión durante la carga y descarga de un condensador mediante un osciloscopio.

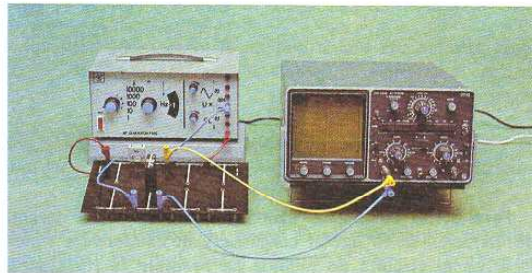


Fig. 11.51. Montaje experimental para medir la tensión durante la carga y descarga de un condensador mediante un osciloscopio.

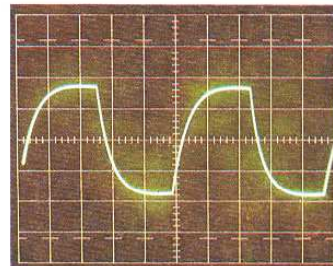


Fig. 11.52. Oscilograma de la tensión durante la carga y descarga de un condensador.

tensión (fig. 11.49), con lo que obtendremos procesos periódicos sin necesidad de accionar interruptores mecánicos.

La figura 11.51 nos muestra el montaje necesario para medir la tensión.

Como el osciloscopio sólo permite representar tensiones, las corrientes se

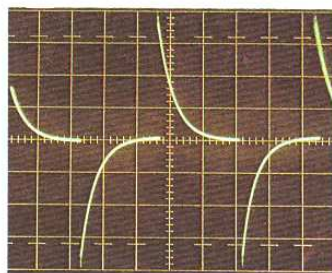


Fig. 11.53. Oscilograma de la intensidad durante la carga y descarga de un condensador.

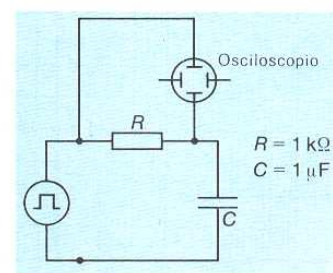


Fig. 11.54. Circuito para medir la intensidad durante la carga y descarga mediante un osciloscopio.

medirán a través de la caída de tensión en la resistencia  $R$  (medida indirecta, figura 11.50). La intensidad de la corriente se calcula entonces con la fórmula

$$I = \frac{U}{R}$$

Los oscilogramas están fotografiados en las figuras 11.52 y 11.53; en las figuras 11.55 y 11.56 los hemos trazado en sendas gráficas.

#### Cálculo del pico de corriente en el instante de conexión

Tensión de la fuente:  $U = 10 \text{ V}$ .

Resistencia:  $R = 1 \text{ k}\Omega$ .

Caída de tensión medida:

$$U = 10 \text{ V}$$

$$I_{\max} = \frac{U}{R}$$

$$I_{\max} = \frac{10 \text{ V}}{1 \text{ k}\Omega} \quad I_{\max} = 10 \text{ mA}$$

Este valor nos indica que en el instante de conexión el condensador presenta una resistencia despreciable. La intensidad de la corriente viene limitada únicamente por la resistencia  $R$ .

En los instantes de conexión y desconexión los condensadores se comportan como cortocircuitos. Su resistencia es aproximadamente cero.

Para evitar corrientes excesivamente intensas durante la carga y descarga, los condensadores deben cargarse y descargarse a través de resistencias.

Si en el circuito de medida se redujera la resistencia, por ejemplo al valor de  $10 \Omega$  circularía ya una corriente de  $1 \text{ A}$ , que sería suficiente para fundir los hilos de conexión en el interior del condensador.

En las figuras 11.55 y 11.56 podemos reconocer las curvas de tensión y de

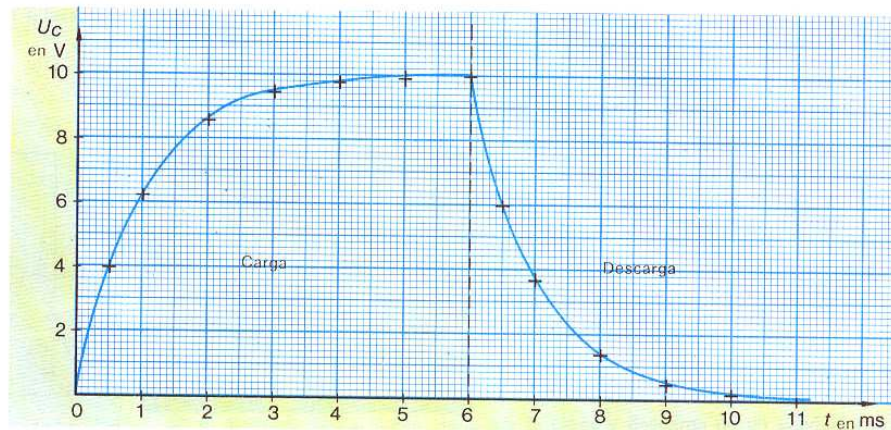


Fig. 11.55. Curva de tensión en un condensador.

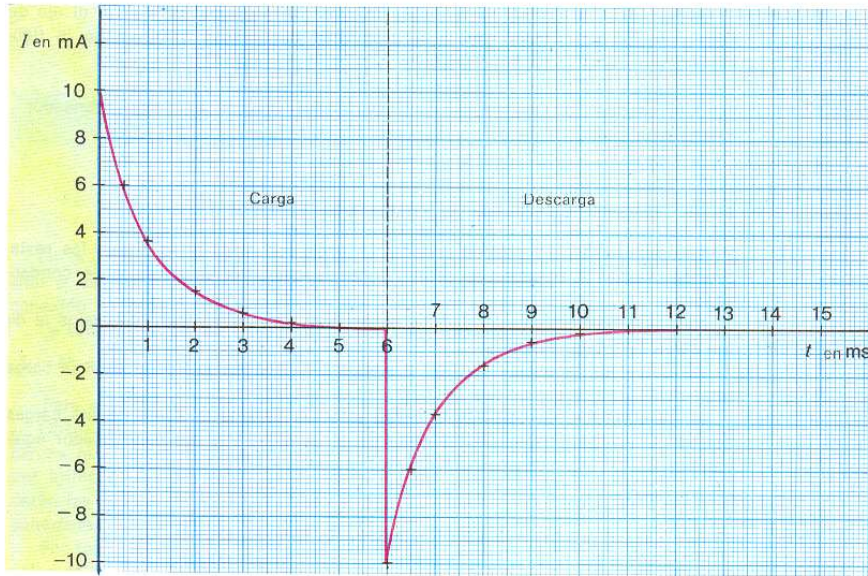


Fig. 11.56. Curva de intensidad en un condensador.

intensidad en función del tiempo. Durante la carga la tensión crece primero rápidamente y después con mayor lentitud, hasta alcanzar el valor de la tensión de la fuente. Durante la descarga la tensión decrece primero rápidamente y se aproxima después paulatinamente al valor cero.

La intensidad de la corriente es máxima en el instante de conexión, decreciendo a continuación y aproximándose al valor cero cuando la tensión es máxima (condensador totalmente cargado). Al descargar se invierte el sentido de la corriente, pues los electrones vuelven a circular abandonando las placas. El valor absoluto del pico de corriente de conexión es igual al del pico de desconexión.

El tiempo necesario para la carga o descarga del condensador depende de su capacidad y del valor de la resistencia. Cuanto mayor sea la capacidad, tanto más se prolongará el proceso de carga. Lo mismo ocurre con la resistencia: si es grande, la oposición al movimiento de las cargas será mayor y el proceso de carga durará más.

El producto de estas dos magnitudes es la constante de tiempo  $\tau$ , que contiene información sobre el tiempo que duran los procesos de carga y descarga.

Transcurrido un tiempo  $t = 1 \tau$  el condensador se habrá cargado a un 63 % de su tensión final (fig. 11.57). Durante la descarga después de  $t = 1 \tau$  la tensión se habrá reducido a un 37 % de la tensión aplicada.

**Cálculo de la constante de tiempo**

$$\tau = R \cdot C; \quad R = 1 \text{ k}\Omega; \quad C = 1 \text{ }\mu\text{F}$$

$$\tau = 1 \text{ k}\Omega \cdot 1 \text{ }\mu\text{F}$$

$$\tau = 10^3 \frac{\text{V}}{\text{A}} \cdot 10^{-6} \frac{\text{A s}}{\text{V}} \quad \tau = 1 \text{ ms}$$

Constante de tiempo  $\tau = R \cdot C$

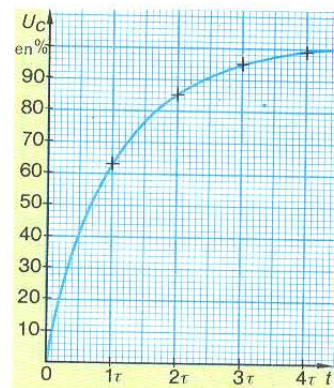


Fig. 11.57. Curva de la tensión en un condensador en tanto por ciento en función de los valores de  $\tau$ .



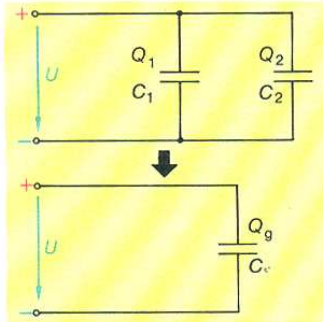
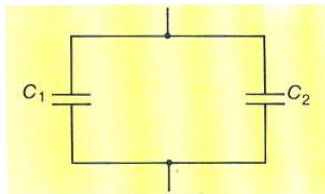


Fig. 11.58. Conexión en paralelo de condensadores.

**Conexión en paralelo de dos condensadores**

$$C_e = C_1 + C_2$$



**Conexión en paralelo de condensadores**

$$C_e = C_1 + C_2 + \dots + C_n$$

Tomando en el eje de tiempos los valores en múltiplos de  $\tau$  y en el eje de tensiones los porcentajes de la tensión final obtenemos la curva de la figura 11.57.

Al cabo de un tiempo  $t = 5 \tau$  puede considerarse que el condensador está totalmente cargado.

**11.3.4. Conexión en paralelo de condensadores**

Los condensadores pueden conectarse unos con otros al igual que las resistencias. Vamos a estudiar en primer lugar la conexión en paralelo de condensadores.

Vamos a buscar la capacidad de un condensador cuyo efecto equivalga al de los otros dos (fig. 11.58).

Si aplicamos la misma tensión a ambos circuitos de la figura 11.58 la carga total deberá ser igual en los dos.

En la conexión en paralelo la carga total es igual a la suma de las cargas de los diferentes condensadores. Esta carga es igual a la del condensador equivalente  $C_e$ .

$$Q_1 + Q_2 = Q_9$$

Las cargas pueden calcularse mediante la fórmula  $Q = C \cdot U$ .

$$Q_1 = C_1 \cdot U; \quad Q_2 = C_2 \cdot U; \quad Q_9 = C_e \cdot U$$

Sustituyendo estas expresiones en la ecuación de la carga obtenemos:

$$C_1 \cdot U + C_2 \cdot U = C_e \cdot U$$

En todos los términos de esta ecuación aparece la magnitud  $U$ , que podemos por tanto simplificar.

En la conexión en paralelo de condensadores la capacidad equivalente es igual a la suma de las diversas capacidades.

Esta deducción puede aclararse con un pequeño razonamiento. En la conexión en paralelo aumenta la superficie del condensador, con lo que también aumentará la cantidad de carga que puede soportar. Por tanto, la capacidad será mayor (fig. 11.59).

**11.3.5. Conexión en serie de condensadores**

Con la conexión en serie vamos a proceder como con la conexión en paralelo. Debemos sustituir dos condensadores en serie por otro equivalente sin que varíen sus efectos (fig. 11.60).

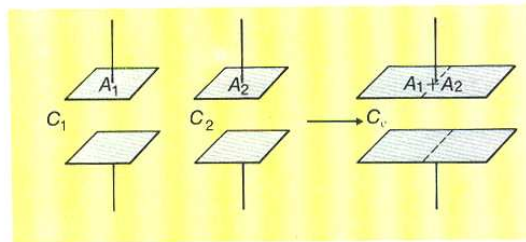


Fig. 11.59. Aumento de la superficie en la conexión en paralelo de condensadores.

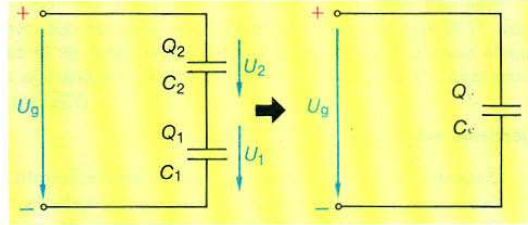


Fig. 11.60. Conexión en paralelo de condensadores.

En la conexión en paralelo podemos reconocer inmediatamente que la tensión  $U$  es una magnitud común a todos los condensadores. ¿Qué ocurre en la conexión en serie?

La tensión se divide en dos tensiones menores (fig. 11.60).

$$U_g = U_1 + U_2$$

Para explicar la distribución de la carga vamos a proceder por partes.

Observemos primero el polo negativo de la fuente de tensión. De él salen cargas que van a la placa  $P_{11}$  (fig. 11.61). La carga positiva sobre  $P_{12}$  aparece por influencia, y por tanto en la placa  $P_{21}$  del segundo condensador sólo quedarán las cargas negativas. En todo el circuito siempre se desplazan las mismas cantidades de carga.

Por tanto la carga de cada condensador es la misma, independientemente del valor de la capacidad, con lo que obtenemos la siguiente igualdad, de gran importancia:

$$Q_1 = Q_2 = Q_g = Q$$

En la conexión en serie la carga es, pues, la magnitud común. Sustituyendo en la fórmula de las tensiones la expresión  $U = \frac{Q}{C}$  obtenemos:

$$U_g = U_1 + U_2$$

$$\frac{Q}{C_e} = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2}$$

La carga  $Q$  está presente en todos los términos de la ecuación, con lo que la podremos simplificar obteniendo:

$$\frac{1}{C_e} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$$

Esta ecuación se puede transformar igual que en la conexión en paralelo de resistencias (ver 4.2).

La fórmula de la capacidad total o equivalente  $C_e$  nos indica que ésta es siempre menor que la menor de las diversas capacidades.

**Ejemplo:**

$$C_1 = 10 \text{ nF}; \quad C_2 = 22 \text{ nF}$$

$$C_e = \frac{220 \text{ nF}}{30}$$

$$C_e = \frac{10 \text{ nF} \cdot 22 \text{ nF}}{10 \text{ nF} + 22 \text{ nF}}$$

$$C_e = 6,9 \text{ nF}$$

En la conexión en serie la capacidad equivalente es siempre menor que la menor de las capacidades.

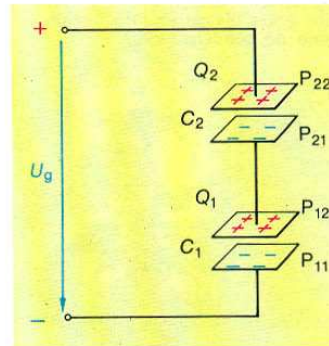
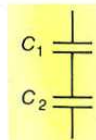


Fig. 11.61. Distribución de las cargas en una conexión en serie de condensadores.

**Conexión en serie de dos condensadores**

$$\frac{1}{C_e} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$$



$$C_e = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}$$

**Conexión en serie de condensadores**

$$\frac{1}{C_e} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}$$

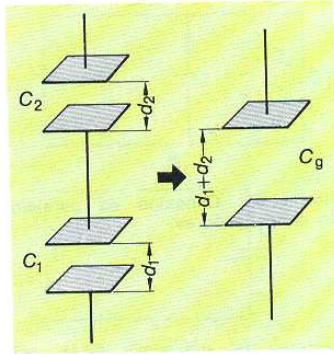


Fig. 11.62. Aumento de la separación entre placas en la conexión en serie de condensadores.

Podemos explicar este resultado mediante un pequeño razonamiento. La figura 11.62 nos muestra la conexión en serie de dos condensadores, en la que queda claro que la separación entre placas total de la capacidad equivalente ha aumentado. Y un aumento de la separación implica una capacidad menor.

### Ejercicios sobre 11.3

1. Describir la estructura de un condensador electrolítico.
2. Explicar la autorregeneración de los condensadores de papel metalizado.
3. Explicar por qué debe vigilarse la polaridad de los condensadores electrolíticos cuando se montan en un circuito.
4. Describir los procesos de carga y descarga de un condensador con ayuda del movimiento de los electrones.
5. Trazar en una gráfica las curvas de tensión y de intensidad durante la carga y descarga de un condensador.
6. Calcular la intensidad de la corriente de conexión cuando se conecta un condensador de  $20 \mu\text{F}$  a una tensión continua de  $110 \text{ V}$  a través de una resistencia de  $10 \Omega$ .
7. De las curvas de la figura 11.57, página 149, obtener los porcentajes de tensión en los instantes  $0,5 \tau$ ,  $1 \tau$ ,  $2 \tau$ ,  $3 \tau$  y  $4 \tau$ .
8. Calcular los valores de la tensión en porcentaje del valor máximo durante la descarga para los instantes  $0,5 \tau$ ,  $1 \tau$ ,  $2 \tau$ ,  $3 \tau$ ,  $4 \tau$  y  $5 \tau$ .
9. Calcular la carga del condensador de la figura 11.55, pág. 148, para los instantes  $t = 2 \text{ ms}$  y  $t = 6 \text{ ms}$ .
10. Se conectan en serie tres condensadores de  $22 \text{ nF}$ ,  $10 \text{ nF}$  y  $4,7 \text{ nF}$ . Calcular la capacidad equivalente.

## 12. Campo magnético

### 12.1. Fenómenos, magnitudes y unidades del magnetismo

El magnetismo es de gran importancia en muchos de los campos de la electrotecnia, por ejemplo en los motores, generadores, relés, etc.

Muchas viviendas disponen junto a la puerta de un timbre de corriente continua (fig. 12.1). Si se presiona el pulsador el timbre empieza a sonar. El martillete se balancea de un lado a otro y golpea sobre la campanilla.

¿Cómo se origina este movimiento oscilante del martillete?

En la figura 12.2 vemos que el timbre de corriente continua se compone de una bobina con núcleo de hierro, un martillete y de una campanilla. La corriente da lugar a un campo magnético en la bobina. Este campo magnético atrae al martillete.

Para poder comprender cómo funciona el timbre de corriente continua (y también otros aparatos electromagnéticos como los altavoces y los relés) debemos en primer lugar ocuparnos más detenidamente del magnetismo.

El nombre de **magnetismo** proviene de la ciudad de Magnesia, en Asia Menor (actualmente Manisa, en Turquía). Se cuenta que allí se encontraba un mineral que contenía hierro, mineral cuyos trozos se pegaban unos a otros.

#### 12.1.1. Imanes

En gran cantidad de aparatos y máquinas se emplean **imanes permanentes** o **electroimanes**.

Cuando acercamos un imán a objetos metálicos, todos los que contengan hierro serán atraídos y quedarán adheridos al imán. De esta manera podemos

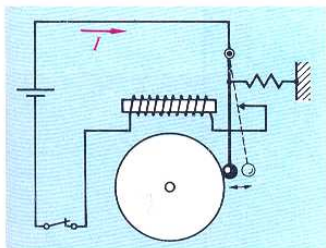


Fig. 12.2. Esquema de la estructura y funcionamiento de un timbre de corriente continua.

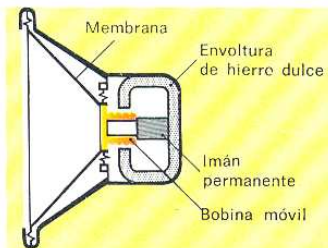


Fig. 12.3. Esquema de la sección de un altavoz electrodinámico.

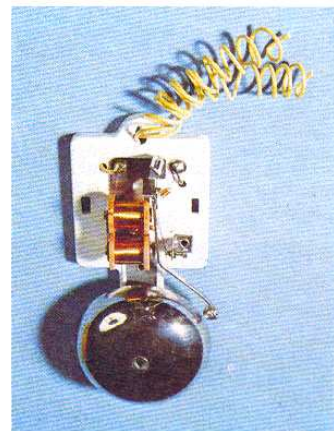


Fig. 12.1. Timbre de corriente continua.

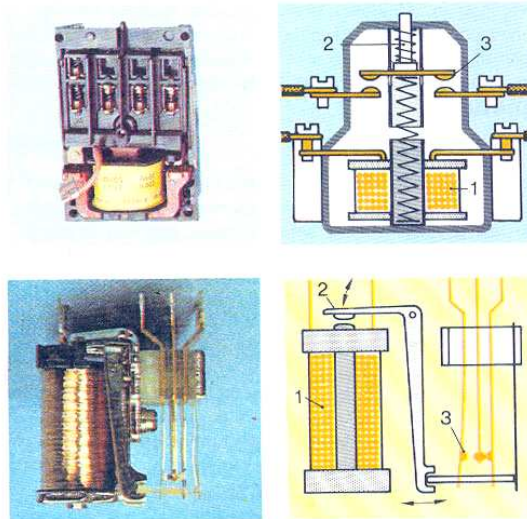


Fig. 12.4. a 12.7. Los relés contactores son interruptores electromagnéticos con un circuito de mando. Se utilizan para conectar grandes potencias. Funcionamiento básico: la corriente del circuito de mando circula a través de la bobina (1) y genera un campo magnético. Este atrae la armadura (2) que acciona los resortes de contacto (3).

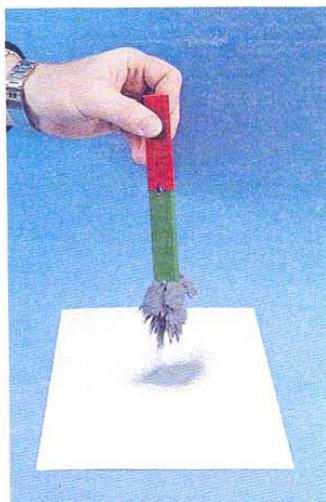


Fig. 12.8. Imán y limaduras de hierro.

Imán permanente



Devanado, bobina, electroimán



observar que un imán atrae además a todos los materiales que contengan níquel y cobalto. Estos materiales se denominan **materiales ferromagnéticos**.

Un imán es un cuerpo que atrae hierro, níquel y cobalto.

Los imanes permanentes son imanes que conservan siempre sus propiedades magnéticas.

Los electroimanes son bobinas por las que circula una corriente. El efecto magnético se presenta siempre que circula una corriente por la bobina.

Si introducimos un imán en un montón de limaduras de hierro y lo volvemos a sacar observaremos que en los extremos del imán quedan adheridas muchas limaduras. Estos extremos se denominan polos del imán (fig. 12.8).

Si colocamos un imán de modo que pueda girar (por ejemplo, una aguja magnética en una brújula o una barra magnética colgada de un hilo), el imán se orientará en dirección norte-sur. Si desviamos el imán de esta posición, al soltarlo volverá a orientarse por sí solo en esta dirección.

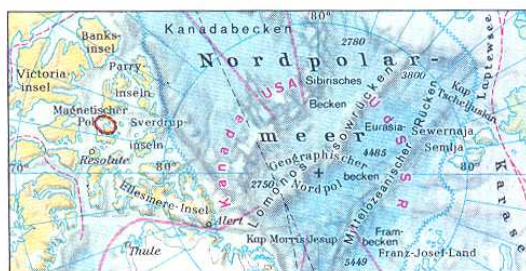


Fig. 12.9. Polos geográfico y magnético.

Por tanto, existe una fuerza que actúa sobre el imán y le hace girar hasta una determinada dirección. El origen de esta fuerza es el **magnetismo terrestre**. La tierra actúa como un enorme imán.

Como uno de los polos indica siempre el norte, y el otro el sur, a los polos de los imanes se les denomina análogamente.

El polo que indica el norte se denomina polo norte del imán, y el polo que indica el sur, polo sur.

Los imanes que utilizamos en los siguientes experimentos están caracterizados con colores: el polo norte es rojo y el polo sur, verde.

Si aproximamos a un imán, colgado de modo que pueda girar, un segundo imán, observaremos que los imanes se repelen o atraen según se acerquen los dos polos norte (o los dos polos sur) o un polo norte y un polo sur, respectivamente (fig. 12.10).

Polos de distinto nombre se atraen. Polos del mismo nombre se repelen.

Podemos observar que la fuerza empieza a actuar aunque los imanes no estén en contacto. Por tanto, el efecto magnético se propaga al espacio que rodea al imán.

El espacio en el que aparecen fuerzas debidas a imanes se denomina campo magnético.

### 12.1.2. Espectros magnéticos

Una aguja magnética, situada en un punto cualquiera de un campo magnético, se orientará en una dirección determinada. Ésta será la dirección en la que actúe el campo magnético (fig. 12.11). Como no podemos ver el campo magnético

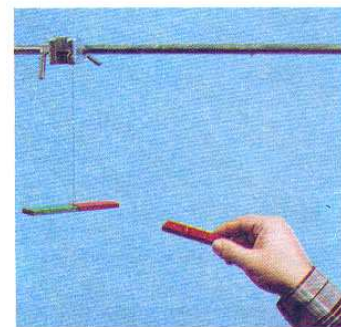
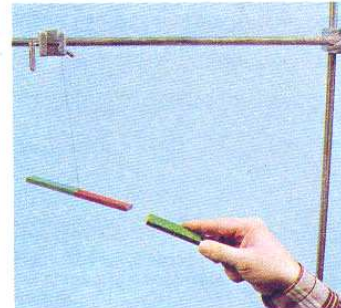


Fig. 12.10. Atracción y repulsión de dos imanes.

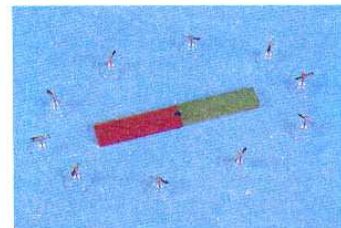
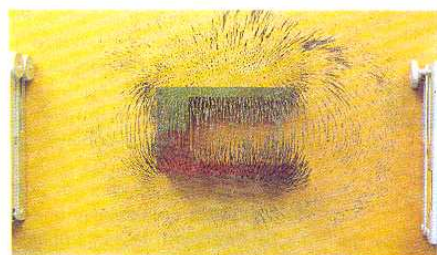
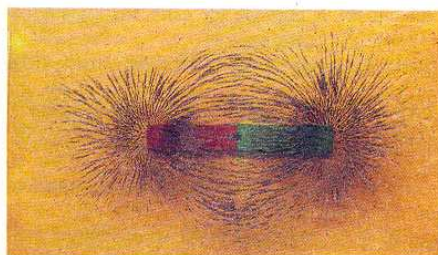


Fig. 12.11. Aguja imanada en la zona de influencia de un imán.

Fig. 12.12. Distribuciones de las limaduras de hierro en una placa de vidrio colocada sobre un imán recto (izquierda) y un imán de herradura (derecha).



tico, y por tanto tampoco la dirección en que actúa la fuerza, se ha desarrollado una representación idealizada o modelo como en otros muchos campos de la electrotecnia.

Para ello realizaremos un pequeño experimento:

Encima de un imán colocaremos una placa de cristal sobre la que esparciremos uniformemente limaduras de hierro. Podemos observar claramente que las limaduras se orientan de una manera determinada (fig. 12.12).

Las líneas según las que se orientan las limaduras de hierro se llaman líneas de campo magnético.

Las líneas de campo discurren de un polo al otro y nos proporcionan una imagen clara del campo magnético. En la figura 12.13 hemos representado sólo algunas de las líneas de campo, aunque el campo magnético actúa en todo el espacio que rodea al imán. Las líneas de campo no acaban en los polos sino que también atraviesan el imán.

Las líneas de campo magnético son cerradas.

Ha demostrado ser de utilidad el caracterizar el sentido de las líneas de campo. Se ha definido como sigue:

Las líneas de campo magnético discurren en el exterior del imán del polo norte al polo sur y en el interior, del polo sur al polo norte.

El diagrama de líneas de campo o espectro magnético de un electroimán es similar al de una barra magnética. Las líneas de campo salen de una de las caras frontales de la bobina y entran por la otra. En el interior de la bobina también discurren del polo sur al polo norte.

#### ¿Cómo aparece el campo magnético de una bobina?

Una bobina se compone de un conductor enrollado formando espiras alrededor de un cilindro central. Por tanto, es conveniente calcular en primer lugar el campo magnético de un conductor recto, después el campo magnético de una sola espira y finalmente el de toda la bobina.

#### Campo magnético de un conductor recto

Hagamos circular una corriente continua de suficiente intensidad por un hilo conductor y coloquemos una aguja imanada en su proximidad. Observaremos que la aguja imanada, que primero estaba orientada en dirección norte-sur, se orienta en otra dirección. Esto significa que en los alrededores del conductor existe un campo magnético. Podemos volver a obtener un espectro magnético mediante limaduras de hierro (fig. 12.14).

Invirtamos el sentido de la corriente. La aguja imanada también girará 180°.

El sentido de las líneas de campo magnético de un conductor recorrido por una corriente depende del sentido de la corriente.

El experimento también nos muestra la relación existente entre la dirección de las líneas de campo y la dirección de la corriente.

La dirección de las líneas de campo y la de la corriente son siempre perpendiculares.

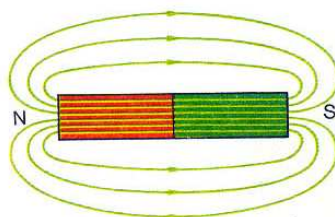


Fig. 12.13. Espectro magnético de un imán.

**Regla nemotécnica:**

Un tornillo de paso a la derecha que avance en el sentido de la corriente girará en el sentido de las líneas de campo.

Para poder representar el campo magnético en un plano debemos dibujar una sección del conductor. En esta sección indicaremos el sentido de la corriente tal como se muestra en la figura 12.16.

**Campo magnético de una espira conductora**

Doblemos el conductor recto hasta formar una espira, hagamos circular por ella una corriente continua y coloquemos cerca de ella una aguja imanada. Observaremos que la espira representa un polo norte y un polo sur (fig. 12.17).

**Campo magnético de una bobina**

Podemos explicar la formación del campo magnético de una bobina recorrida por una corriente de la siguiente manera:

Alrededor de todo el conductor aparece un campo magnético concéntrico. Los campos magnéticos de dos secciones colindantes del conductor se anularán en parte, pues tienen sentidos opuestos. Se formará un campo resultante en el que las líneas de campo saldrán por una de las caras frontales de la bobina y entrarán por la otra (fig. 12.19).

La bobina de nuestro timbre de corriente continua es, pues, un electroimán que atrae el martillete cuando circula la corriente. La atracción y la repulsión

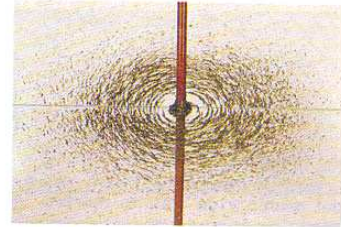


Fig. 12.14. Campo magnético de un conductor recorrido por una corriente.

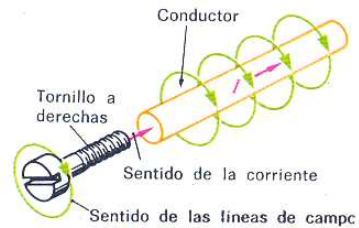


Fig. 12.15. Sentidos de la corriente y del campo magnético.

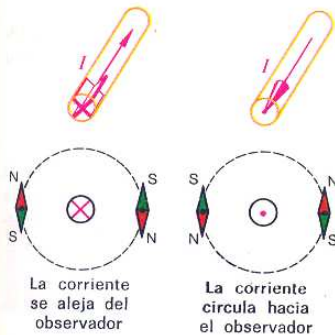


Fig. 12.16. Caracterización del sentido de la corriente.

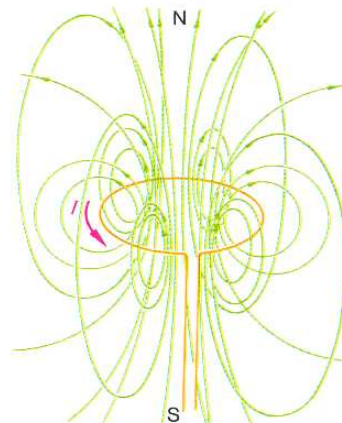
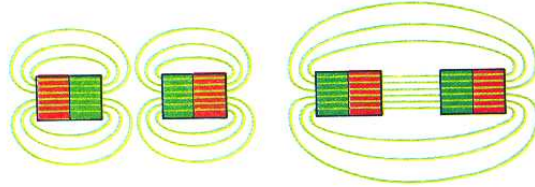


Fig. 12.17. Espectro magnético de una espira conductora.

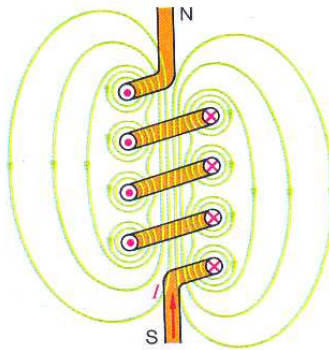
de los imanes se puede explicar con ayuda del modelo de las líneas de campo (ver fig. 12.18).

Las líneas de campo tienden a ser lo más cortas posibles.  
Las líneas de campo colindantes tienden a separarse.

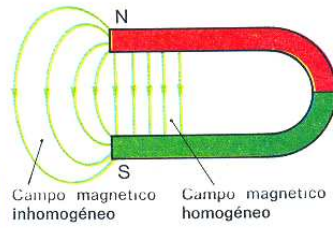




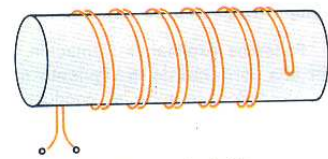
**Fig. 12.18.** Espectros magnéticos entre polos del mismo y de distinto nombre.



**Fig. 12.19.** Espectro magnético de una bobina.



**Fig. 12.20.** Campo homogéneo e inhomogéneo.



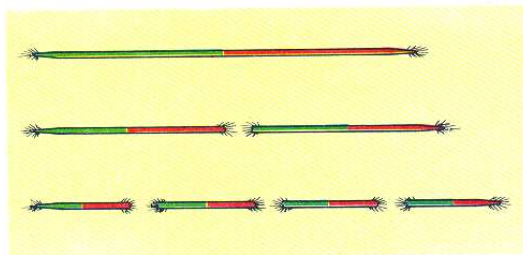
**Fig. 12.21.** Bobinado bifilar.

En los espectros magnéticos que hemos visto hasta ahora la separación entre las diferentes líneas crece al aumentar la distancia al imán o bobina, pues las líneas colindantes tienden a separarse. Por tanto, la densidad de las líneas de campo disminuye. Los campos magnéticos en los que la densidad de líneas de campo varía según los diferentes puntos se llaman **campos inhomogéneos**. Los campos, en los que la densidad de líneas de campo es constante, **campos homogéneos** (fig. 12.20).

Para evitar el efecto magnético de una bobina se devanarán bobinados **bifilares** (fig. 12.21), con los que se obtendrán dos campos magnéticos iguales pero de sentidos opuestos, que se anularán.

**12.1.3. Imanes elementales**

Si al timbre de corriente continua le quitamos el núcleo de hierro de la bobina, el mecanismo dejará de funcionar. El martillete ya no se mueve, pues la fuerza ahora existente no es suficiente. ¿Cómo podemos explicar este fenómeno?



**Fig. 12.22.** División de una aguja imanada.

Debemos investigar los fenómenos que ocurren en el interior de este núcleo, para lo cual nos ayudarán los razonamientos siguientes.

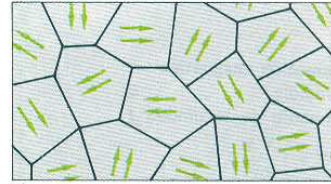
Una aguja imanada (por ejemplo con ayuda de un imán permanente) es un imán recto. Si partimos esta aguja en dos obtendremos dos imanes rectos, cada uno con un polo norte y un polo sur. Si volvemos a partir los dos imanes obtendremos cuatro, etc. Podemos imaginar que si continuáramos esta división obtendríamos las unidades magnéticas más pequeñas posibles, los llamados **imanes elementales**.

Los imanes elementales no son imanes rectos en miniatura sino unas determinadas zonas que presentan un efecto magnético. Estas zonas se denominan **dominios de Weiß**<sup>1</sup> en honor del físico que los descubrió.

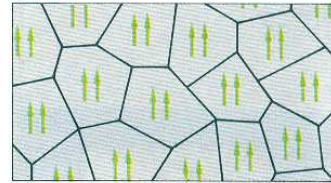
La causa del magnetismo elemental es el movimiento de los portadores de carga de la estructura atómica:

Los electrones describen órbitas alrededor del núcleo atómico. Además efectúan un movimiento de rotación alrededor de su propio eje. Ambos movimientos dan lugar a un campo magnético que se manifestará en el exterior siempre que no se anulen los diferentes campos mutuamente.

En un imán los imanes elementales están ordenados; no ocurre lo mismo en un trozo de hierro no imanado. Sin embargo, si el trozo de hierro no imanado se introduce en la zona de influencia de un campo magnético los imanes elementales se orientarán. El trozo de hierro se convertirá en otro imán y reforzará así el efecto magnético total.



a)



b)

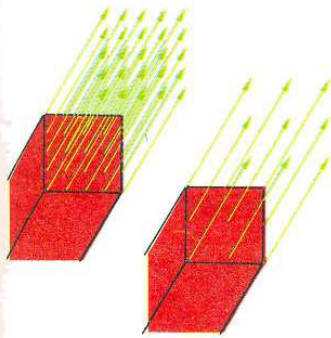
**Fig. 12.23.** Orientación de los imanes elementales en (a) hierro no imanado y (b) imanado.

#### 12.1.4. Inducción magnética

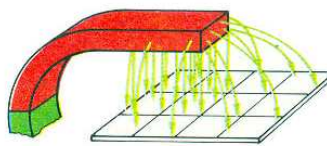
De todos es conocido que hay imanes más «potentes» que otros.

En los experimentos con limaduras de hierro hemos visto que la mayoría de ellas quedan retenidas en los polos. A partir de una determinada distancia del imán las limaduras ya no se orientan porque las fuerzas que actúan son excesivamente débiles. Por tanto, el efecto del campo magnético disminuye con la distancia.

¿Cómo podemos explicar estos diferentes efectos de las fuerzas?



**Fig. 12.24.** Dos polos magnéticos de diferentes inducciones magnéticas. (Hemos representado la inducción magnética proporcional a la densidad de las líneas de campo.)



**Fig. 12.25.** Inducción magnética en función de la distancia al imán. (Hemos representado la inducción proporcional a la densidad de las líneas de campo.)

<sup>1</sup> Pierre Weiß, físico francés, 1865-1940.

**Inducción magnética**

Símbolo  $B$   
 Símbolo de la unidad T

$$1 \text{ T} = 1 \frac{\text{V s}}{\text{m}^2}$$

$$[B] = \frac{\text{V s}}{\text{m}^2}$$

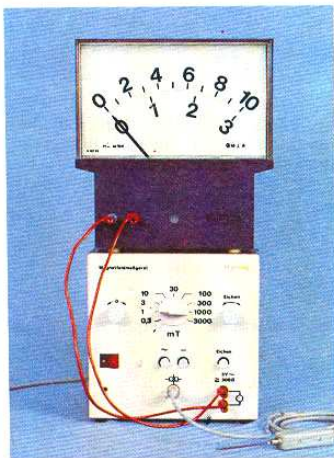


Fig. 12.26. Dispositivo para medir la inducción magnética.

**Flujo magnético**

Símbolo  $\Phi$   
 Símbolo de la unidad Wb

$$1 \text{ Wb} = 1 \text{ V s}$$

$$[\Phi] = \text{V s}$$

$$\Phi = B \cdot A$$

Las líneas de campo de un imán pueden discurrir con mayor o menor densidad. En el apartado 12.1.2 hemos visto por ejemplo que la densidad de las líneas de campo disminuye al aumentar la distancia al imán o a la bobina.

La magnitud física que permite cuantificar este efecto es la densidad de flujo magnético o inducción magnética. Su unidad es el **tesla**.<sup>1</sup>

La inducción magnética indica la densidad del flujo magnético en un determinado punto.

Podemos determinar el efecto de un campo magnético sobre una determinada superficie de referencia con ayuda del efecto Hall.<sup>2</sup>

Cuando un campo magnético atraviese perpendicularmente una plaquita metálica o semiconductor (sonda de Hall) recorrida por una corriente eléctrica, en dicha plaquita se producirá un desplazamiento de cargas. Aparecerá entonces una tensión proporcional a la inducción magnética. Podemos calibrar el voltímetro correspondiente en tesla y leer directamente el valor de la inducción magnética (fig. 12.26).

Por tanto, un aparato para medir la inducción magnética se compondrá de un instrumento indicador y de una sonda de Hall, que se introducirá en el campo a medir. La sonda debe situarse perpendicularmente al campo, pues si no se reduciría la superficie eficaz de medida y se obtendría un valor medido demasiado pequeño.

**Ordenes de magnitud de inducciones magnéticas**

Campo magnético de la tierra	aprox. 0,00005 T
Campo de un conductor recto (100 A)	aprox. 0,00025 T
Bobina sin núcleo de hierro ( $N = 500$ ; $I = 2 \text{ A}$ )	aprox. 0,02 T
Imán permanente	aprox. 0,1 T
Electroimán potente	aprox. 100 T

**12.1.5. Flujo magnético**

Como la inducción magnética es la densidad de flujo magnético, cuando la midamos mediremos también el flujo referido a una determinada superficie.

El flujo magnético de un imán expresa el valor total de su efecto magnético.

La unidad de flujo magnético es el **weber**.<sup>3</sup>

El flujo magnético es el producto de la inducción magnética (densidad de flujo magnético) por la superficie polar del imán. Por tanto la unidad de flujo magnético es igual al producto de las unidades de inducción y de superficie.

$$\Phi = B \cdot A$$

$$1 \text{ Wb} = 1 \frac{\text{V s}}{\text{m}^2} \cdot \text{m}^2$$

$$1 \text{ Wb} = 1 \text{ V s}$$

**12.1.6. Fuerza magnetomotriz (f.m.m.)**

Al igual que un imán permanente también una bobina recorrida por una corriente puede originar un campo magnético. En el experimento 12-1 vamos a

<sup>1</sup> Nicola Tesla, físico croata, 1856-1943.

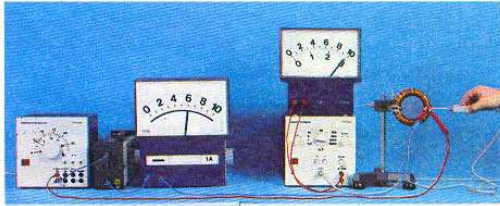
<sup>2</sup> Edwin Herbert Hall, físico americano, 1855-1938.

<sup>3</sup> Wilhelm Eduard Weber, físico alemán, 1804-1891

investigar la influencia de la corriente eléctrica y el número de espiras (símbolo  $N$ ) sobre el campo magnético.

**Experimento 12-1: Influencia de la corriente y del número de espiras sobre el campo magnético**

**Montaje**



En este experimento utilizaremos una bobina toroidal, con la que se obtiene un campo magnético en un espacio limitado.

El campo magnético en el interior de la bobina es el mismo en todos los puntos.

**Realización**

Aplicamos los terminales de la bobina toroidal a una fuente de tensión continua y mediremos la inducción magnética:

- para diferentes intensidades y número de espiras constante
- para diferentes números de espiras e intensidad constante.

**Resultados**

N.º	$N$	$I$ en A	$B$ en mT
1	200	0,2	0,32
2	200	0,4	0,64
3	200	0,6	0,96
4	400	0,6	1,92
5	800	0,6	3,84

Los resultados de las medidas núms. 1 a 3 de la tabla nos muestran que la inducción magnética  $B$  aumenta al crecer la intensidad de la corriente.

La inducción magnética  $B$  es directamente proporcional a la intensidad de la corriente  $I$ :  $B \sim I$ .

Los resultados de las medidas núms. 3 a 5 de la tabla nos muestran que al aumentar el número de espiras crece la inducción magnética.

También en este caso podemos ver que la inducción magnética  $B$  es directamente proporcional al número de espiras  $N$ :  $B \sim N$ .

Por tanto, la inducción magnética depende del producto de la intensidad  $I$  por el número de espiras  $N$ . Este producto se denomina fuerza magnetomotriz (f.m.m.).

La unidad de fuerza magnetomotriz es el ampere, pues el número de espiras es un número sin unidades.

La fuerza magnetomotriz es la causa del flujo magnético.

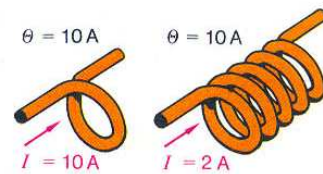


Fig. 12.27. Fuerza magnetomotriz.

**Fuerza magnetomotriz (f.m.m.)**  
Símbolo  $\Theta$

$$\Theta = I \cdot N \quad [\Theta] = A$$

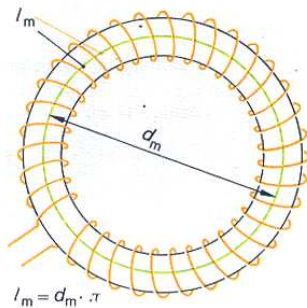


Fig. 12.28. Longitud de las líneas de campo en una bobina toroidal.

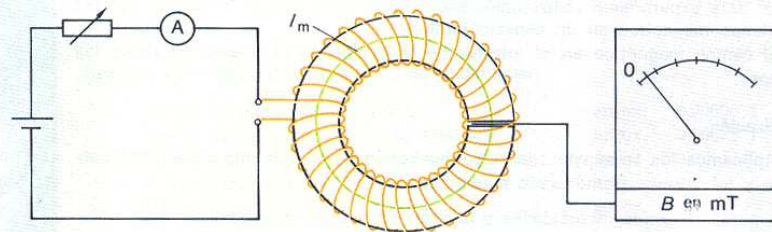
Con pocas espiras y gran intensidad de corriente se puede obtener la misma inducción magnética que con muchas espiras y una corriente de menor intensidad.

### 12.1.7. Intensidad del campo magnético

En el experimento 12-1 la longitud de la bobina toroidal permaneció constante. Su longitud media equivale a la longitud de las líneas de campo. Sin embargo, si modificamos el diámetro variará la longitud de las líneas de campo. La longitud media de éstas  $l_m$  se puede calcular a partir del diámetro  $d_m$ . Pero, ¿qué influencia tiene la longitud media de las líneas de campo sobre la inducción magnética?

#### Experimento 12-2: Influencia de la longitud media de las líneas de campo sobre la inducción magnética

##### Montaje



##### Realización

Mediremos la inducción magnética en función de la longitud media de las líneas  $l_m$ .

##### Resultados

N.º	$d_m$ en m	$l_m$ en m	$B$ en mT	$N = \text{constante}$ $N = 200$
1	0,05	0,157	0,64	$I = \text{constante}$
2	0,075	0,237	0,43	$I = 0,4 \text{ A}$
3	0,1	0,314	0,32	

Las medidas nos muestran que al aumentar la longitud media de las líneas de campo  $l_m$  disminuye la inducción magnética.

La inducción magnética es inversamente proporcional a la longitud de las líneas de campo:

$$B \sim \frac{1}{l_m}$$

Por otro lado la inducción magnética depende además de la fuerza magnetomotriz.

$$B \sim \frac{\mathcal{O}}{l_m}$$

Este cociente  $\frac{\Theta}{l}$  define la **intensidad del campo magnético**.

La intensidad de campo magnético es el cociente entre la f.m.m. y la longitud de las líneas de campo.

**12.1.8. Relación entre la inducción magnética y la intensidad de campo magnético**

La inducción magnética  $B$  nos expresa el valor del efecto magnético. Aparece como consecuencia de una corriente eléctrica.

Como la intensidad del campo magnético  $H$  depende de la intensidad de la corriente  $I$ , del número de espiras  $N$  y de la longitud de las líneas de campo  $l$ , entre la intensidad de campo  $H$  y la inducción magnética  $B$  debe existir una relación.

Como  $H = \frac{\Theta}{l}$ , podemos sustituir  $B \sim \frac{\Theta}{l}$  por  $B \sim H$ . Por tanto, la inducción magnética  $B$  es proporcional a la intensidad de campo magnético  $H$ .

No obstante, si comparamos las unidades de ambas magnitudes

$$([B] = \frac{Vs}{m^2}; [H] = \frac{A}{m}), \text{ veremos que son diferentes.}$$

Ambas magnitudes deben, pues, estar relacionadas a través de una constante  $k$ , que tiene una determinada unidad.

$$B = k \cdot H \Rightarrow k = \frac{B}{H}$$

Para calcular el valor de la constante  $k$  operaremos con los resultados del experimento 12-2.

N.º 1	N.º 2
$N = 200; I = 0,4 \text{ A};$ $l = 0,157 \text{ m}; B = 0,64 \text{ mT}$	$N = 200; I = 0,4 \text{ A};$ $l = 0,237 \text{ m}; B = 0,43 \text{ mT}$
$B = 0,64 \cdot 10^{-3} \frac{Vs}{m^2}$	$B = 0,43 \cdot 10^{-3} \frac{Vs}{m^2}$
$H = \frac{I \cdot N}{l}$	$H = \frac{I \cdot N}{l}$
$H = \frac{0,4 \text{ A} \cdot 200}{0,157 \text{ m}}$	$H = \frac{0,4 \text{ A} \cdot 200}{0,237 \text{ m}}$
$H = 509 \frac{A}{m}$	$H = 337 \frac{A}{m}$
$k = \frac{B}{H}$	$k = \frac{B}{H}$
$k = \frac{0,64 \cdot 10^{-3} \frac{Vs}{m^2}}{509 \frac{A}{m}}$	$k = \frac{0,43 \cdot 10^{-3} \frac{Vs}{m^2}}{337 \frac{A}{m}}$
$k = 1,257 \cdot 10^{-6} \frac{Vs}{A \cdot m}$	$k = 1,257 \cdot 10^{-6} \frac{Vs}{A \cdot m}$

**Intensidad del campo magnético**

Símbolo  $H$

$$H = \frac{\Theta}{l}$$

$$H = \frac{I \cdot N}{l}$$

$$[H] = \frac{A}{m}$$

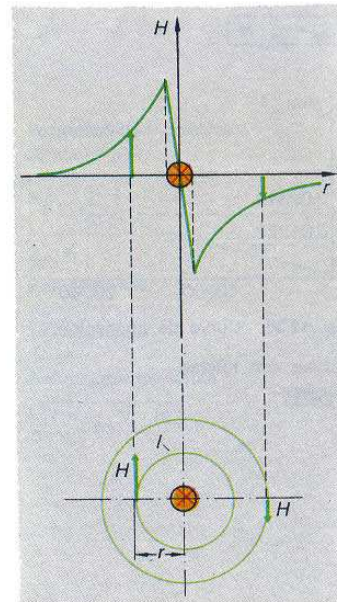


Fig. 12.29. Intensidad de campo magnético en función de la distancia al conductor, o sea de la longitud de las líneas de campo:  $l = 2 r \cdot \pi$

**Permeabilidad**Símbolo  $\mu$ 

$$[\mu] = \frac{\text{V s}}{\text{A m}}$$

**Permeabilidad del vacío**Símbolo  $\mu_0$ 

$$\mu_0 = 1,257 \cdot 10^{-6} \frac{\text{V s}}{\text{A m}}$$

**Inducción magnética en el vacío**

$$B_0 = \mu_0 \cdot H$$

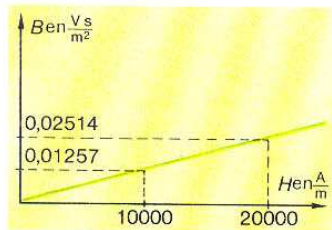


Fig. 12.30. Curva de imanación.

**Bobina con núcleo**

El coeficiente entre la inducción magnética y la intensidad de campo magnético es una constante denominada **permeabilidad**.

La permeabilidad es una característica magnética de la materia (por ejemplo del aire, cartón, aluminio, hierro).

La permeabilidad nos indica con qué facilidad atraviesa el campo magnético la materia, o sea si ésta es buena conductora o no del campo magnético.

En los experimentos realizados hasta ahora el campo magnético se propagaba por el aire. Si hubiéramos realizado un experimento en el vacío habríamos obtenido aproximadamente el mismo valor de la permeabilidad, la **permeabilidad del vacío**.

La permeabilidad del vacío es el cociente entre la inducción magnética y la intensidad del campo magnético en el vacío.

Los conocimientos que hemos obtenido hasta ahora se pueden aplicar también a otros conductores o bobinas recorridos por corrientes, aunque en realidad las leyes obtenidas sólo son válidas con exactitud para las bobinas toroidales. No obstante, también pueden utilizarse sin más en bobinas rectas cuya longitud sea mucho mayor que su diámetro.

Para  $l_s \gg d$  tenemos que  $H \sim \frac{I_s}{l_s}$ . (Para  $l_s \approx 15 \cdot d$  ya podemos aplicarlo.)

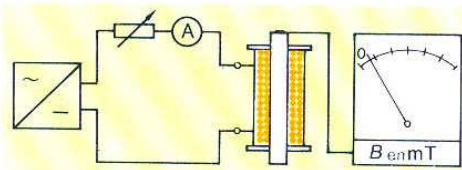
Con ello ya podemos obtener la inducción magnética en función de la intensidad de campo magnético en el vacío.

La curva que representa la inducción magnética en función de la intensidad de campo magnético se denomina curva de imanación (fig. 12.30).

En una bobina con núcleo de aire podemos observar que si duplicamos la intensidad del campo  $H$  obtenemos una inducción magnética  $B$  doble. Por tanto, la curva de imanación es una recta.

Si utilizamos otro material en el núcleo las relaciones son más complicadas. En el experimento siguiente vamos a investigar la influencia que tiene el material del núcleo sobre la efectividad del campo magnético.

### Experimento 12-3: Influencia del material del núcleo sobre la inducción magnética

**Montaje**

Utilizaremos una bobina en la que podamos cambiar el núcleo. Los diferentes núcleos empleados tienen todos las mismas dimensiones. Sólo se diferencian en el material.

**Realización**

Por una bobina con  $N = 300$  espiras hacemos circular una corriente continua de  $I = 1$  A. En una de las caras frontales del núcleo medimos la inducción magnética  $B$  mediante una sonda de Hall. Realizaremos las medidas con los diferentes núcleos de diversos materiales.

**Resultados**

N.º	Material	B en mT
1	Madera (aire)	3,76
2	Hierro	940
3	Aluminio	3,77
4	Cobre	3,75

De los resultados del experimento podemos ver que el núcleo de hierro aumenta considerablemente la efectividad del campo magnético respecto al núcleo de aire. Los otros dos materiales (Al, Cu) apenas modifican los efectos del campo magnético respecto al aire.

Investigaciones más exactas han dado como resultado que existen tres tipos de materiales según cual sea su efecto sobre el campo magnético respecto a una bobina con núcleo de aire. Unos dan lugar a un

- aumento considerable: **materiales ferromagnéticos**
- pequeño aumento: **materiales paramagnéticos**
- pequeña reducción: **materiales diamagnéticos**.

El efecto de un material sobre el campo magnético se indica mediante la **permeabilidad relativa**, que es el cociente entre la permeabilidad del material en cuestión y la permeabilidad del vacío.

La permeabilidad relativa indica en qué proporción varía el efecto del campo magnético respecto al vacío.

El producto de la permeabilidad del vacío por la permeabilidad relativa nos da la permeabilidad  $\mu$  del material en cuestión.

Ahora ya podemos expresar la inducción magnética en función de la intensidad del campo magnético cualquiera que sea el material del núcleo.

**Permeabilidad relativa**

Símbolo  $\mu_r$

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$$

**Permeabilidad**

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$$

**Inducción magnética**

$$B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H$$

Tabla 12.1. Permeabilidades relativas de algunos materiales

Materiales	Permeabilidad relativa $\mu_r$	
	Valor máximo	Valor inicial
Chapa magnética (no aleada)	3000	150
Chapa magnética (aleada)	6500	250
Hyperm	10000	2500
Megaperm	70000	3300
Permalloy	80000	6000

**12.1.9. Curvas de imanación**

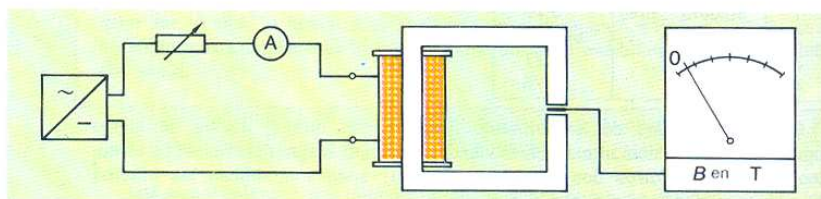
En la figura 12.30 hemos trazado la gráfica de la inducción magnética  $B$  en función de la intensidad de campo  $H$  para el aire.



Al utilizar en el núcleo materiales ferromagnéticos la curva es más complicada, pues la permeabilidad relativa  $\mu_r$  ya no es una constante. Vamos a aclarar este hecho con un experimento.

#### Experimento 12-4: Obtención de la curva de imanación de un núcleo de material ferromagnético

##### Montaje



El montaje experimental contiene un núcleo intercambiable y un entrehierro muy estrecho para la sonda de medida.

##### Realización

Aumentando la intensidad de la corriente aumentaremos la intensidad del campo magnético y con la sonda de medida iremos midiendo las correspondientes inducciones magnéticas.

##### Resultados

N.º	Material del núcleo	$i$ en A	$H$ en $\frac{A}{m}$	$B$ en mT
1		0	0	0
2		0,33	2000	1,4
3	Chapa magnética	0,66	4000	1,55
4		1	6000	1,6
5		2	12000	1,72
6		3	18000	1,81
7	Hierro colado	0	0	0
8		0,33	2000	0,59
9		0,66	4000	0,71

$$l = 0,3 \text{ m}$$

$$N = 1800$$

Con estos valores podemos trazar las curvas de imanación de la chapa magnética y del hierro colado (fig. 12.31). En ellas podemos observar que la inducción magnética  $B$  no aumenta proporcionalmente a la intensidad de campo magnético  $H$ . En la zona inicial el aumento de  $B$  es muy fuerte. Al seguir aumentando  $H$  el aumento de  $B$  es reducido.

¿Cómo podemos explicar este fenómeno?

Al principio, con una reducida intensidad de campo magnético  $H$  se pueden orientar muchísimos imanes elementales, que reforzarán considerablemente la inducción magnética  $B$ . Si seguimos aumentando la intensidad del campo  $H$  se seguirán orientando más imanes elementales, y la inducción magnética seguirá creciendo hasta que finalmente todos los imanes elementales estén orientados. El

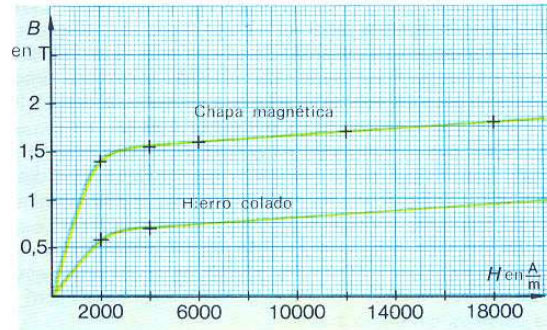


Fig. 12.31. Curvas de imanación de chapa magnética y hierro colado.

material del núcleo no podrá entonces seguir reforzando la inducción magnética. Decimos que el material del núcleo se ha saturado.

Por tanto, la permeabilidad relativa  $\mu_r$  no es constante.  $\mu_r$  es muy grande en la zona inicial y va decreciendo hasta valer  $\mu_r = 1$  en la zona de saturación.

Cada material presenta una determinada curva de imanación (fig. 12.32).

Si invertimos el sentido de imanación obtendremos otra curva de imanación diferente, la **curva de histéresis** (fig. 12.33).

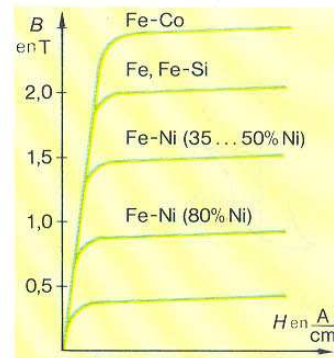
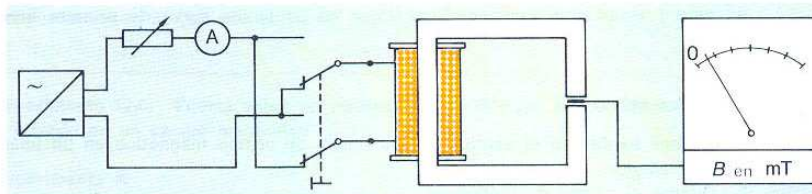


Fig. 12.32. Curvas de imanación.

**Experimento 12-5: Histéresis de un núcleo de hierro**

**Montaje**



El montaje de medida presenta un entrehierro muy estrecho para la sonda de medida.

**Realización**

Primero se aumenta la intensidad de la corriente de 0 A a 2 A y después se vuelve a reducir a 0 A. A continuación se invierte la polaridad de la fuente de tensión, se aumenta la intensidad de 0 A hasta -2 A y finalmente se vuelve a reducir hasta 0 A.

**Resultados**

N.º	I en A	H en $\frac{A}{m}$	B en T
1	-0... 2	0... 12000	0... 1,7
2	2... 0	12000... 0	1,7... 0,7
3	0... -2	0... -12000	0,7... -1,7
4	-2... 0	-12000... 0	-1,7... -0,7

$l = 0,3 \text{ m}$   
 $N = 1800$

Para poder interpretar mejor los resultados del experimento 12-5 trazaremos con ellos una gráfica de  $B$  en función de  $H$  (fig. 12.33).

Al aumentar la intensidad de la corriente la intensidad del campo magnético aumenta proporcionalmente. La inducción magnética crece primero muy fuertemente y después menos, hasta que el material del núcleo se satura. La curva de imanación discurre, pues, del punto **0 al 1**.

Al reducir la intensidad de la corriente la intensidad de campo  $H$  se reduce hasta el valor  $0 \text{ A/m}$ . La inducción magnética también disminuye, pero no vuelve al valor  $0 \text{ T}$ . En el núcleo de hierro queda una imanación residual, que da lugar a una **inducción residual  $B_r$** .

La curva de desimanación discurre del punto **1 al 2**. Al invertir el sentido de la corriente la intensidad de campo crece también en sentido opuesto al anterior. Para un determinado valor la inducción magnética habrá alcanzado el valor  $0 \text{ T}$ . La curva va del punto **2 al 3**.

La intensidad de campo necesaria para anular la imanación residual se denomina **campo coercitivo  $H_c$** .

A partir de este punto la inducción magnética también crece en sentido inverso hasta que el hierro se vuelve a saturar. La curva pasa de **3 a 4**.

Al reducir la intensidad de campo también disminuye la inducción magnética, pero también esta vez queda una imanación remanente en el núcleo cuando  $H = 0 \text{ A/m}$ . La curva pasa del punto **4 al 5**.

Si aumentamos ahora la intensidad de campo en sentido positivo, la inducción  $B$  disminuirá hasta anularse para una intensidad de campo  $H_c$ . La curva de histéresis va del punto **5 al 6**.

Al seguir aumentando  $H$  la inducción magnética  $B$  también crecerá en sentido positivo hasta que el núcleo se sature. La curva pasará del punto **6 al 1**, con lo que hemos obtenido una curva cerrada o ciclo de histéresis.

Sólo obtendremos el segmento de curva de los puntos **0 al 1** cuando el hierro no esté previamente imanado. Este tramo se denomina **curva de primera imanación**.

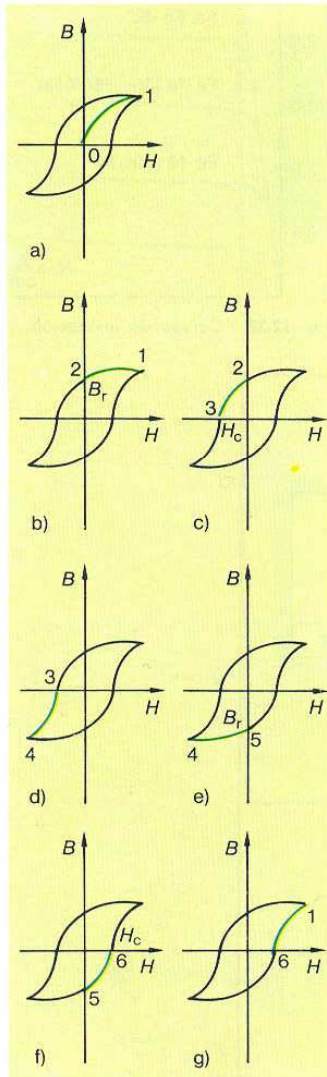


Fig. 12.33. Curva de histéresis.

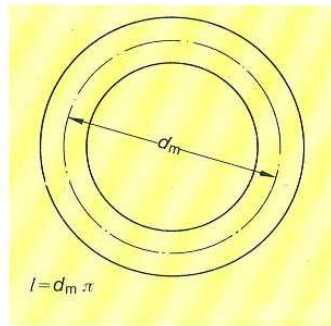


Fig. 12.34.

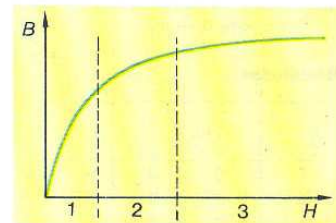


Fig. 12.35. Gráfica del ejercicio 6.

**Ejercicios sobre 12.1**

1. ¿Cómo se definió el sentido de las líneas de campo magnético en un imán permanente?
2. Dibujar el campo magnético de
  - a) un conductor recorrido por una corriente,

- b) una espira conductora recorrida por una corriente,
  - c) una bobina recorrida por una corriente.
3. Explicar los conceptos de
    - a) inducción magnética,
    - b) flujo magnético,
    - c) fuerza magnetomotriz.
  4. Una bobina toroidal de 300 espiras y diámetro medio  $d_m = 5$  cm debe producir una inducción magnética de 1,5 T (fig. 12.34). ¿Qué intensidad debe tener la corriente que circule por la bobina?
  5. ¿Cómo variarán la inducción magnética y la intensidad de campo magnético cuando por la bobina circule una corriente de intensidad doble?
  6. ¿Qué podemos decir de la permeabilidad relativa  $\mu_r$  en las tres zonas indicadas en la figura 12.35?

## 12.2. Fuerzas en el campo magnético (principio del motor)

Como ya hemos observado en 12.1.2, polos del mismo nombre se repelen y polos de distinto nombre se atraen. La acción de las fuerzas se presenta tanto en los imanes permanentes como en los electroimanes, o sea conductores recorridos por corrientes.

### 12.2.1. Conductor recorrido por una corriente y situado en un campo magnético

En el experimento 12-6 vamos a investigar las fuerzas que actúan entre un conductor recorrido por una corriente y un campo magnético.

#### Experimento 12-6: Fuerza sobre un conductor recorrido por una corriente y situado en un campo magnético

##### Experimento A

##### Realización

Colocamos un columpio conductor de modo que el conductor horizontal se encuentre en el campo magnético de un imán de herradura. Aplicamos a los terminales del columpio conductor una tensión con la polaridad indicada. Por los conductores circula una corriente  $I$ .

##### Resultado

El columpio conductor se desvía hacia la derecha.

##### Experimento B

##### Realización

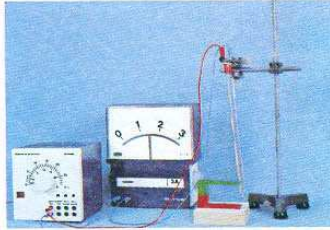
Se invierte la polaridad de la fuente de tensión (la corriente circula en sentido opuesto).

##### Resultado

El columpio conductor se desvía hacia la izquierda.



Unidad Operativa SENATI – Abancay



### Experimento C

#### Realización

Damos la vuelta al imán, con lo que se invierte el sentido del campo magnético. Conservamos el sentido de la corriente que circula por los conductores.

#### Resultado

El columpio conductor se desvía hacia la derecha.

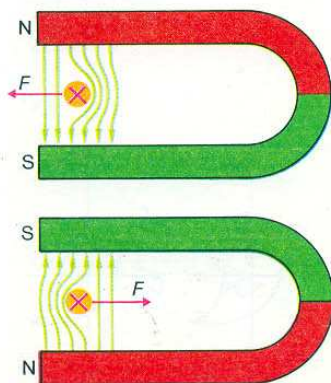


Fig. 12.36. Fuerza sobre un conductor recorrido por corriente en función del sentido del campo magnético

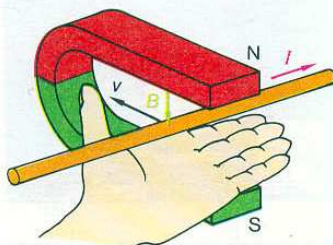


Fig. 12.37.

Fuerza sobre un conductor situado en un campo magnético

$$F = B \cdot I \cdot l$$

Sobre un conductor recorrido por una corriente y situado en un campo magnético actúa una fuerza. El sentido de esta fuerza depende del sentido de la corriente del conductor y del sentido del campo magnético.

Para explicar este fenómeno utilizaremos el modelo de las líneas de un campo magnético.

La composición de los dos campos, el del conductor y el del imán, da lugar a un campo total. A la izquierda del conductor las líneas de los dos campos tienen diferentes sentidos y se anularán parcialmente, con lo que el campo será débil. A la derecha del conductor las líneas de los dos campos tienen el mismo sentido por lo que discurrirán más apretadas, obteniéndose un campo más fuerte.

Como las líneas de campo tienden a ser lo más cortas posible y a separarse de las otras líneas colindantes, sobre el conductor actuará una fuerza hacia la izquierda (saliendo del imán). El conductor se desviará hacia la zona de campo más débil.

Si invertimos el sentido del campo del imán de herradura, el campo resultante tendrá una mayor densidad de líneas a la izquierda del conductor, sobre el que actuará una fuerza en sentido contrario.

El sentido de la fuerza que actúa sobre el conductor varía también cuando se modifica el sentido de la corriente.

Del experimento 12-6 podemos ver que la fuerza, la dirección de la corriente y las líneas de campo son todas perpendiculares entre sí.

Si conocemos los sentidos de las líneas de campo y de la corriente podemos obtener el sentido de la fuerza con ayuda de la regla del motor, también llamada

#### Regla de la mano izquierda

Si colocamos la mano izquierda de manera que las líneas de campo entren por la palma de la mano y que los dedos extendidos indiquen el sentido de la corriente, el pulgar extendido nos señalará el sentido de la fuerza que actúa sobre el conductor.

Si en el experimento 12-6 modificamos la intensidad de la corriente  $I$ , la longitud efectiva del conductor  $l$  (mediante un segundo imán paralelo al primero) y la inducción magnética  $B$  mediante un nuevo imán en paralelo obtendremos la siguiente relación:

La fuerza  $F$  que actúa sobre el conductor es tanto mayor

- cuanto mayor es la intensidad de la corriente  $I$ ,
- cuanto mayor es la longitud efectiva del conductor  $l$ ,
- cuanto mayor es la inducción magnética  $B$ .

En esta fórmula no intervienen más magnitudes que las citadas. Por tanto, hemos obtenido una ecuación para calcular la fuerza que actúa sobre un conductor recorrido por la corriente.

Sustituyendo las magnitudes citadas por sus respectivas unidades podemos demostrar que  $1 \text{ T} = 1 \text{ Vs/m}^2$  (ver 12.1.4).

$$F = I \cdot l \cdot B, \quad N = A \cdot m \cdot T$$

$$T = \frac{N}{A \cdot m} \quad \text{con } N = \frac{V \cdot A \cdot s}{m} \quad T = \frac{V \cdot A \cdot s}{A \cdot m}$$

$$T = \frac{V \cdot A \cdot s}{A \cdot m^2} \quad T = \frac{V \cdot s}{m^2}$$

Si mantenemos las demás condiciones del experimento 12-6 y colocamos dos conductores en el campo magnético, la fuerza  $F$  que actuará será doble, pues las intensidades de las corrientes de los dos conductores se sumarán. Por tanto, la fuerza  $F$  será tanto mayor cuantos más sean los conductores que se encuentran en el campo magnético.

Ejemplo:

Si situamos 3 conductores ( $z = 3$ ) en un campo magnético de inducción  $B = 0,8 \text{ T}$  y hacemos circular por cada conductor una corriente de  $I = 12,5 \text{ A}$ , la fuerza  $F$  que actuará será triple:

$$F = B \cdot I \cdot l \cdot z$$

$$F = 12,5 \text{ A} \cdot 0,04 \text{ m} \cdot 0,8 \frac{\text{V s}}{\text{m}^2} \cdot 3$$

$$F = 1,2 \frac{\text{V s}}{\text{m}}$$

$$F = 1,2 \text{ N}$$

### 12.2.2. Bobina recorrida por una corriente y situada en un campo magnético

En un instrumento de medida de cuadro móvil se encuentra una bobina sujeta de modo que puede girar en el campo de un imán permanente. En el experimento 12-7 vamos a estudiar el principio de funcionamiento del instrumento de cuadro móvil.



Fig. 12.38. Fuerza sobre tres conductores recorridos por corriente en un campo magnético.

Fuerza sobre varios conductores situados en un campo magnético

$$F = B \cdot I \cdot l \cdot z$$

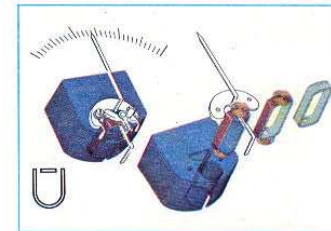


Fig. 12.39. Instrumento de cuadro móvil.

### Experimento 12-7: Fuerza que actúa sobre una bobina recorrida por una corriente y situada en un campo magnético

#### Experimento A

##### Realización

Colocamos una bobina de modo que pueda girar en el campo magnético de un imán permanente.

Aplicamos a los terminales del dispositivo experimental una tensión continua ajustable. Por la bobina circula una corriente  $I$ .

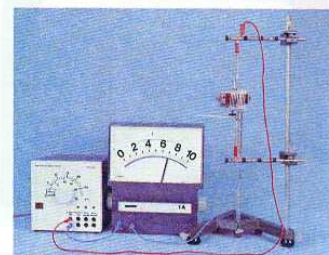
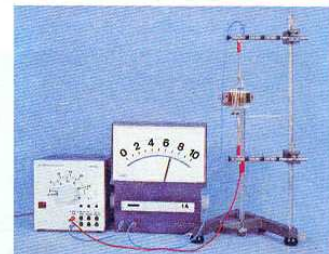
##### Resultado

La bobina efectúa un giro.

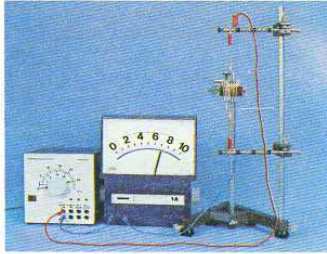
#### Experimento B

##### Realización

Invertimos la polaridad de la fuente de tensión, con lo que se invertirá el sentido de la corriente.



Unidad Operativa SENATI - Abancay



**Resultado**

El sentido del giro es el contrario.

**Experimento C**

**Realización**

Invertimos el sentido del campo magnético del imán de herradura.

**Resultado**

El sentido del giro es el contrario.

El experimento 12-7 muestra que:

Una bobina recorrida por una corriente y situada en un campo magnético efectúa un giro.

El sentido del giro depende del sentido de la corriente en la bobina y del campo magnético.

¿Cómo podemos explicar este fenómeno?

La bobina recorrida por la corriente es un electroimán, y tiene por tanto un polo norte y un polo sur. Como la bobina se encuentra situada en el campo de un imán y polos de igual nombre se repelen y polos de distinto nombre se atraen, sobre la bobina actuarán fuerzas que la harán girar. La bobina sólo podrá girar hasta aquella posición en la que coincidan los sentidos de su campo y del del imán.

Si invertimos el sentido de la corriente, el polo norte de la bobina se convertirá en polo sur y viceversa, con lo que se invertirá el sentido del giro (ver fig. 12.40)

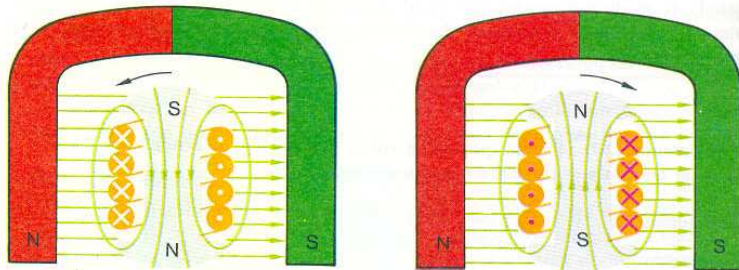


Fig. 12.40.

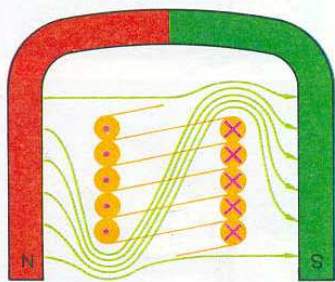


Fig. 12.41.

Este movimiento de giro puede explicarse también con ayuda del campo total resultante de la superposición de los campos del imán de herradura y de la bobina.

La superposición de ambos campos da lugar al espectro magnético representado en la figura 12.41. Cada línea de campo tiende a ser lo más corta posible y a separarse de las colindantes. Por tanto actuarán fuerzas que harán girar la bobina en el sentido correspondiente. Si en el experimento 12-7 modificamos la intensidad de la corriente  $I$  o la inducción magnética  $B$  también variará el ángulo de giro de la bobina.

La acción de fuerzas sobre bobinas recorridas por corrientes y situadas en

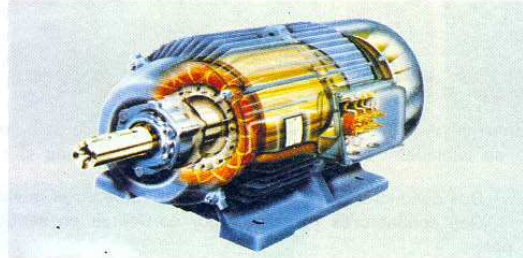


Fig. 12.42. Motor eléctrico.

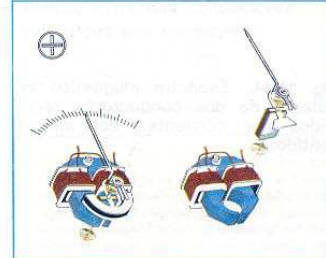


Fig. 12.43. Instrumento de medida electrodinámico.

campos magnéticos se utiliza además de en los instrumentos de cuadro móvil, en los instrumentos de medida electrodinámicos (fig. 12.43) y en los motores eléctricos (fig. 12.42).

El campo magnético obtenido en el experimento 12-7 con un imán de herradura puede también generarse con una segunda bobina recorrida por una corriente.

### 12.2.3. Conductores paralelos recorridos por corrientes

En la práctica son muy frecuentes los conductores paralelos, por ejemplo en las líneas de alimentación, en los devanados de motores y en las bobinas. Por dos conductores paralelos pueden circular corrientes del mismo sentido o de sentidos opuestos.

En el experimento 12-8 vamos a estudiar las fuerzas que se ejercen mutuamente dos conductores recorridos por corrientes.

#### Experimento 12-8: Fuerzas entre dos conductores recorridos por corrientes

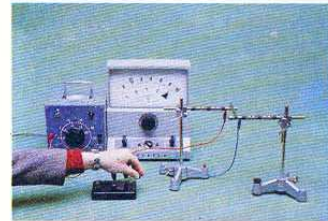
##### Experimento A

###### Realización

Se aplica una tensión a los terminales del dispositivo experimental A. La corriente circula por los dos conductores paralelos con el mismo sentido en ambos.

###### Resultado

Los dos conductores paralelos se aproximan.



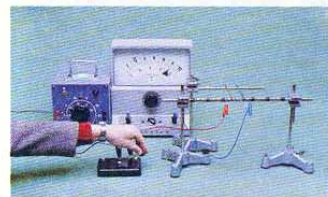
##### Experimento B

###### Realización

Se aplica una tensión a los terminales del dispositivo experimental B. La corriente circula por los dos conductores en sentidos opuestos.

###### Resultado

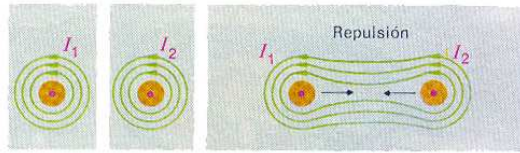
Los dos conductores paralelos se alejan.



Unidad Operativa SENATI - Abancay



Fig. 12.44. Espectro magnético alrededor de dos conductores recorridos por corrientes del mismo sentido.



Dos conductores recorridos por corrientes en el mismo sentido se atraen.  
 Dos conductores recorridos por corrientes en sentidos opuestos se repelen.

La acción de las fuerzas que provocan la atracción o repulsión puede explicarse con ayuda del modelo de las líneas de campo.

Los campos de los dos conductores recorridos por corrientes se superponen dando lugar a un campo total resultante. Los campos resultantes serán diferentes según circulen las corrientes por los dos conductores en el mismo o en distintos sentidos. Los hemos representado en las figuras 12-44 y 12.45. No es necesario que los dos conductores sean recorridos por corrientes de igual intensidad.

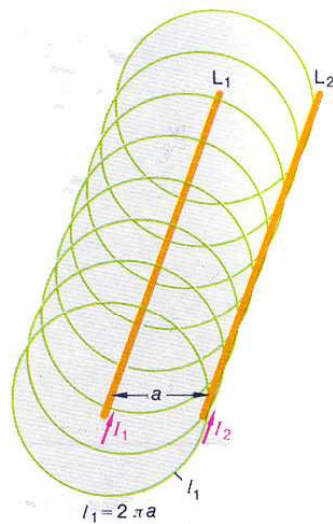


Fig. 12.46.

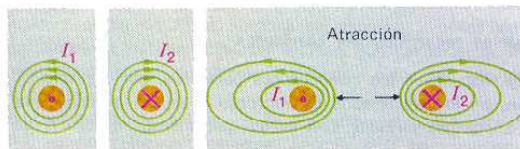


Fig. 12.45. Espectro magnético alrededor de dos conductores recorridos por corrientes en sentidos opuestos.

Vamos a razonar ahora de qué magnitudes depende la fuerza que se ejercen los dos conductores.

Cada uno de los conductores genera a su alrededor un campo concéntrico que ejercerá una fuerza sobre el otro. Esta fuerza se puede calcular con la fórmula:

$$F = I \cdot l \cdot B \quad (\text{ver } 12.3.1)$$

La fuerza que ejerce el campo magnético del conductor 1 sobre el conductor 2 (ver fig. 12.46) será:

$$F = I_2 \cdot l \cdot B_1$$

Para poder calcular la fuerza debemos determinar la inducción magnética  $B_1$  a una distancia  $a$  del conductor 1.

$$B_1 = \mu \cdot H_1 \quad (\text{ver } 12.1.8) \quad H_1 = \frac{I_1 \cdot N_1}{l_1}; \quad l_1 = 2 \pi a$$

$$B_1 = \mu \cdot \frac{I_1 \cdot N_1}{2 \pi a} \quad H_1 = \frac{I_1 \cdot N_1}{2 \pi a}$$

Sustituyendo esta expresión de  $B$  en la fórmula para calcular la fuerza obtenemos:

$$F = I_2 \cdot l \cdot \mu \cdot \frac{I_1 \cdot N_1}{2 \pi a}$$

En el vacío o en el aire  $\mu = \mu_0$ , pues  $\mu_r = 1$ , y además  $N_1 = 1$ , pues sólo existe un conductor.

La fuerza que se ejercen dos conductores paralelos recorridos por corrientes se utilizó para definir la unidad (fundamental) ampere de la intensidad de corriente eléctrica.

**Ampere, unidad SI básica, definición** ▷

**Fuerza entre dos conductores recorridos por corrientes**

$$F = \frac{\mu_0}{2 \pi} I_1 \cdot I_2 \cdot \frac{l}{a}$$

1 ampere es la intensidad de una corriente eléctrica invariante con el tiempo que, al circular por dos conductores rectos, infinitamente largos, de sección circular despreciable, dispuestos paralelamente en el vacío a una distancia de 1 metro uno de otro, provoca entre ambos conductores una fuerza de  $2 \cdot 10^{-7}$  newton por metro de longitud.

**Ejercicios sobre 12.2**

1. ¿De qué depende la fuerza sobre un conductor recorrido por una corriente y situado en un campo magnético?
2. ¿Qué fuerza actuará sobre un hilo recorrido por 0,5 A situado perpendicularmente en el campo de un imán de herradura de  $B = 0,15$  T y 4 cm de anchura?
3. ¿En qué sentido se moverá el conductor de la figura 12.47 si la corriente circula en sentido a-b?
4. Describir con ayuda del espectro magnético el movimiento de giro de una bobina recorrida por una corriente.
5. Trazar un esquema del campo magnético resultante de dos conductores recorridos por corrientes en sentidos opuestos e indicar los sentidos de las fuerzas sobre los conductores.
6. En caso de cortocircuito por dos barras colectoras separadas 5 cm circulará una corriente de 15 kA. ¿Qué fuerza actuará sobre las barras por metro de longitud?

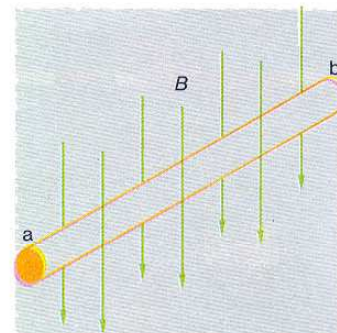


Fig. 12.47. Esquema correspondiente al ejercicio 3.

**12.3. Inducción electromagnética.**

En 12.2 estudiamos las fuerzas que actúan en un campo magnético. Observamos que un conductor móvil situado en un campo magnético se movía cuando por él circulaba una corriente. La energía eléctrica se convertía en energía cinética o del movimiento.

En un generador el principio es el opuesto. A partir de energía cinética se obtiene energía eléctrica. En las páginas que vienen a continuación vamos a estudiar cómo se produce exactamente este fenómeno.

**12.3.1. Inducción por movimiento (principio del generador)**

En el generador mostrado en la figura 12-48 fuerzas mecánicas hacen girar (mueven) espiras conductoras en un campo magnético, con lo que en los terminales del generador aparece una tensión. En el experimento 12-9 hemos simplificado considerablemente el principio del generador. El campo magnético necesario será el de un imán de herradura, las espiras conductoras se sustituyen por un conductor recto que junto con los cables para medir constituyen una espira

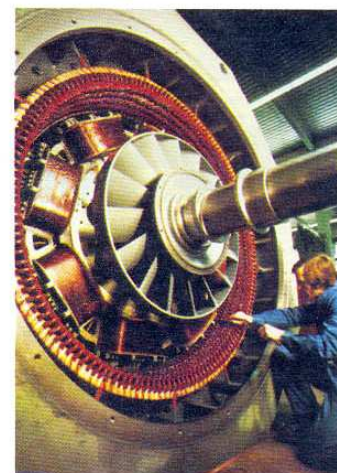


Fig. 12.48. Generador.

conductor. El movimiento de rotación se sustituye por un movimiento rectilíneo.

Cuando en un campo magnético se mueve un conductor cortando las líneas de campo, en el conductor se inducirá una tensión.

El sentido de esta tensión inducida depende del sentido de movimiento del conductor y del sentido de las líneas del campo magnético.



**Experimento 12-9: Movimiento de un conductor en un campo magnético**

**Experimento A**

**Realización**

El conductor se mueve hacia el interior del campo magnético con ayuda del columpio conductor. El imán está colocado de manera que las líneas de campo queden cortadas por la dirección de movimiento del conductor.

**Resultado**

La aguja del voltímetro se desvía hacia la izquierda.

**Experimento B**

**Realización**

Invertimos el sentido de movimiento del conductor, de modo que salga del imán.

**Resultado**

La aguja del voltímetro se desvía en sentido contrario.

**Experimento C**

**Realización**

Invertimos el sentido del campo magnético.

**Resultado**

La aguja del voltímetro se vuelve a desviar en sentido opuesto.

La inducción de una tensión puede explicarse con ayuda del modelo de las líneas de campo.

Al mover el conductor los electrones libres existentes en él también se verán forzados a moverse. El movimiento de cargas eléctricas da lugar a un campo magnético.

Aparecen así campos magnéticos circulares, como se muestra en la figura 12.49. Las líneas de campo deben trazarse en sentido contrario al dado por la regla de 12.1.2, pues al deducir esta regla supusimos el sentido técnico de la corriente.

Al mover este conductor a través de un campo magnético aparecerá una fuerza sobre los electrones libres que dará lugar a un desplazamiento de éstos (ver fig. 12.50).

En cambio los núcleos atómicos positivos se encuentran fijados en la estructura atómica y no pueden desplazarse. De este modo se obtiene una separación de cargas, con lo que aparecerá una tensión.

Si movemos el conductor en sentido contrario, y por tanto también sus cargas, se invertirá el sentido de la tensión.

Si fuéramos moviendo el conductor en el campo magnético de un lado para otro se induciría en aquél una tensión alterna.

Para determinar el sentido de la tensión inducida puede utilizarse la regla de la mano derecha, también llamada regla de generador.

**Regla de la mano derecha:**

Si colocamos la mano derecha de modo que las líneas de campo entren por la palma de la mano y el pulgar extendido nos indique el sentido de movimiento del conductor, los demás dedos nos señalarán el sentido de la corriente que circulará por el conductor.

El desplazamiento (movimiento) de los electrones hacia uno de los extremos del conductor provocará alrededor de éste la aparición de un campo magnético concéntrico, que será de sentido contrario al campo del imán permanente y por tanto se opondrá al movimiento del conductor.

**Ley de Lenz<sup>1</sup>**

La corriente inducida por el movimiento de un conductor en un campo magnético tendrá un sentido tal que se oponga al movimiento que originó dicha corriente.

Para obtener una tensión inducida deberá realizarse un trabajo contra esta fuerza que se opone al movimiento.

Si en el experimento 12-9 modificamos la inducción magnética  $B$ , la longitud efectiva del conductor  $l$  y la velocidad  $v$  del conductor observamos que:

La tensión inducida será tanto mayor

- cuanto mayor sea la inducción magnética:  $U \sim B$
- cuanto mayor sea la longitud efectiva del conductor:  $U \sim l$
- cuanto mayor sea la velocidad del conductor:  $U \sim v$ .

Como no existen más magnitudes que influyan en el proceso obtenemos la relación:

$$U = B \cdot l \cdot v$$

Si utilizamos un mayor número de conductores y mantenemos constantes las demás condiciones observaremos que la tensión inducida también depende del número de conductores.

**12.3.2. Inducción en reposo (principio del transformador)**

Toda corriente eléctrica origina un campo magnético. Vamos a estudiar ahora si esta afirmación también es válida al revés. O sea, ¿un campo magnético da lugar a una corriente o tensión eléctrica?

<sup>1</sup> Heinrich Friedrich Emil Lenz, físico alemán, 1804-1865

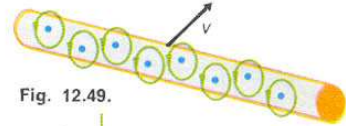


Fig. 12.49.

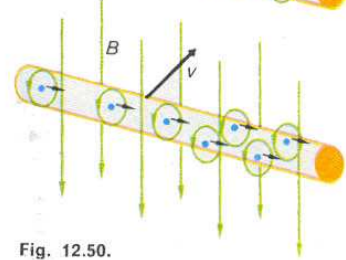


Fig. 12.50.

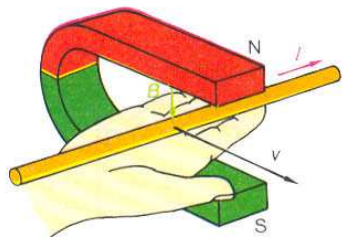
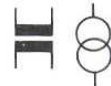


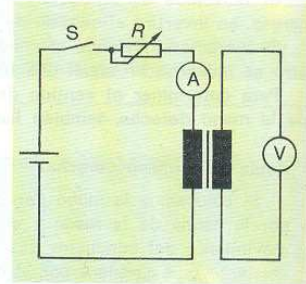
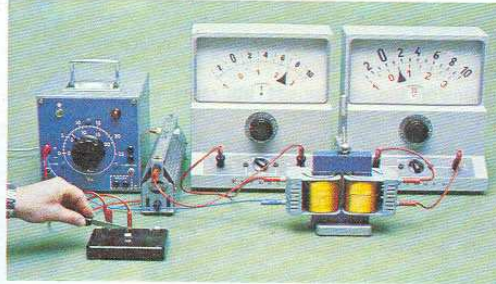
Fig. 12.51.

**Tensión inducida**

$$U = B \cdot l \cdot v \cdot z$$

**Transformador**



**Experimento 12-10: Principio del transformador****Montaje**

Sobre un núcleo de hierro común se disponen dos bobinas separadas eléctricamente. La bobina 1 (**devanado primario**) está unida a través de un interruptor S, una resistencia variable R y un amperímetro a una fuente de tensión. A la bobina 2 (**devanado secundario**) se conecta un voltímetro.

**Realización**

Cerramos el interruptor (con lo que circulará una corriente) y al cabo de poco tiempo volvemos a abrirlo.

**Resultados**

La aguja del voltímetro se desvía en el momento de conectar y vuelve inmediatamente a la posición de cero (pico de tensión).

Cuando el interruptor está cerrado circula una corriente que provocará un campo magnético; no obstante éste no genera tensión eléctrica alguna.

En el instante de desconexión se vuelve a desviar la aguja del movimiento, pero esta vez en sentido contrario. También ahora vuelve la aguja inmediatamente después a la posición de cero.

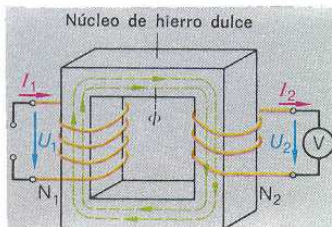


Fig. 12.52. Transformador con núcleo de hierro dulce.

¿Cómo podemos explicar los fenómenos observados en el experimento 12-10?

Al conectar la corriente aparece muy rápidamente un flujo magnético, que circula por el núcleo de hierro y atraviesa la bobina secundaria. Por tanto, la variación del flujo ha inducido en ella una tensión.

Al desconectar la corriente el flujo magnético desaparece muy rápidamente. También ahora la variación del flujo induce una tensión en la bobina secundaria. El sentido de esta tensión depende de que el flujo aumente o disminuya.

En una bobina se induce una tensión cuando varía el flujo magnético. El sentido de la tensión inducida depende del sentido de variación del flujo.

El sentido de la tensión inducida depende además del sentido en que esté bobinada la bobina. Como éste no suele poderse variar no lo tendremos en consideración de aquí en adelante.

Suponiendo un sistema dextrógiro tenemos que:

- Un aumento de la corriente (aumento del flujo) induce una tensión negativa.

- Una reducción de la corriente [disminución del flujo] induce una tensión positiva.

Si en el experimento 12-10 cerramos el interruptor, y con ayuda de la resistencia variable aumentamos la intensidad de la corriente desde cero hasta su valor máximo, y a continuación la reducimos otra vez a cero, repitiendo este proceso a diferentes velocidades, veremos que:

La tensión inducida es tanto mayor cuanto menor es el tiempo en el que varía el flujo magnético.

En una bobina con varias espiras se inducirá en cada una una tensión. Al estar las diversas espiras conectadas en serie se sumarán las tensiones inducidas en todas las espiras.

La tensión inducida es tanto mayor cuanto mayor es el número de espiras.

Recopilando los diferentes resultados obtenidos tenemos que la tensión inducida  $U$  es tanto mayor

- cuanto mayor es la variación del flujo  $\Delta\Phi$ ,
- cuanto menor es el tiempo  $\Delta t$  en el que se produce la variación de flujo,
- cuanto mayor es el número de espiras  $N$  de la bobina.

Estas proporcionalidades nos dan la ley de inducción o ley de Faraday:

Cuando en una bobina se modifica el flujo magnético, en sus espiras se inducirá una tensión de valor directamente proporcional a la velocidad de variación del flujo  $\Delta\Phi/\Delta t$  y al número de espiras  $N$ .

El signo negativo es debido a la ley de Lenz.

**Ejemplo:**

En una bobina de  $N = 800$  espiras se modifica en 0,1 segundos el flujo magnético  $\Phi$  de  $\Phi_1 = 1,2$  mVs a  $\Phi_2 = 0,75$  mVs.

¿Cuánto vale la tensión inducida?

Datos:  $N = 800$ ;  $\Delta\Phi = -0,45$  mVs;  $\Delta t = 0,1$  s.

Buscamos  $U$

$$\text{Solución: } U = -N \cdot \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

$$U = 800 \cdot \frac{0,45 \cdot 10^{-3} \text{ V s}}{0,1 \text{ s}}$$

$$U = 3,6 \text{ V}$$

**Corrientes de Foucault<sup>1</sup>**

En el experimento 12-10 hemos observado que una variación del flujo magnético induce una tensión en una bobina, cuya causa es el desplazamiento de las cargas en el conductor. También en el núcleo de hierro se producen desplazamientos de las cargas, con lo que también en él se induce una tensión.

Esta tensión inducida da lugar a corrientes de cortocircuito debido a la pequeña resistencia eléctrica del núcleo.

<sup>1</sup> Jean-Bernard-Leon Foucault, físico francés, 1819-1868



Fig. 12.53. Gráfica de la tensión en una bobina.



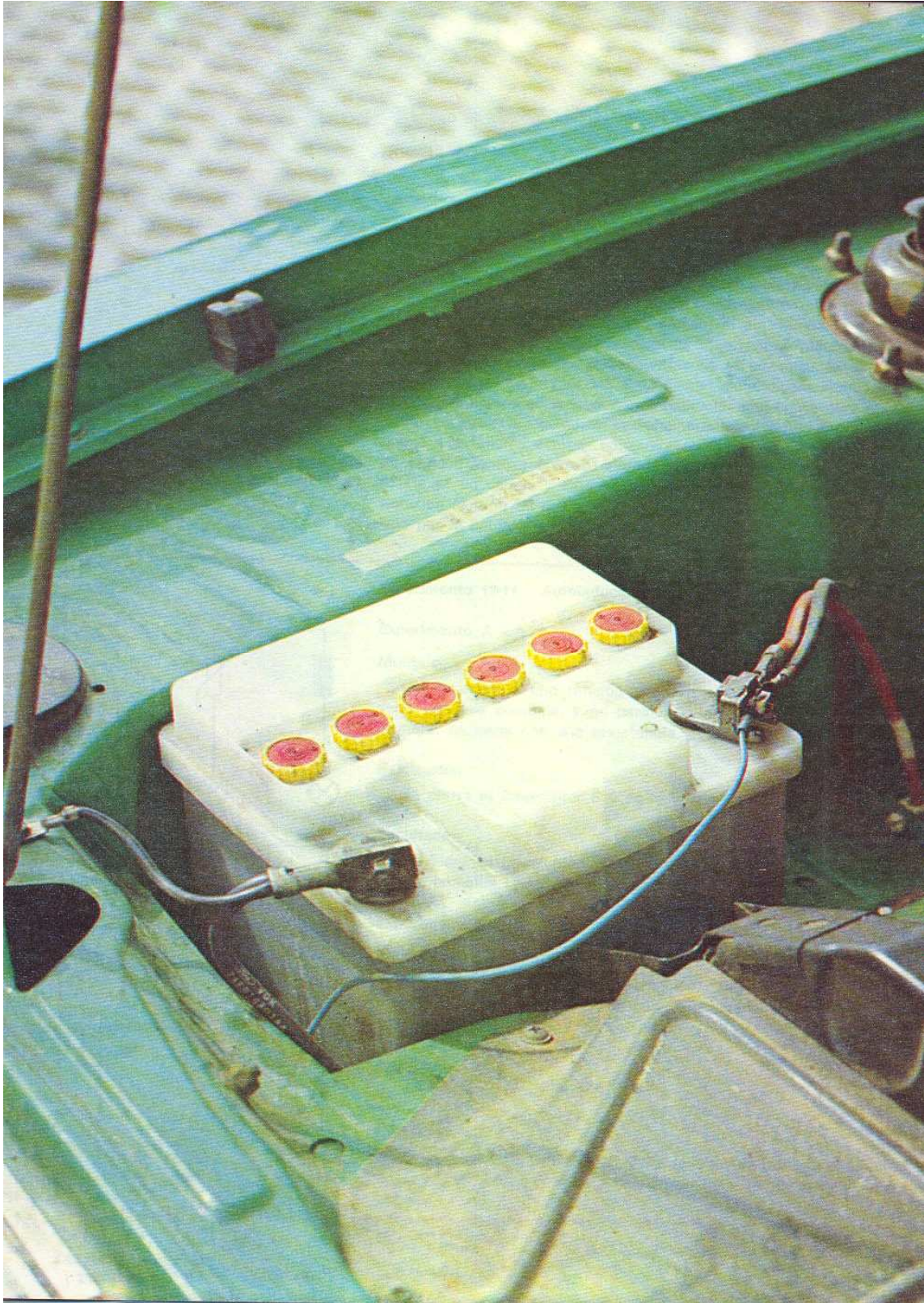
Fig. 12.54. Relación entre el flujo magnético y la tensión en una bobina.

**Ley de Faraday**

$$U = -N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$



Fig. 12.55. Corrientes de Foucault. Unidad Operativa SCISST - Abanca



Estos desplazamientos de cargas y corrientes no tienen trayectorias fijas sino que describen remolinos desordenados. Son las corrientes de Foucault (fig. 12.55).

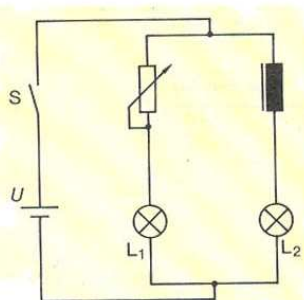
### 12.3.3. Autoinducción

Hemos visto que la aparición y desaparición de un campo magnético (variación de flujo) da lugar a una tensión inducida. La variación de flujo producido por la bobina primaria no sólo atraviesa la secundaria sino también a ella misma. Según la ley de Faraday también deberá aparecer en ella una tensión por inducción, la **tensión autoinducida**.

Los fenómenos que ocurren durante la conexión y desconexión de una bobina pueden explicarse teniendo en cuenta que en esos instantes debe generarse o anularse un campo magnético. Este campo magnético variable atraviesa las espiras de la bobina y genera una tensión. Este fenómeno se denomina **autoinducción**.

Al conectar la bobina, la tensión autoinducida tiene un sentido tal que se opone a la tensión exterior aplicada, con lo que se retarda la aparición del campo magnético. La corriente de máxima intensidad sólo puede circular cuando existe ya un campo y éste ya no varía. La tensión autoinducida al desconectar tiene un sentido tal que hace que la corriente siga circulando en el mismo sentido por la bobina.

#### Experimento 12-11: Autoinducción al conectar y desconectar una bobina



##### Experimento A

###### Montaje

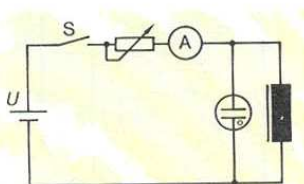
Se conectan a una tensión continua una bobina con núcleo de hierro en serie con una bombilla, y en paralelo a ellas una segunda bombilla, igual a la primera, en serie con una resistencia.

###### Realización

Se cierra el interruptor S y se le vuelve a abrir.

###### Resultado

Al cerrar el interruptor la bombilla  $L_1$  se enciende inmediatamente, mientras que la bombilla  $L_2$  se enciende más tarde.



##### Experimento B

###### Montaje

Se conecta a una fuente de tensión continua de  $U = 6 \text{ V}$  una bobina con núcleo de hierro, y en paralelo con la bobina una lámpara de efluvios de tensión de encendido 100 V.

###### Realización

Se cierra el interruptor S y se le vuelve a abrir.

###### Resultado

Al abrir el interruptor la lámpara de efluvios brilla brevemente. Por tanto, al desconectar debe existir una tensión de más de 100 V en los terminales de la bobina.



La tensión de autoinducción tiene siempre un sentido tal que se opone a la variación de la corriente.

Este hecho es una consecuencia más de la ley de Lenz.

**Ejercicios sobre 12.3**

1. ¿Bajo qué condiciones se induce una tensión en un conductor situado en un campo magnético?
2. ¿De qué depende el sentido de la tensión del ejercicio anterior?
3. ¿En qué sentido circulará la corriente en la figura 12.56?
4. ¿De qué depende el valor de la tensión inducida en conductores que se mueven en un campo magnético?
5. Un conductor se mueve con una velocidad de 0,5 m/s en un campo magnético de 0,75 T. La longitud efectiva del conductor es 10 cm.  
¿Cuánto vale la tensión inducida?
6. ¿Cuánto vale la tensión inducida en una bobina de 300 espiras cuando el flujo magnético varía en 0,5 s de 15 mVs a cero?

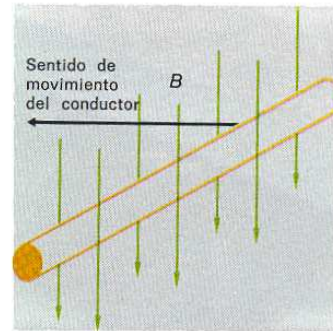
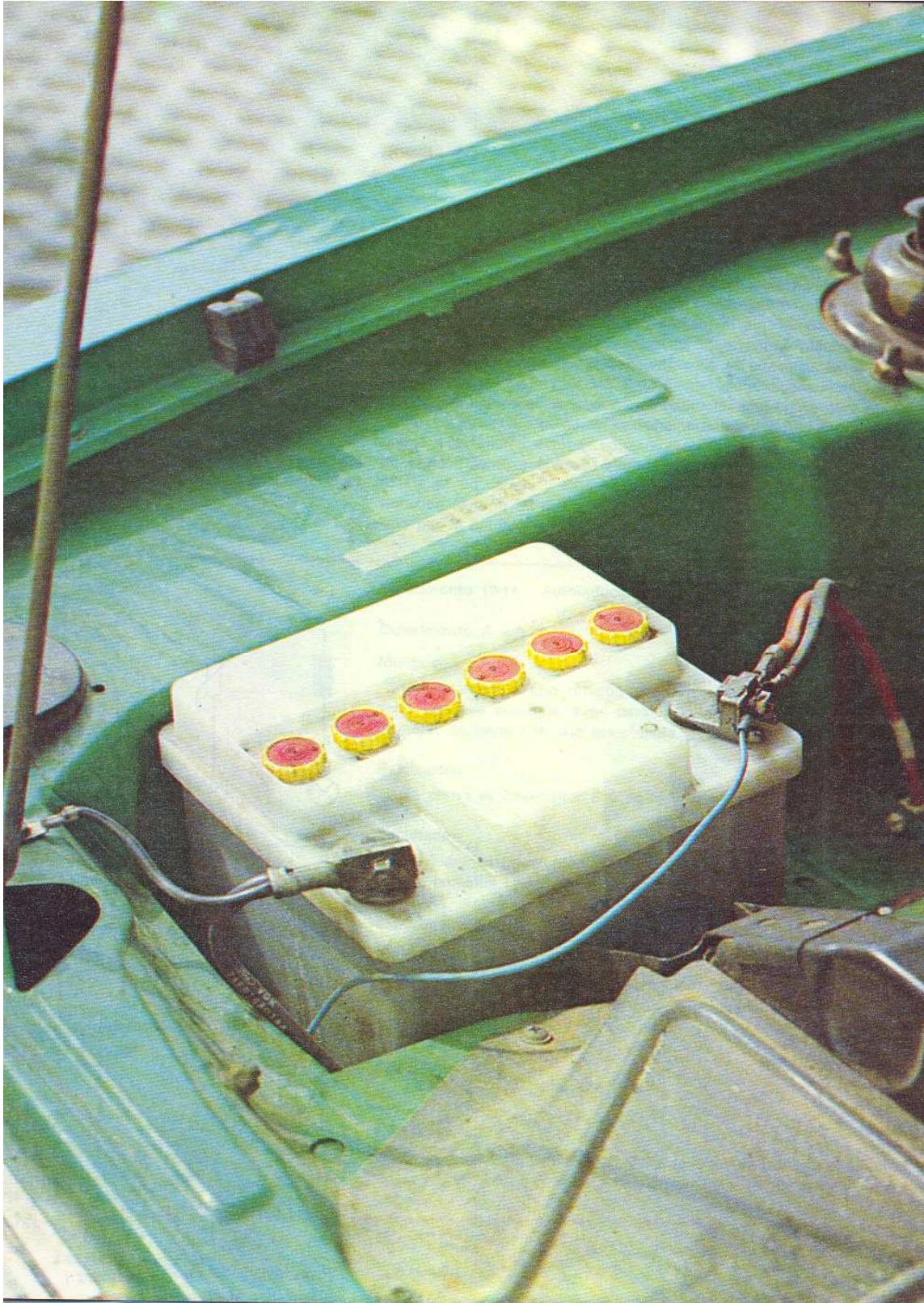


Fig. 12.56. Esquema correspondiente al ejercicio 3.



## 13. Electroquímica

La obtención de tensión en un acumulador, la electrólisis, la galvanización y la corrosión son fenómenos de gran importancia en la electrotecnia. Los electrones están presentes en todas las reacciones que ocurren, siendo intercambiados, absorbidos o cedidos. Sin unos conocimientos básicos de química y electricidad no podemos explicar estos fenómenos. Vamos a ocuparnos de todo ello en los próximos apartados.



Fig. 13.1. Corrosión debida a un líquido en un circuito electrónico.

### 13.1. Compuestos químicos

Además de los cuerpos simples o elementos existen muchísimos compuestos químicos (ver 1.2.2) de dichos elementos (fig. 13.2). Los compuestos, por ejemplo los ácidos, las bases y las sales, tienen propiedades muy diferentes que los elementos de los que se componen. Por ello es importante conocer las propiedades y los fenómenos que se producen al formarse los compuestos.

#### 13.1.1. Sistema periódico de los elementos

Todos los átomos de un determinado elemento tienen el mismo número de cargas positivas (protones) en el núcleo.

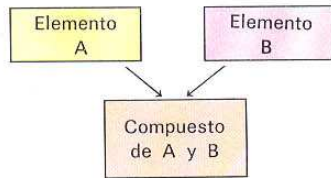
Ejemplos:

Aluminio: 13 protones; cobre: 29 protones; plata: 47 protones; plomo: 82 protones.



Fig. 13.2. Compuestos químicos: sulfato de cobre, ácido sulfúrico, cloruro amónico.

Unidad Operativa SENATI - Abancay



Todos los elementos pueden ordenarse según el número creciente de protones para formar el llamado **sistema periódico de los elementos**. El número de protones indica la posición del elemento en cuestión en el sistema periódico. El número de protones también se llama número atómico.

El número atómico indica el número de cargas positivas (protones) del núcleo.

Los elementos se han clasificado en grupos. Los elementos del mismo grupo se encuentran en la misma columna vertical en el sistema periódico; tienen propiedades químicas parecidas, que dependen únicamente del número de electrones de la capa exterior.

Los electrones de la capa exterior se llaman electrones de valencia.

		Grupos principales							
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
Períodos	1	1 H							2 He
	2	3 Li	4 Be	5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
	3	11 Na	12 Mg	13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar

Fig. 13.3. Detalle del sistema periódico con los electrones existentes en cada capa.



Fig. 13.4. Elementos en forma de polvo: magnesio, carbono y azufre.

La figura 13.3 nos muestra una parte del sistema periódico. Por ejemplo, en el primer grupo principal (columna de la izquierda) se encuentran sólo metales excepto el hidrógeno. En la capa exterior sólo tienen un electrón. En el séptimo grupo principal se encuentran elementos no metálicos, todos con 7 electrones en la capa exterior.

Los elementos del mismo grupo principal tienen el mismo número de electrones de valencia (excepto el helio) y propiedades químicas similares.

El sistema periódico completo se encuentra en la página 237, donde también se encuentran los materiales importantes para la electrotécnica, como por ejemplo hierro, cobre y oro.

### 13.1.2. Enlace covalente y enlace iónico

Existen algunos elementos cuyos átomos no se combinan en condiciones normales con otros átomos ni iguales ni diferentes, pues la capa exterior de electrones está totalmente ocupada. Debido a esta propiedad especial se les denomina gases nobles. En el sistema periódico se encuentran en el grupo VIII. Excepto el helio todos los demás tienen 8 electrones en su capa exterior. En el helio la capa exterior es la capa K, que queda completa con sólo 2 electrones.

Los demás elementos tienden a tener una capa exterior completa como los gases nobles. Para conseguirlo dan lugar a enlaces (uniones) con otros átomos. Como ya vimos en el apartado 1.2.2 los enlaces pueden formarlos átomos iguales o diferentes, dando lugar a moléculas.

Los elementos con la capa exterior incompleta tienden a formar compuestos químicos.

Existen tres tipos diferentes de enlaces:

enlace covalente - enlace iónico - enlace metálico

Existen además algunas formas de enlaces intermedios, pero no nos ocuparemos de ellos en este libro. Los párrafos siguientes se limitarán a tratar los enlaces atómicos e iónicos, pues el enlace metálico ya fue estudiado en el apartado 3.1.

Vamos a tomar como ejemplo el **enlace covalente** de dos átomos de oxígeno. El oxígeno tiene 6 electrones de valencia; por tanto, a su capa exterior le faltan aún 2 electrones para estar completa. Cuando dos átomos de oxígeno se aproximan uno a otro quedarán atraídos electrones del átomo vecino, con lo que se formará un compuesto de dos átomos iguales (molécula). En este caso existirán dos pares de electrones comunes a los dos átomos. El enlace covalente se forma entre elementos no metálicos (ver fig. 13.5).

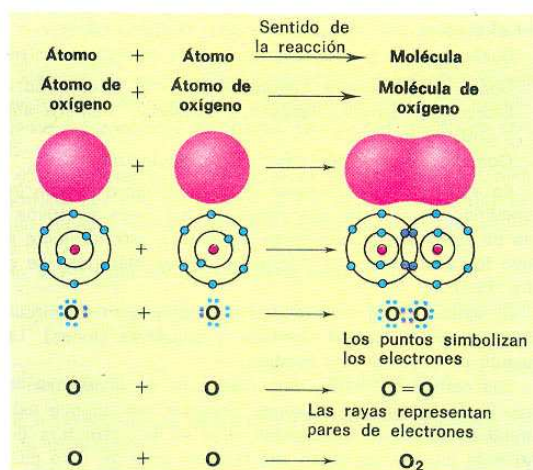


Fig. 13.5. Diferentes representaciones de la formación del enlace covalente del oxígeno.

En el enlace covalente los átomos se unen formando pares de electrones.

Los compuestos de elementos de los grupos I y VII forman **enlaces iónicos**. Un metal se combina con un no metal, cediendo el primero un electrón al segundo, con lo que ambos elementos obtendrán una capa exterior completa, resultando estables. Los dos átomos ya no serán eléctricamente neutros; el metálico será positivo (le falta un electrón) y el no metálico, negativo (se le ha añadido un electrón).

Los átomos cargados se denominan **iones**.<sup>1</sup> Existen iones positivos y negativos, que se forman por la falta o adición de electrones.

<sup>1</sup> Ion (griego) = caminante

Fig. 13.6. Diferentes representaciones de la formación del enlace iónico entre el sodio y el cloro.

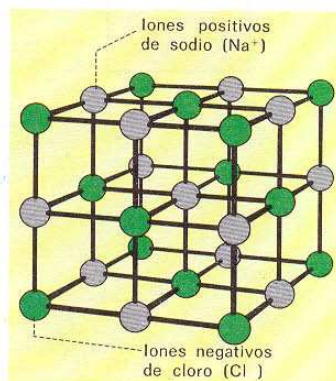
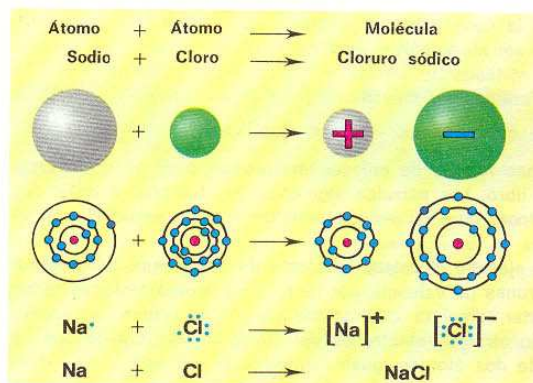


Fig. 13.7. Red cristalina del cloruro sódico.



Vamos a explicar la formación de iones tomando como ejemplo la formación del cloruro sódico (sal común) (fig. 13.6).

Sustancias de partida:

Sodio: Metal blando, número atómico 11, 1 electrón de valencia.

Cloro: Gas amarillo-verdoso y venenoso, número atómico 17, 7 electrones de valencia.

Compuesto: Cloruro sódico, sal de color blanco.

En estado sólido los iones de sodio y cloro forman una estructura cristalina, sucediéndose a distancias regulares los iones positivos de sodio y los negativos de cloro. El compuesto se manifiesta exteriormente como un cuerpo neutro, pues los efectos de las diferentes cargas eléctricas se compensan mutuamente (fig. 13.7).

Si aplicamos al cloruro sódico una tensión no circulará corriente alguna a pesar de existir cargas positivas y negativas (iones). La corriente sólo circula cuando el material está fundido.

Las causas de este comportamiento se encuentran en la estructura cristalina. En la figura 13.7 podemos observar que aunque existen cargas positivas y negativas éstas se encuentran fijas en la estructura del cristal, y no pueden moverse cuando se aplica una tensión exterior. Sólo cuando el material se funde, o sea en estado líquido, desaparecerán los enlaces debido al movimiento térmico (ver 7.1) y los iones podrán desplazarse hacia los electrodos.

Los materiales con enlaces iónicos son aislantes en estado sólido.

### 13.1.3. Oxidación y reducción

Originariamente la oxidación era la reacción de elementos con el oxígeno (oxigenación). La reducción era el proceso inverso, o sea la sustracción del oxígeno. Sin embargo, actualmente se emplean estas dos expresiones también para otras reacciones determinadas. Al final de este apartado explicaremos los conceptos de oxidación y reducción en sentido amplio.

Especial importancia poseen las oxidaciones de metales. La velocidad de la reacción depende del metal en cuestión y de la forma de acción del oxígeno. Así, por ejemplo, al alcanzar la temperatura de encendido el magnesio se combina espontáneamente con el oxígeno del aire desprendiendo gran cantidad de luz y calor (fig. 13.8).

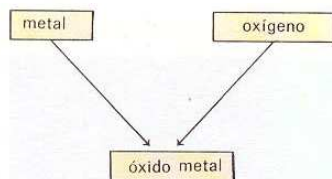


Fig. 13.8. Combustión (oxidación) del magnesio.

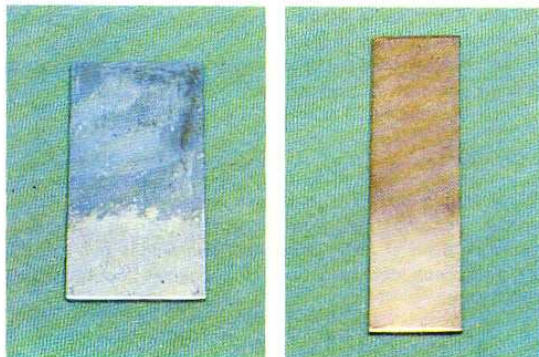


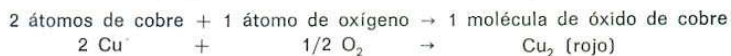
Fig. 13.9. Plomo y cobre oxidados.

Sin embargo, también a temperatura ambiente se combinan los metales con el oxígeno del aire formando óxidos a distintas velocidades. La superficie del metal se colorea y pierde el brillo metálico original. La figura 13.9 nos muestra plomo y cobre con superficies oxidadas y no oxidadas.

Como los óxidos de metales en estado sólido no poseen electrones libres (ver 3.1) recubrirán la superficie del metal con una capa aislante, con lo que empeoran considerablemente los contactos eléctricos. Los óxidos metálicos son no conductores.

En los interruptores y conectores es de especial importancia la existencia de un buen contacto eléctrico. Por ello se emplean a ser posible materiales no oxidables, por ejemplo aleaciones o revestimientos de metales nobles como plata, oro o platino (fig. 13.10).

Veamos como ejemplo la reacción del cobre con el oxígeno:



productos de partida

→

producto final

Los procesos químicos o reacciones se escriben en forma de ecuaciones. La flecha indica el sentido de la reacción.

Los átomos de cobre poseen en la capa exterior un electrón, que ceden al oxígeno en la reacción. Como el oxígeno precisa 2 electrones para completar totalmente su capa exterior, deberán reaccionar dos átomos de cobre con cada átomo de oxígeno.

En condiciones normales el oxígeno sólo se presenta en forma molecular ( $\text{O}_2$ ). Por ello escribimos en la ecuación de la reacción  $1/2 \text{ O}_2$  en lugar de 1 átomo de oxígeno.

De la misma manera se combinan también otros metales con el oxígeno. Todas estas reacciones tienen en común el hecho de que una de las sustancias cede electrones a la otra. De aquí se obtiene la definición general de oxidación y de reducción:

La cesión de electrones se llama oxidación.

La recepción de electrones se llama reducción.

Oxidación y reducción se presentan siempre juntas. En nuestro ejemplo se oxida el metal (que cede electrones) y se reduce el oxígeno (que los recibe).

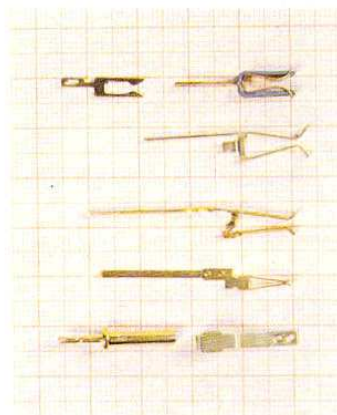


Fig. 13.10. Piezas doradas para conectores.



Fig. 13.11. Trapo atacado por el ácido sulfúrico.

#### Ácidos importantes

Nombre	Fórmula
Ácido sulfúrico	$H_2SO_4$
Ácido nítrico	$HNO_3$
Ácido clorhídrico	$HCl$

Por ello llamamos a estos procesos reacciones de reducción-oxidación, o simplemente reacciones redox.

Las reacciones redox no sólo se producen entre los metales y el oxígeno, sino también entre otras sustancias.

#### 13.1.4. Ácidos

Los ácidos no sólo se presentan en la técnica, sino también en nuestras comidas. Podemos reconocer los ácidos por su sabor en el zumo de limón, en el vinagre o en el ácido carbónico. Los ácidos que se utilizan en la técnica son muy peligrosos debido a su alta concentración; podemos reconocerlos por su olor picante.

##### Precaución al manejar ácidos.

El ácido clorhídrico se obtiene al diluir cloruro de hidrógeno gaseoso (HCl) en agua.

Los ácidos citados son peligrosos. Son venenosos y corrosivos. Las figuras 13.11 a 13.13 nos muestran algunas sustancias atacadas por los ácidos.



Fig. 13.12. Superficie de una chapa de acero atacada por el ácido clorhídrico.



Fig. 13.13. Madera atacada por ácido sulfúrico concentrado.

Las fórmulas químicas muestran que todos los ácidos contienen hidrógeno. El hidrógeno es la causa del efecto destructivo del ácido, pues está cargado positivamente al haber cedido un electrón al anión o radical del ácido, que queda cargado negativamente.

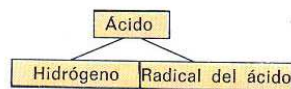


Fig. 13.14. Dilución del ácido sulfúrico concentrado.

Como el ácido sulfúrico es el que se emplea en los acumuladores de plomo vamos a estudiar con detenimiento sus propiedades.

El ácido sulfúrico concentrado es un líquido incoloro y oleaginoso, de densidad  $1,84 \text{ g/cm}^3$ . Ataca rápidamente sustancias como madera, algodón o azúcar, para lo cual les quita el agua, quedando carbono negro. Por este motivo el ácido sulfúrico no debe entrar en contacto con la piel o prendas de vestir (ver figura 13.11).

Cuando se diluye ácido sulfúrico en agua el líquido se calienta fuertemente. Por ello debe tenerse en cuenta lo siguiente al diluir ácido sulfúrico:

Al diluir ácido sulfúrico debe verterse el ácido en el agua y remover constantemente el líquido (fig. 13.14).



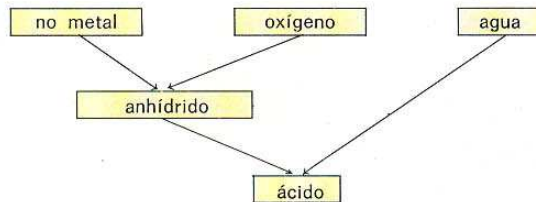
No verter nunca agua sobre un ácido.

Los ácidos se obtienen a partir de los elementos no metálicos.

13.1.5. Bases

Bases importantes

Nombre	Fórmula
Hidróxido sódico	NaOH
Hidróxido potásico	KOH
Hidróxido cálcico	Ca(OH) <sub>2</sub>



Las bases son también compuestos importantes. Ordinariamente las bases son sólidas (fig. 13.15).

Los ejemplos de la tabla nos muestran que las bases se componen de un metal y además uno o varios grupos hidroxilos (OH). El metal ha cedido los electrones de su capa exterior quedando cargado positivamente.



El ion hidroxilo ha tomado los electrones del metal, quedando cargado negativamente. Los metales forman bases. Si las bases se disuelven en agua a la disolución se le denomina lejía.

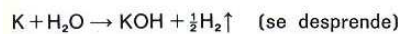
Las lejías son bases disueltas en agua.

Con las bases y lejías debe también trabajarse cuidadosamente, pues también son venenosas y corrosivas (fig. 13.16).

En electrotecnia se utilizan lejías, por ejemplo, en los acumuladores (acumuladores de níquel).

Las bases se obtienen cuando el agua actúa sobre metales. En algunos casos (por ejemplo Na, K, Ca) la reacción es muy fuerte.

Ejemplo:



En esta reacción se descompone el agua, y se obtienen hidróxido potásico e hidrógeno.

13.1.6. Sales

Además de la sal común (cloruro sódico) existe toda una serie de compuestos denominados sales. Se componen de un ion metálico y del ion radical del ácido.

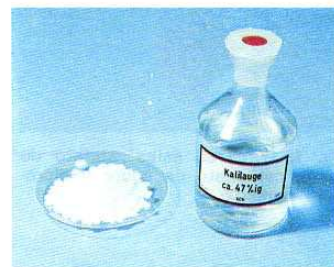
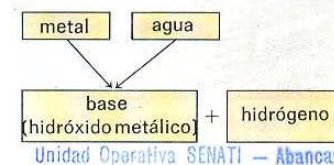


Fig. 13.15. Base (hidróxido potásico) y lejía (potásica).



Fig. 13.16. Cobre atacado por lejía (potásica).



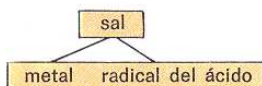


Fig. 13.17. Tres sales: sulfato de cobre, carbonato de cobre y dicromato potásico.

#### Ejemplos:

NaCl, cloruro sódico, sal del ácido clorhídrico  
 $\text{CuSO}_4$ , sulfato cúprico, sal del ácido sulfúrico  
 $\text{KNO}_3$ , nitrato potásico, sal del ácido nítrico

Las sales pueden obtenerse mediante diversas reacciones.

#### Ejercicios sobre 13.1

1. ¿Qué sustancia contienen siempre los compuestos llamados óxidos metálicos?
2. ¿Cuál de los componentes de un óxido metálico cede sus electrones?
3. ¿Qué dificultades provocan los óxidos metálicos en los interruptores?
4. Citar algunos metales que no formen compuestos con el oxígeno en condiciones normales.
5. Escribir la ecuación de la reacción del aluminio con el oxígeno.
6. ¿Qué ocurre desde el punto de vista electroquímico con los electrones de valencia en la oxidación y en la reducción?
7. Nombrar tres ácidos importantes.
8. ¿Cuáles son los componentes de un ácido?
9. ¿Qué debe tenerse en cuenta al mezclar ácido sulfúrico concentrado y agua?
10. ¿Con cuál de las siguientes sustancias y agua se puede obtener un ácido? Potasio, oxígeno, anhídrido sulfuroso, hierro, cloruro de hidrógeno.
11. ¿Cuáles son los componentes de una base?
12. Explicar la diferencia entre una base y un ácido.
13. Escribir la ecuación de la reacción del sodio con el agua.
14. Nombrar tres sales.
15. ¿Cuáles son los componentes de las sales?

### 13.2. Conducción de la corriente en líquidos

La corriente eléctrica no sólo puede circular por conductores metálicos, sino también por determinados líquidos. La transformación que se produce entonces en el líquido puede utilizarse de muy diversas maneras. La figura 13.18 nos muestra una instalación de galvanizado. A continuación vamos a estudiar los fenómenos que se producen en este caso y también lo que sucede en general cuando los líquidos conducen la corriente eléctrica.

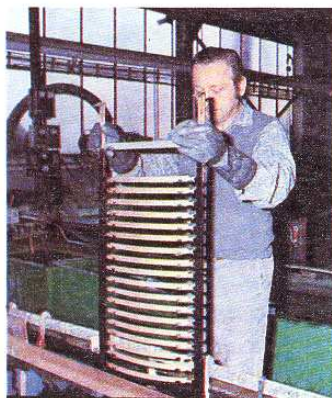


Fig. 13.18. Instalación de galvanizado.

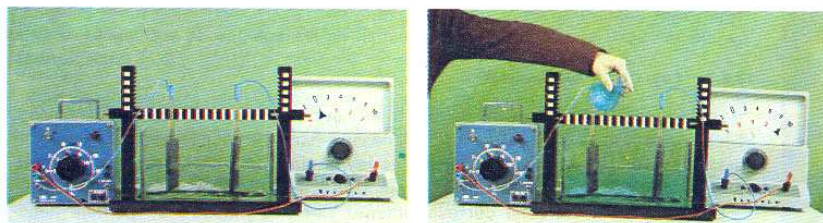
#### 13.2.1. Conductividad de líquidos

El agua químicamente pura es un líquido que no contiene ningún tipo de sustancias extrañas. Es muy mala conductora de la corriente eléctrica. Sin embargo, el agua corriente no es químicamente pura. Según la región de la que se obtenga contendrá cantidades diversas de sales y otras sustancias.

También todas las demás sales, ácidos y lejías aumentan la conductividad del agua. Estas sustancias dan lugar a iones positivos y negativos en el agua, iones que la tensión aplicada pone en movimiento, con lo que circulará una corriente eléctrica.

Por un líquido sólo circulará una corriente eléctrica cuando en él existan iones.

Los líquidos que conducen la corriente eléctrica se llaman electrólitos.

**Experimento 13-1: Conductividad de agua salada****Montaje****Realización**

En el agua se vierte una solución de sulfato de cobre.

**Resultado**

La solución salina vertida aumenta la intensidad de la corriente. La conductividad aumenta al aumentar la cantidad de sal disuelta.

**13.2.2. Electrólisis**

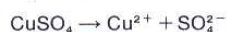
El experimento 13-1 nos ha mostrado que al aplicar una tensión a una solución salina circula una corriente. Vamos a investigar detenidamente este fenómeno.

Cualquier solución de iones se compone de iones positivos e iones negativos rodeados por una determinada cantidad de moléculas de agua. La solución está hidratada (combinada con el agua).

La división de una sustancia en sus iones se denomina disociación.

La disociación en iones se puede indicar mediante ecuaciones, en las que los iones se caracterizan con sus cargas.

Ejemplo:



El sulfato de cobre en disolución acuosa se disocia en iones positivos de cobre e iones negativos del radical del ácido (fig. 13.19).

Cuando se aplica una tensión a una disolución de iones éstos se desplazan hacia los electrodos cargados con signo opuesto debido a las fuerzas de atracción y repulsión. Los iones quedan allí neutralizados por la cesión o recepción de electrones (fig. 13.20).

Los iones positivos van hacia el electrodo negativo

cationes  $\oplus \rightarrow$  cátodo  $-$

Los iones negativos van hacia el electrodo positivo

aniones  $\ominus \rightarrow$  ánodo  $+$

Cuando se aplica una tensión en los líquidos se desplazan tanto portadores de carga negativos como positivos, mientras que en las sustancias sólidas (por ejemplo, metales) sólo circulan electrones.

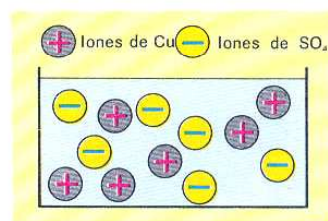


Fig. 13.19. Sulfato de cobre disuelto en agua (sin moléculas de agua).

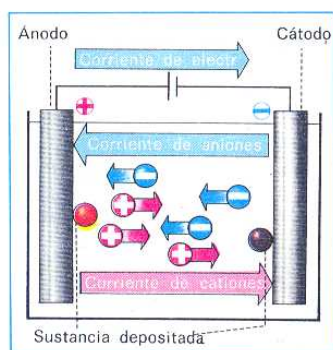


Fig. 13.20. Desplazamiento de los iones en un líquido.

Unidad Operativa SEVATI - Abancay

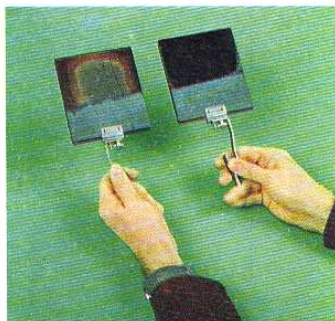


Fig. 13.21. Cobre depositado sobre el cátodo.

El desplazamiento de los iones descompone el líquido en las sustancias de partida, que se depositan sobre los electrodos (fig. 13.21).

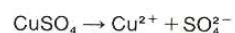
La descomposición de un líquido debida a la corriente eléctrica se denomina electrólisis.

### 13.2.3. Ley de la electrólisis

En la electrólisis del ácido sulfúrico diluido se obtienen sustancias gaseosas. Si los electrolitos son disoluciones salinas es también posible que se depositen sustancias sólidas. Vamos a explicar las leyes que rigen estos procesos tomando como ejemplo la descomposición electrolítica del sulfato de cobre.

La figura de la derecha del experimento 13-1 nos muestra el montaje necesario para el experimento. Utilizaremos como electrodos dos placas de carbón para que las placas no se descompongan.

#### Disociación del sulfato cúprico



#### Depósito en el cátodo



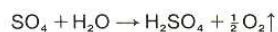
En el cátodo se deposita cobre.

Los iones metálicos van al cátodo.

#### Depósito en el ánodo



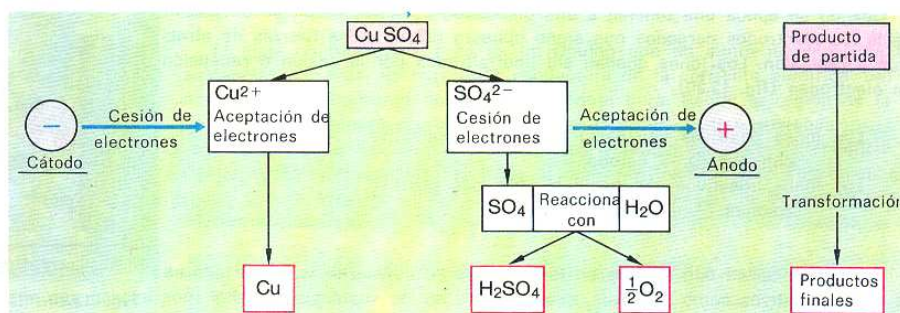
Reacción con el agua:



El ánodo cede electrones, con lo que se forman ácido sulfúrico y agua.

Los iones se componen de los protones y neutrones de los núcleos y de los electrones ligados. Por tanto, todo ion tiene una determinada carga y también una determinada masa. Cuando aumenta la cantidad de carga transportada aumentará el número de iones desplazados y, por consiguiente, también la masa. La carga es proporcional a la masa.

Fig. 13.22. Desarrollo de la descomposición electrolítica del sulfato de cobre.



$m \sim Q$  Y como  $Q = I \cdot t$  (ver 1.5.2) tenemos  
 $m \sim I \cdot t$

Además la cantidad depositada depende de cada sustancia. Esta magnitud se denomina **equivalente electroquímico** y se añade en la fórmula como una constante  $c$ . La ley que obtenemos así se llama ley de Faraday de la descomposición electrolítica.

La masa que se deposita por electrólisis depende del tipo de sustancia, de la intensidad de la corriente y del tiempo durante el cual circula.

El equivalente electroquímico indica la masa de una sustancia que se deposita cuando circula durante 1 segundo una corriente de 1 A.

Por ejemplo, en una disolución de nitrato de plata ( $\text{AgNO}_3$ ) cuando circule una corriente de 1 A durante 1 segundo se depositarán 1,118 mg de plata (antigua definición del amperre).

Tabla 13.1. Equivalentes electroquímicos de algunos metales

Metal	Electrones por átomo	c en $\frac{\text{mg}}{\text{A s}}$	c en $\frac{\text{g}}{\text{A h}}$
Plata	1	1,118	4,025
Plomo	2	1,074	3,866
Oro	3	0,681	2,451
Zinc	2	0,339	1,220
Cobre	1	0,659	2,372
Cobre	2	0,329	1,186
Hierro	2	0,289	1,040

**Ejemplo:** Se emplea una disolución de nitrato de plata ( $\text{AgNO}_3$ ) para platar una placa de cobre. ¿Cuál será la masa que se deposita cuando circula una corriente de 1,6 A de intensidad durante 30 minutos?

$$m = c \cdot I \cdot t$$

$$m = \frac{4,025 \text{ g} \cdot 1,6 \text{ A} \cdot 0,5 \text{ h}}{\text{A h}}$$

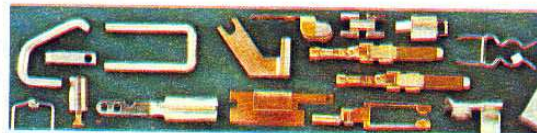
$$m = 3,22 \text{ g}$$

13.2.4. Aplicaciones técnicas de la electrólisis

13.2.4.1. Galvanostegia

Se denomina galvanostegia al revestimiento (electrolítico) de superficies metálicas mediante recubrimientos metálicos.

De especial importancia técnica son, por ejemplo, los revestimientos de zinc, cobre, níquel, plata, oro y cromo. Los electrolitos empleados son sales solubles en agua de los correspondientes metales.



Ley de Faraday de la descomposición electrolítica

$$m = c \cdot I \cdot t$$

Equivalente electroquímico

Símbolo  $c$

$$c = \frac{m}{I \cdot t}$$

$$[c] = \frac{\text{kg}}{\text{A s}}$$

$$[c] = \frac{\text{mg}}{\text{A s}}$$

$$[c] = \frac{\text{g}}{\text{A h}}$$

Fig. 13.23. Piezas con superficies mejoradas por electrólisis.



Fig. 13.24. Tornillos de conexión y conectores plateados.

Con este procedimiento pueden recubrirse con una capa superficial diferente no sólo sustancia eléctricamente conductoras, sino también materiales no conductores, por ejemplo, plásticos (galvanoplastia). Sin embargo, estos últimos materiales deben hacerse conductores en su superficie para que puedan ceder electrones. Apropiados para ellos son esmaltes conductores, grafito o vapores metálicos.

El objeto a galvanizar se conecta como cátodo.

#### 13.2.4.2. Oxidación anódica del aluminio

Este procedimiento consiste en la oxidación electrolítica del aluminio, y también se le da el nombre de anodización.

Consiste en obtener una capa superficial que protege el aluminio (por ejemplo en las antenas) contra la intemperie.

El aluminio se conecta como ánodo. Los electrólitos pueden ser ácido sulfúrico, ácido oxálico, ácido crómico o mezclas de ellos. La capa que se deposita

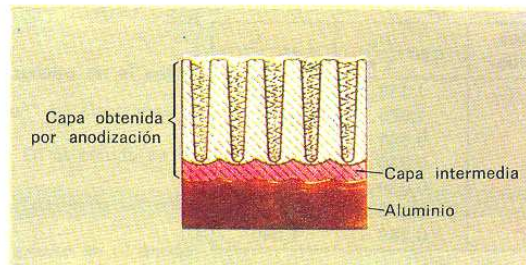


Fig. 13.25. Sección de la capa de oxidación anódica del aluminio.

sobre la superficie es dura, muy resistente a la corrosión y no conductora de la electricidad. Según el procedimiento empleado puede componerse de varias capas y estar coloreada (fig. 13.25). Su espesor vale entre 10  $\mu\text{m}$  y 20  $\mu\text{m}$ .

El procedimiento de la anodización no sólo se utiliza con el aluminio, sino también para proteger las superficies de otros metales.

En la oxidación anódica el objeto a revestir se conecta como ánodo.

#### 13.2.4.3. Obtención de metales

En la naturaleza la mayoría de los metales no se encuentran en forma pura, sino combinados con el oxígeno y con otros no metales (por ejemplo azufre). Para poder obtener el metal puro se debe suprimir el no metal. Esto puede conseguirse mediante la corriente eléctrica, que suministrará electrones a los iones metálicos.

Este procedimiento se emplea para la obtención de **cobre electrolítico** y en la electrólisis de metales fundidos.

La electrólisis de metales fundidos se emplea sobre todo para la obtención de aluminio, magnesio, sodio, potasio y calcio. Vamos a explicarla tomando como ejemplo la obtención de aluminio.

La mezcla fundida de compuestos de aluminio se encuentra en un crisol plano recubierto de carbono. Este crisol constituye el cátodo, mientras que los ánodos son barras de grafito. Debido a la circulación de la corriente se deposita en el fondo del crisol aluminio puro (fig. 13.26).

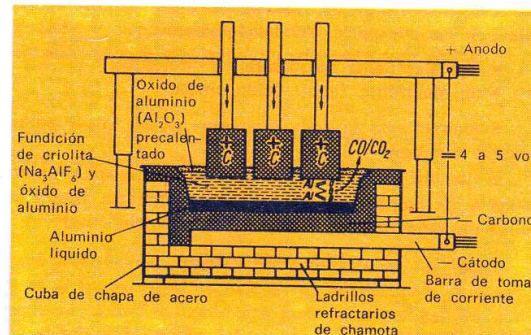


Fig. 13.26. Esquema de una celda electrolítica para la obtención de aluminio.

En las aplicaciones prácticas se emplean corrientes de gran intensidad (hasta 140 kA) a tensiones de aproximadamente 6 V. Es muy importante que la fundición sea lo más pura posible, pues si no también se depositarían otros metales.

#### Ejercicios sobre 13.2

1. ¿Con qué compuestos puede aumentarse la conductividad del agua?
2. ¿Cuál es el nombre general de los líquidos que conducen la corriente eléctrica?
3. Describir la disociación de una sal en agua.
4. Por una disolución de iones se hace circular una corriente. ¿A dónde se dirigen los cationes y a dónde los aniones?
5. ¿Qué ocurre en la electrólisis con los iones que llegan a los electrodos?
6. ¿En qué electrodo se depositan los átomos metálicos?
7. ¿De qué magnitudes depende la cantidad de materia que se deposita en la electrólisis?
8. ¿Qué intensidad de corriente debe circular por una disolución de cloruro de zinc para que en 2 horas se depositen 6 g de zinc?
9. Nombrar algunas aplicaciones técnicas de la electrólisis.
10. Debe realizarse una oxidación anódica de aluminio. ¿Qué electrodo será el objeto?
11. ¿Qué ventajas presentan los metales anodizados?

### 13.3. Generación electroquímica de la tensión

En muchos aparatos de uso diario se utilizan pilas galvánicas, también llamadas electrolíticas, como fuentes de tensión (fig. 13.27).

Las pilas son convertidores de energía en los que se genera una tensión por procedimientos químicos. Vamos a explicar en este apartado los procesos que se desarrollan y las posibles aplicaciones técnicas.

#### 13.3.1. Estructura y clasificación de las pilas galvánicas

La figura 13.28 nos muestra una fuente de tensión muy peculiar. Hemos introducido dos metales diferentes (tenedor de plata y cuchillo de acero) en un limón y los hemos conectado a un voltímetro, que mide una tensión de 0,136 V.



Fig. 13.27. Acumuladores de una carretilla elevadora de horquilla.

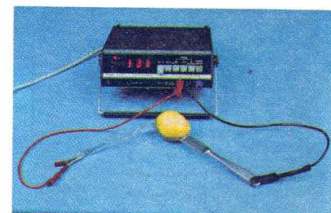


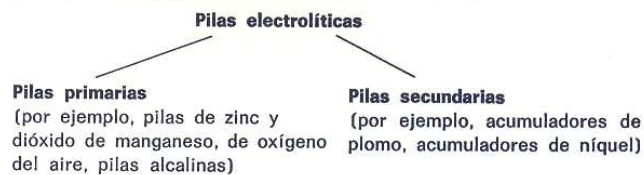
Fig. 13.28. Fuente de tensión con un limón («pila limonera»).

Este montaje es en realidad ya una pila galvánica o electrolítica, pues contiene todas sus partes fundamentales:

- dos electrodos de materiales diferentes
- un electrólito (aquí: ácido cítrico).

Evidentemente la «pila limonera» no es una fuente de tensión para aplicaciones técnicas.

El nombre genérico de «pila galvánica» o «pila electrolítica» es el que se aplica a las fuentes de tensión electroquímicas, que a su vez se clasifican en pilas primarias y pilas secundarias (acumuladores).



Los procesos electroquímicos que se desarrollan en las pilas primarias son irreversibles. Las pilas no pueden volverse a utilizar una vez descargadas, pues no pueden cargarse de nuevo.

En las pilas secundarias (acumuladores) es posible invertir el sentido de los procesos electroquímicos. Esto se consigue suministrando energía eléctrica. Por tanto, los acumuladores pueden almacenar energía eléctrica en forma de energía química, y volverla a suministrar cuando se necesite (fig. 13.31).

En las fuentes de tensión se suelen conectar varias pilas para formar una batería, con lo que se aumenta la potencia.

En los apartados 8.2 y 8.3 hemos visto las diferentes posibilidades de conectar fuentes de tensión.

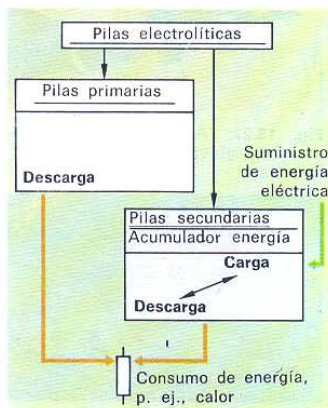


Fig. 13.29. Pilas primarias.

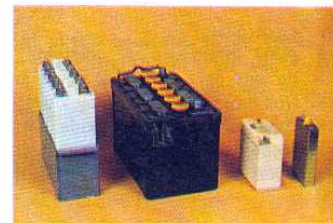


Fig. 13.30. Pilas secundarias (acumuladores).

### 13.3.2. Serie de potenciales de electrodo

Las relaciones existentes en la «pila limonera» de la figura 13.28 son bastante complicadas; además de ser poco corriente esta pila es poco eficaz. Por ello explicaremos los fenómenos de una fuente de tensión técnica.

Estudiemos primero lo que sucede cuando sumergimos un único electrodo en un electrólito. Para ello sumergiremos una placa brillante de hierro hasta la mitad en una disolución de sulfato cúprico (fig. 13.32).

Sobre la superficie sumergida se ha depositado una capa de color marrón rojizo. Esto ocurre con relativa rapidez, por lo que no puede tratarse de ningún proceso de oxidación. El material depositado es cobre.

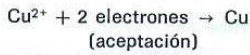


Este fenómeno, como todos los demás procesos electroquímicos, puede explicarse mediante la disociación y el paso de electrones.

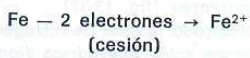
El sulfato cúprico en solución acuosa se disocia en sus iones (ver 13.2.2).



El material que se deposita no se compone de iones, sino de átomos de cobre. Por tanto, los iones de cobre han tomado electrones.



Como los iones de cobre son positivos, la placa de hierro ha de ser negativa, hecho que se conseguirá si el hierro cede portadores de carga positiva, o sea iones de hierro, con lo que el electrodo contendrá más cargas negativas que positivas.



Por tanto obtenemos la siguiente ecuación total:



La causa de estos cambios son diferencias de cargas (tensiones). Los iones de cobre se convierten en cobre y el hierro en iones de hierro. Por tanto los metales tienden a convertirse en iones en una disolución. Simultáneamente los iones del líquido se desplazan a los electrodos, donde toman electrones y se depositan en forma de átomos.

La tendencia de los metales a disolverse se llama **presión de disolución**.  
La tendencia de los iones de una disolución a depositarse se llama **presión osmótica**.

En general la presión de disolución y la presión osmótica no son iguales. Por ello se produce una diferencia de cargas y con ella una tensión típica para cada metal, tensión existente entre el electrodo metálico y el líquido.

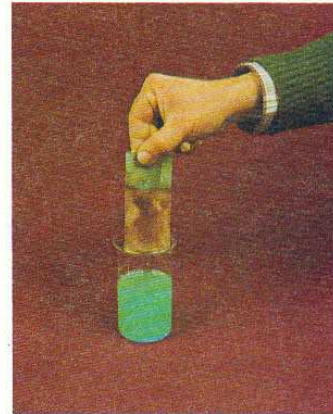


Fig. 13.32. Chapa de hierro sumergida en una solución de sulfato de cobre.

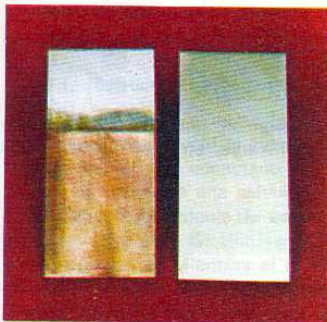


Fig. 13.33. Transformaciones en la chapa de hierro (comparación).

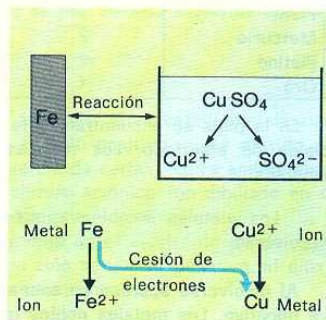


Fig. 13.34. Reacción entre los iones de cobre y los de hierro.

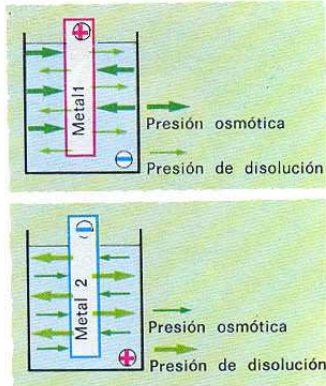


Fig. 13.35.

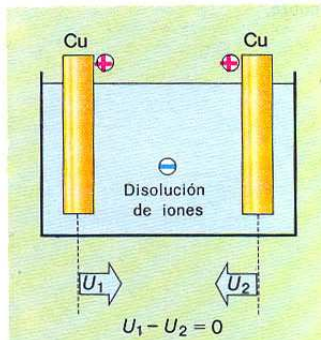


Fig. 13.36. Anulación de la tensión entre dos electrodos iguales.

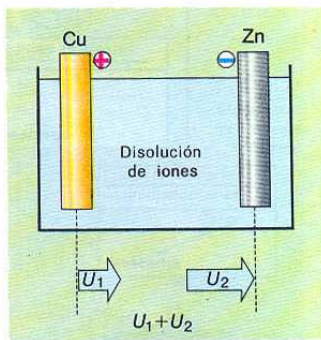


Fig. 13.37. Adición de las tensiones entre dos electrodos diferentes.

Podemos generalizar el fenómeno descrito al caso de que en la disolución se encuentren ya iones del metal sumergido. Debemos distinguir los siguientes casos:

• **Presión de disolución menor que la presión osmótica**

El electrodo metálico se vuelve positivo y el líquido negativo, pues son más los iones positivos que entran en la disolución.

• **Presión de disolución mayor que la presión osmótica**

El electrodo metálico se vuelve negativo y el líquido positivo, pues son más los iones positivos que entran en la disolución.

Si conectamos un voltímetro a dos placas del mismo material que se encuentren sumergidas en un electrolito no mediremos tensión, pues las dos tensiones respecto al electrolito son iguales y de sentido opuesto (fig. 13.36). Sólo obtendremos una tensión cuando los electrodos sean diferentes (fig. 13.37).

Como electrodo de referencia se determinó el electrodo normal de nitrógeno, que se compone de una placa de platino sumergido en ácido clorhídrico (iones de hidrógeno) de una determinada concentración y bañada en hidrógeno gaseoso. Todas las tensiones indicadas en la serie de tensiones electroquímicas o serie de potenciales de electrodo están referidas al electrodo normal de hidrógeno (tabla 13.2).

Tabla 13.2: Serie de potenciales de electrodo en condiciones normales ( $T = 20^\circ\text{C}$ ;  $p = 98\,066,5\text{ Pa}$ )

Material del electrodo	Electrones por átomo	$U$ en V	
Potasio	1	-2,92	Metales innobles
Sodio	1	-2,71	
Magnesio	2	-2,37	
Aluminio	3	-1,66	
Zinc	2	-0,76	
Hierro	2	-0,44	
Níquel	2	-0,25	
Estaño	2	-0,14	
Plomo	2	-0,13	
Hidrógeno	1	0,00	
Cobre	2	+0,34	Metales nobles
Plata	1	+0,80	
Mercurio	2	+0,85	
Platino	2	+1,20	
Oro	1	+1,68	

En la tabla se encuentran junto al hidrógeno algunos metales con sus potenciales de electrodo. Los metales pueden clasificarse en metales nobles e innobles.

Los metales innobles tienden a ceder iones al electrolito, o sea a disolverse.

Al disolverse aparece un exceso de electrones en el electrodo, que se vuelve negativo. Los metales nobles muestran un comportamiento opuesto.

Los metales nobles tienden a ceder electrones, o sea, a no disolverse.

Con ayuda de la serie de potenciales de electrodo puede calcularse la tensión que proporcionará una determinada pila. La tensión de la pila será la diferencia entre las tensiones de los dos metales en cuestión.

**Ejemplo:**

Pila de cobre y zinc  
 Cobre + 0,34 V  
 Zinc - 0,76 V  
 tensión total:  $U = 1,1 \text{ V}$   
 Polo positivo: electrodo de cobre  
 Polo negativo: electrodo de zinc

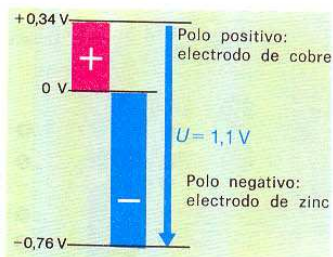


Fig. 13.38. Tensión de la pila de cobre y zinc.

**Ejercicios sobre 13.3**

1. Citar las partes de que se compone necesariamente una pila electrolítica.
2. Indicar la diferencia entre una pila primaria y una secundaria.
3. Explicar la diferencia entre una pila y una batería.
4. ¿Qué transformación sufren los iones de cobre cuando se depositan sobre el cátodo de una fuente de tensión?
5. Explicar la diferencia entre presión de disolución y presión osmótica.
6. ¿Por qué no se mide tensión alguna entre dos electrodos del mismo material sumergidos en un electrolito?
7. ¿Cuánto vale la tensión de una pila de níquel y cobre?
8. ¿En qué se diferencian los metales nobles de los innobles respecto a su tendencia a disolverse dando lugar a iones?

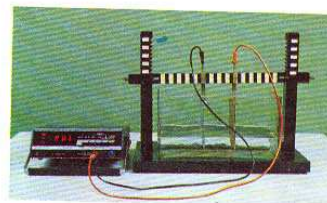


Fig. 13.39. Medida de la tensión de una pila de cobre y zinc (voltímetro digital).

**13.4. Pilas primarias****13.4.1. Pilas de zinc y dióxido de manganeso**

Una gran cantidad de las pilas electrolíticas que usamos en nuestra vida diaria tienen electrodos de zinc y dióxido de manganeso, carbono como electrodo de contacto y un electrolito de cloruro amónico. Todas estas pilas se diferencian simplemente en su aspecto exterior y por el número de pilas conectadas en serie. Estas pilas se denominan pilas de zinc y dióxido de manganeso, pilas de zinc y carbón, pilas secas (electrolito espeso) o pilas Leclanché<sup>1</sup> en honor de su inventor. Nosotros emplearemos el nombre de pila de zinc y dióxido de manganeso por ser éstos los electrodos.

**13.4.1.1. Estructura y funcionamiento**

La figura 13.40a muestra la estructura de una pila. El revestimiento de zinc es el polo negativo de la fuente de tensión. El polo positivo es de dióxido de manganeso ( $\text{MnO}_2$ ) conectado mediante una varilla de carbón. Entre ambos electrodos se encuentra una solución espesa de cloruro amónico (no dibujado en el esquema) que impregna sustancias absorbentes, por ejemplo almidón.

El revestimiento de zinc se disuelve lentamente en el electrolito dando lugar a iones positivos. Mientras el revestimiento de zinc se vuelve negativo, el dióxido de manganeso se hará positivo, pues cede electrones.

<sup>1</sup> Georges Leclanché, inventor francés, 1839-1882.

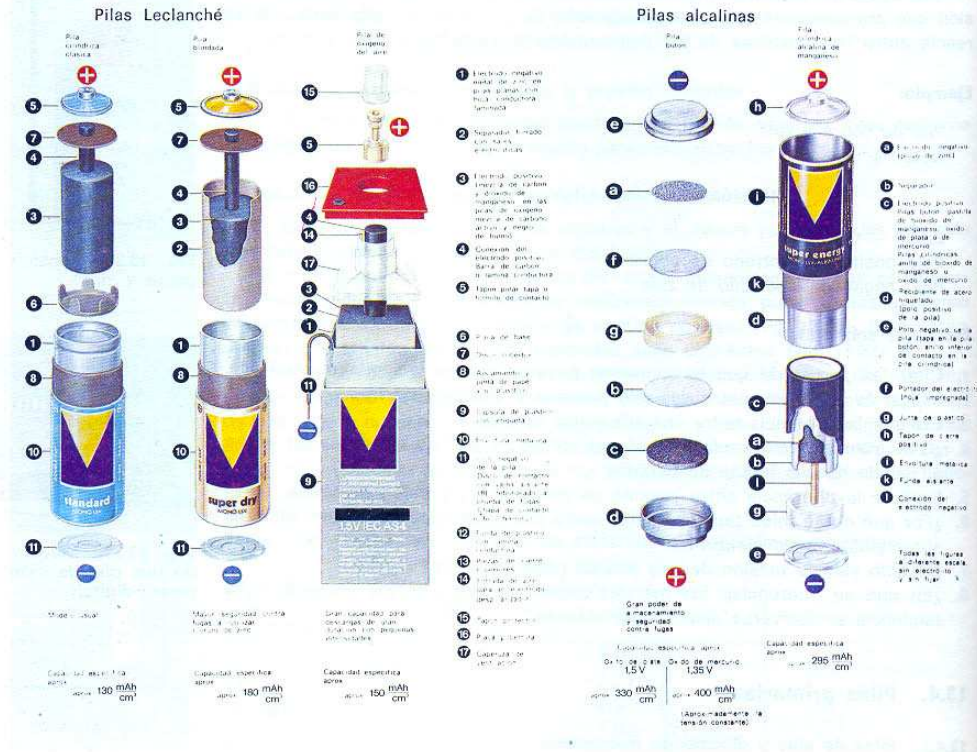


Fig. 13.40. Estructura de algunas pilas primarias.

Al cerrar el circuito eléctrico exterior los electrones del recipiente de zinc pasan al electrólito a través del electrodo positivo, con lo que circulará una corriente.

El proceso que acabamos de describir lo explicaremos con las siguientes reacciones electroquímicas, que trataremos simplifcadamente. Descompondremos el proceso en diferentes partes.

**1. Situación de partida**

El cloruro amónico está disociado en sus iones.



**2. Reacción en el cátodo (polo negativo)**

Los iones de zinc dejan electrones al disolverse, con lo que el recipiente de zinc se vuelve negativo.



**3. Reacciones en el ánodo (polo positivo)**

El ion amónico  $\text{NH}_4^+$  se descompone en amoníaco neutro  $\text{NH}_3$  y un ion de hidrógeno  $\text{H}^+$ .



El electrodo de dióxido de manganeso cede electrones para neutralizar el ion de hidrógeno. El electrodo se vuelve positivo.

El hidrógeno gaseoso se depositará alrededor del electrodo y lo aislará. Este fenómeno se llama polarización. Sin embargo, el dióxido de manganeso lo impide al reaccionar con el hidrógeno y formar  $\text{MnOOH}$ .

El dióxido de manganeso sirve de despolarizador.



El dióxido de manganeso se carga positivamente, por lo que también puede ordenarse en la serie de potenciales de electrodo. Su lugar se encontraría entre el cobre y la plata.

**4. Reacción total**



Con esta reacción se obtiene una separación de cargas mediante procedimientos químicos. Si unimos los electrodos con un conductor obtendremos una compensación de las cargas. Para ello los iones de zinc entrarán permanentemente en el electrolito, con lo que el electrodo se descompondrá y el dióxido de manganeso también se transformará.

En algunas pilas se emplea también un electrolito de cloruro de zinc. Estas pilas tienen la ventaja de que la reacción retiene una gran cantidad de agua, con lo que se reduce el peligro de fuga del líquido electrolítico.

**13.4.1.2. Propiedades y aplicaciones**

Para poder trabajar adecuadamente con pilas electrolíticas es importante conocer los valores de una serie de tensiones.

La **tensión en circuito abierto (f.e.m.)** es la tensión que existe entre los electrodos cuando no se conecta ninguna carga. En las pilas de zinc y dióxido de manganeso su valor se encuentra entre 1,35 V y 1,72 V.

La **tensión de trabajo** es la tensión que aparece cuando se conecta una carga. Puede encontrarse entre 1,2 V y 1,5 V y decrece al aumentar la carga (ver 8.1).

La **tensión nominal** es un valor en números redondos, que se define como 1,5 V por pila. Se considera entonces que una pila está descargada cuando su tensión de trabajo vale la mitad de la tensión nominal.

La **tensión en los terminales** de una pila no es constante, pues decrece al aumentar el tiempo de descarga. La figura 13.42 nos muestra la curva de descarga de una pila de 1,5 V, que se utiliza preferentemente en linternas.

Una fuente de tensión electroquímica sólo puede proporcionar una determinada intensidad de corriente durante un tiempo limitado. Cada fuente tiene una capacidad diferente.

La capacidad  $K$  de una pila electrolítica es la cantidad de carga  $Q$  que puede proporcionar expresada en ampere-hora (Ah).

La capacidad depende fuertemente de la estructura de la pila y de la carga que se conecte. Por ello los fabricantes no indican valores de capacidad constante, sino valores indicativos para cada caso.

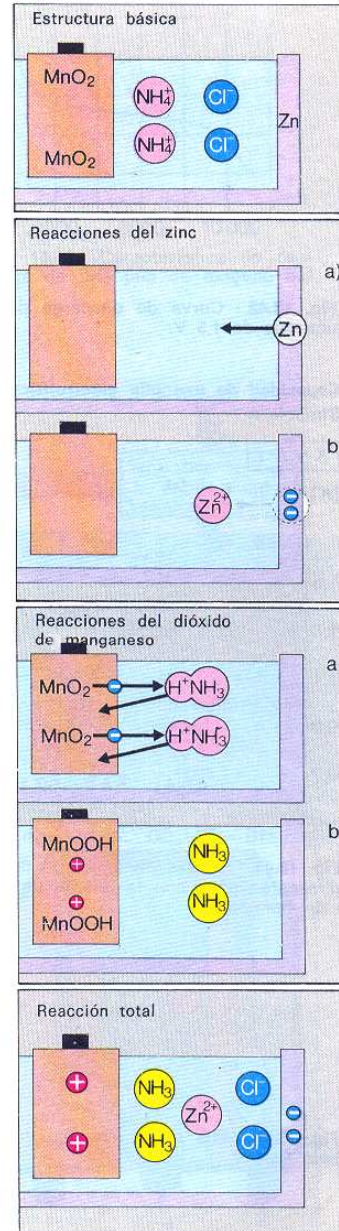


Fig. 13.41. Procesos electroquímicos en una pila de zinc y dióxido de manganeso.

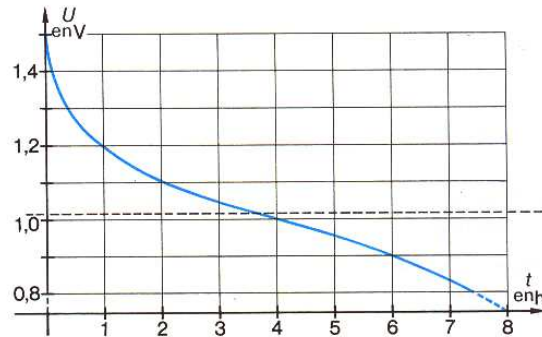


Fig. 13.42. Curva de descarga de una pila de 1,5 V.

#### Capacidad de una pila electrolítica

Símbolo  $K$

$$K = I \cdot t$$

$$[K] = \text{A h}$$

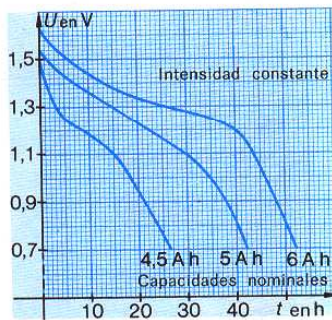


Fig. 13.43. Curvas de descarga de diferentes pilas con la misma tensión nominal.

Algunos fabricantes indican, mediante códigos especiales, la capacidad y los campos de aplicación (por ejemplo código de colores, azul, rojo, amarillo).

Al cambiar las pilas de un determinado aparato deben montarse siempre los tipos recomendados por el fabricante, pues sólo en este caso están garantizadas la potencia y la seguridad. Debe vigilarse que las pilas estén conectadas con la polaridad adecuada. Si se conectaran con polaridad equivocada se produciría una descarga propia, y sobre todo se correría el peligro de una fuga del líquido electrolítico.

Si todas las pilas se conectan con polaridad opuesta podría incluso estropearse el aparato.

En principio deberán siempre cambiarse todas las pilas, pues si no se corre el peligro de que las pilas «viejas» se descarguen excesivamente, dando lugar a fugas (fig. 13.44).



Fig. 13.44. Pila en la que ha habido fugas.

#### 13.4.2. Pila de oxígeno del aire

El electrodo negativo de esta pila es de zinc. El positivo no tiene ningún óxido como polarizador, sino que se compone de carbono activo en el que puede actuar electroquímicamente el oxígeno del aire. El electrolito puede ser cloruro amónico, cloruro magnésico o también hidróxido potásico (fig. 13.40c).

Estas pilas poseen buenas propiedades de descarga (fig. 13.45), por lo que se las emplea preferentemente en instalaciones telefónicas, de proceso de señales y de control de tráfico, así como en aparatos de medida.

**13.4.3. Pilas alcalinas**

Las pilas de óxido de mercurio y las de óxido de plata se emplean sobre todo para aparatos pequeños (por ejemplo, auriculares para sordos, calculadoras de bolsillo, emisoras portátiles, cámaras de filmación, relojes de pulsera).

La figura 13.40d,e, muestra dos posibles tipos. La tensión de descarga es constante en márgenes bastante amplios, y con ella también la capacidad. Dos tipos especiales de construcción son las pilas cilíndricas y las planas (en forma de botón).

**Comparación entre la pila de óxido de mercurio y la de óxido de plata**

	Pila óxido de mercurio	Pila de óxido de plata
Anodo	Óxido de mercurio (HgO)	Óxido de plata (Ag <sub>2</sub> O)
Cátodo	Zinc	Zinc
Electrólito	Hidróxido potásico (KOH)	Hidróxido potásico (KOH)
Tensión en vacío	1,35 V	1,85 V
Tensión de trabajo	1,2 V – 1,3 V	1,4 V – 1,5 V

La importancia de las pilas alcalinas de manganeso (fig. 13.40e, pág.200) va en aumento. Tienen una capacidad mayor que las pilas de zinc y dióxido de manganeso, lo que se consigue empleando un electrólito de hidróxido potásico. Los electrodos siguen siendo zinc y dióxido de manganeso.

**13.4.4. Pilas de combustible**

Durante una combustión (oxidación) se produce un intercambio de electrones (ver 13.1.3). Sin embargo, en general, el intercambio de los electrones es descontrolado.

En las pilas de combustible se consigue que el proceso se desarrolle con lentitud, dando lugar a una «combustión en frío». La energía almacenada en el combustible se transforma en energía eléctrica (fig. 13.46), para lo cual se llevan los electrones a través del circuito eléctrico externo.

En la mayoría de las pilas de combustible éste se compone de hidrógeno. La figura 13.47 muestra la estructura de una pila de este tipo.

El hidrógeno se lleva a través de un electrodo metálico permeable (poroso) con catalizadores<sup>1</sup> de plata, extrayéndosele aquí electrones, con lo que el electrodo se vuelve negativo. El hidrógeno ionizado de este modo (H<sup>+</sup>) llega al electrólito que es hidróxido potásico.

El oxígeno necesario para la combustión se lleva a través de un segundo electrodo metálico poroso con catalizadores de níquel. El oxígeno también se ioniza, extrayendo electrones del electrodo metálico y entrando como ion negativo en el electrólito. En el hidróxido potásico se reúnen los iones negativos de oxígeno con los iones positivos de hidrógeno dando lugar a agua.

<sup>1</sup> Catalizadores son sustancias que aceleran o facilitan procesos químicos sin intervenir directamente ni modificarse en ellos.

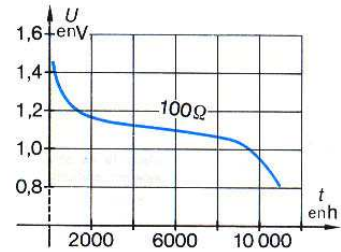


Fig. 13.45. Característica de descarga de una pila de oxígeno del aire.

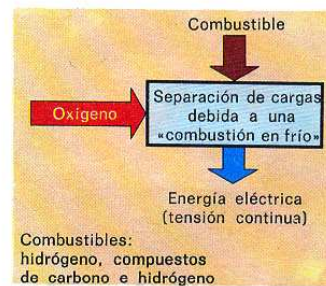


Fig. 13.46. Esquema del funcionamiento básico de una pila de combustible.

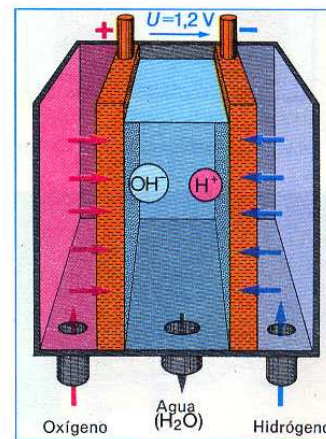


Fig. 13.47. Estructura de una pila de combustible.

UNIDAD OPERATIVA SENATI – Abancay  
Prof. Efraín Gamarra Samanez

Las pilas de combustible con hidrógeno no producen materiales nocivos. Además su rendimiento es muy bueno, aproximadamente del 90 %. La mayor dificultad se presenta en la fabricación de los electrodos, pues en ellos los gases y los líquidos deben entrar en contacto íntimo. También existe el problema del almacenamiento del hidrógeno, que es muy explosivo.

Estos problemas y los elevados costes que traen consigo han impedido una mayor difusión de este tipo de pilas.

#### Ejercicios sobre 13.4

1. Describir la estructura de una pila de zinc y dióxido de manganeso.
2. ¿Cuál de los dos electrodos se disuelve en una pila de zinc y dióxido de manganeso?
3. ¿En qué sustancias se transforman el zinc y el dióxido de manganeso en una pila Leclanché?
4. ¿Por qué no pueden recargarse las pilas de zinc y dióxido de manganeso?
5. ¿Cuándo se ha descargado una pila electrolítica según la definición?
6. Explicar la diferencia entre la f.e.m., la tensión nominal y la tensión en los terminales.
7. Una batería se descarga en 5 horas cuando circula una corriente de intensidad media de 30 mA. ¿Cuál era su capacidad?
8. ¿Qué ventajas presentan las pilas de oxígeno del aire respecto a las de zinc y dióxido de manganeso?
9. ¿Qué ventajas tienen las pilas alcalinas respecto a las de zinc y dióxido de manganeso?



Fig. 13.48. Acumulador de plomo (batería de un automóvil).

### 13.5. Pilas secundarias

#### 13.5.1. Acumuladores de plomo

El acumulador de plomo pertenece al grupo de las pilas secundarias. Cuando se ha descargado se le puede volver a cargar con una corriente eléctrica.

##### 13.5.1.1. Aplicaciones y estructura

Los acumuladores de plomo se utilizan en innumerables campos de la técnica. Sirven, por ejemplo, como baterías de arranque para los motores de explosión. En instalaciones fijas se emplean como fuentes energéticas o grupos electrógenos de emergencia para instalaciones telefónicas o de señalización.

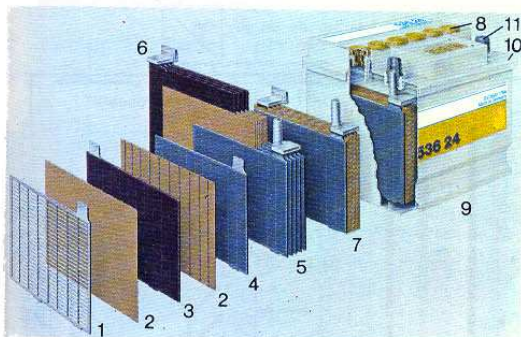
Los vehículos no deben producir gases de combustión en locales cerrados. Por ello se emplean también acumuladores en los vehículos eléctricos.

La figura 13.49 nos muestra la estructura de un acumulador de plomo que se compone de 6 pilas. Cada una proporciona una tensión de unos 2 V, con lo que la tensión total vale 12 V.

Las placas de color marrón rojizo de la figura 13.49 son los polos positivos (n.º 3 de la figura). Los tabiques separadores amarillos (n.º 2) los separan de los polos negativos (n.º 4). Los tabiques son permeables al líquido electrolítico (ácido sulfúrico diluido).

Todas las pilas de la batería tienen en principio la misma estructura, por lo cual sólo explicaremos la de una sola pila. Para ello distinguiremos entre dos estados: el cargado y el descargado.





- 1 Rejilla
- 2 Tabique separador
- 3 Placa positiva
- 4 Placa negativa
- 5 Juego de placas negativas
- 6 Juego de placas positivas
- 7 Bloque de placas
- 8 Tapones de cierre
- 9 Caja con listones de sujeción en el suelo
- 10 Tapa del bloque con 2 casquillos polares
- 11 Terminal

Fig. 13.49. Estructura de un acumulador de plomo.

1. Estado descargado

Placa positiva	Electrólito	Placa negativa
<b>Sulfato de plomo</b> (PbSO <sub>4</sub> ) Gris blancuzco	<b>Ácido sulfúrico diluido</b> La densidad es menor que en estado cargado, pues el radical del ácido está fijo en el sulfato de plomo	<b>Sulfato de plomo</b> (PbSO <sub>4</sub> ) Gris blancuzco



Fig. 13.50. Acumulador descargado.

2. Estado cargado

Placa positiva	Electrólito	Placa negativa
<b>Dióxido de plomo</b> (PbO <sub>2</sub> ) Marrón	<b>Ácido sulfúrico diluido</b> La densidad es mayor que cuando está descargado	<b>Plomo</b> (plomo esponjoso, Pb) Gris

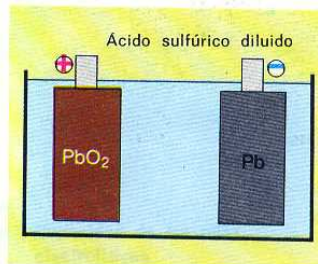


Fig. 13.51. Acumulador cargado.

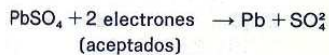
13.5.1.2. Proceso durante la carga y descarga

Para cargarlo se conecta el acumulador a una fuente de tensión continua. La figura 13.52 muestra el proceso de carga. El polo positivo del aparato de carga se conecta con el polo positivo del acumulador, y análogamente con los polos negativos. Como al final del proceso de carga se forman gases deben dejarse abiertos los tapones de cierre.

Reacciones químicas durante la carga

El sulfato de plomo se transforma debido a la circulación de la corriente eléctrica.

Polo negativo:



El sulfato de plomo se transforma en plomo al aceptar dos electrones. El radical del ácido se convierte en ion en la disolución y forma ácido sulfúrico con el hidrógeno que se origina en el polo positivo.



Fig. 13.52. Montaje para la carga de un acumulador.

Unidad Operativa SENATI - Abancay

Prof. S. L. C.

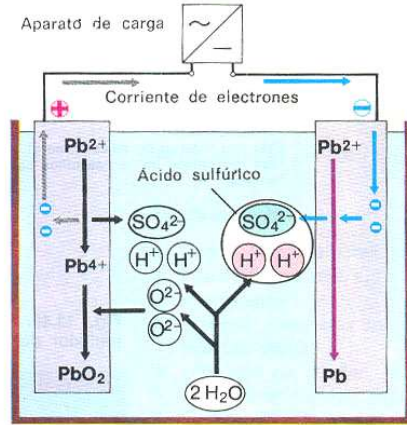


Fig. 13.53. Proceso de carga en un acumulador de plomo (polo negativo).

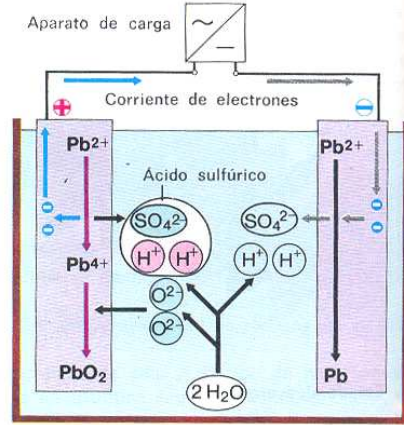
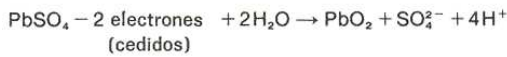


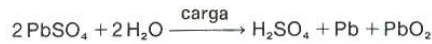
Fig. 13.54. Proceso de carga en un acumulador de plomo (polo positivo).

**Polo positivo:**



Del electrodo positivo se sacan electrones. El plomo bivalente (del  $\text{PbSO}_4$ ) se transforma en plomo cuatrivalente (del dióxido de plomo,  $\text{PbO}_2$ ). Los átomos de hidrógeno dan lugar a ácido sulfúrico con el radical del ácido del polo negativo.

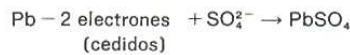
Las dos reacciones que hemos descrito por separado suceden simultáneamente. Debemos observarlas juntas:



Durante la carga se libera ácido en las placas.

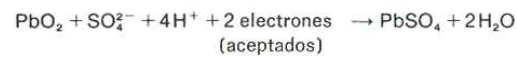
**Reacciones químicas durante la descarga**

**Polo negativo:**



El plomo se convierte en sulfato de plomo cediendo electrones.

**Polo positivo:**



Por el circuito eléctrico exterior llegan electrones al electrodo positivo. El dióxido de plomo se vuelve a transformar en sulfato de plomo.

Durante la descarga se vuelve a suministrar la energía almacenada durante

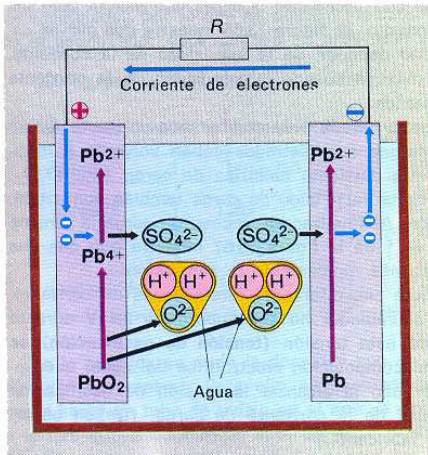


Fig. 13.56. Proceso de descarga en un acumulador de plomo.

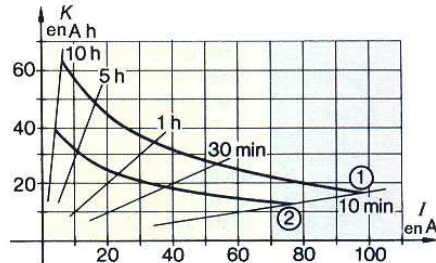
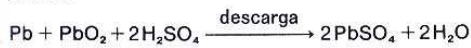


Fig. 13.55. Curvas de capacidad de un acumulador de plomo.

la transformación de las sustancias, volviéndose a obtener las sustancias de partida.



Durante la descarga los electrodos se transforman en sulfato de plomo, obteniéndose agua que contribuye a diluir el electrolito.

Durante la descarga se transforma el ácido en sulfato de plomo sólido y se libera agua.

Ni durante la carga ni durante la descarga se consume el ácido sulfúrico. Únicamente durante la carga puede descomponerse el agua.

### 13.5.1.3. Mantenimiento de los acumuladores de plomo

Al igual que en las pilas primarias para caracterizar los acumuladores se utiliza su capacidad. Se cumple la misma relación, pero en ellos la capacidad no es constante, pues depende de

- la circulación de la corriente
- la tensión final de descarga
- la temperatura
- la concentración del electrolito.

Por ello los fabricantes indican capacidades nominales, que sólo pueden alcanzarse en las condiciones indicadas. La **capacidad nominal** de la batería de arranque recibe la caracterización  $K_{20}$ , y es la capacidad que se alcanza después de una descarga de 20 horas.

#### Ejemplo:

$$K_{20} = 80 \text{ Ah}$$

La intensidad media de la corriente de descarga se calcula como sigue.

$$I_m = \frac{80 \text{ Ah}}{20 \text{ h}}; \quad I_m = 4 \text{ A}$$

#### Capacidad de las pilas electrolíticas

$$K = I \cdot t$$

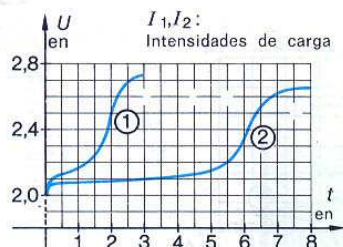


Fig. 13.57. Curvas de tensión al cargar una pila con diferentes intensidades.

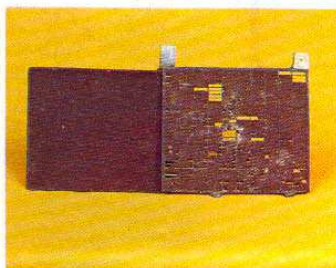


Fig. 13.58. Placas nueva y vieja de un acumulador de plomo.



Fig. 13.59. Determinación de la densidad del ácido sulfúrico con un densímetro.

De las curvas características puede obtenerse la capacidad exacta para las diferentes condiciones de funcionamiento. La figura 13.55 muestra dos curvas características en las que la capacidad depende de la intensidad de la corriente. Puede verse que la capacidad es máxima cuando la intensidad de la corriente y el tiempo de descarga son pequeños.

Todo acumulador almacena cargas y puede proporcionar una corriente durante un tiempo determinado. Estas cargas suministradas deben volverse a introducir en el acumulador mediante otra corriente eléctrica de carga (fig. 13.57).

Al ir aumentando el tiempo de carga la tensión de carga también aumentará, hasta alcanzar el valor de saturación. Al finalizar el proceso de carga la tensión vuelve a bajar a unos 2 V. La curva 1 de la figura 13.57 muestra que con una intensidad mayor se puede alcanzar más rápidamente la saturación.

Los acumuladores pueden cargarse con diferentes intensidades de corriente. Es importante que la tensión del acumulador no sea superior a 2,4 V durante demasiado tiempo, pues a partir de esta tensión (**tensión de gasificación**) se produce además de la carga una descomposición electrolítica del agua, quedando libres hidrógeno y oxígeno. Por ello al alcanzar la tensión de gasificación debe reducirse siempre la intensidad de la corriente de carga. (Deben observarse los valores indicados por el fabricante.)

El hidrógeno y el oxígeno forman gas fulminante que al inflamarse y quemarse explota. Por ello no deberá trabajarse con llamas libres en las proximidades de un acumulador en carga. Los locales en los que se carguen acumuladores deben estar bien ventilados. La electrólisis puede suponer la pérdida de agua, pero no de ácido sulfúrico. Por ello cuando sea necesario deberá rellenarse la batería con agua destilada o desmineralizada (sin minerales). No debe emplearse agua corriente, pues los minerales que contiene reducen la efectividad del acumulador.

Las burbujas de gas que se producen arrancan dióxido de plomo de la masa activa de las placas positivas, lo que provoca un envejecimiento precoz.

Consecuencias de una carga con formación de gas debido a una corriente excesiva:

- reducción de la capacidad
- transformación incompleta de las placas
- peligro de cortocircuito debido a depósitos
- aumento de la temperatura
- mayor suministro de energía durante la carga (se descompone agua)

Durante la carga debe cumplirse en general:

Debe introducirse la cantidad de carga necesaria para que la batería quede completamente cargada.

Esto significa que debe conocerse qué intensidad de corriente ha circulado y durante cuánto tiempo. En las instalaciones grandes es posible una carga exacta mediante los correspondientes aparatos de carga.

En la mayoría de los casos, sin embargo, no se conoce exactamente la cantidad de energía consumida. Por ello debe controlarse el proceso de carga. Como durante la carga se modifican la densidad del ácido y la tensión, estos dos hechos nos pueden servir para controlar el estado de carga del acumulador.

El estado de carga del acumulador se puede determinar mediante la densidad del electrolito y mediante la tensión (con carga conectada).

No obstante, la densidad del ácido sulfúrico diluido depende de cada tipo

de acumulador, por lo que no pueden indicarse valores válidos en general. Cuando el acumulador está cargado se presentan valores entre

1,20 kg/dm<sup>3</sup> ... 1,28 kg/dm<sup>3</sup>

Ejemplo de la densidad y la tensión de una pila en una batería de arranque:

Estado	Densidad	Tensión
cargada	1,28 $\frac{\text{kg}}{\text{dm}^3}$	2,1 V
↓	↓	↓
descargada	1,12 $\frac{\text{kg}}{\text{dm}^3}$	1,7 V

En la práctica se mide la densidad con un densímetro (aspirómetro para ácidos con aerómetro). Para ello se absorbe el líquido mediante una perilla de goma hasta un tubo de vidrio en el que se encuentra un flotador. La profundidad a la que quede sumergido éste depende de la densidad del líquido, que puede leerse sobre una escala.

Un control exacto del estado de carga del acumulador mediante la tensión sólo puede efectuarse cuando a la batería esté conectado un circuito de consumo. Esto puede lograrse con los llamados comprobadores de baterías, que se componen de un voltímetro con unas resistencias conectadas en paralelo (figura 13.60).

A continuación vamos a explicar algunos de los posibles procesos de carga.



Fig. 13.60. Comprobador de baterías.

**Carga a tensión constante con resistencia en serie fija**

La figura 13.61 nos muestra las variaciones de las diferentes magnitudes durante la carga. Cuando se utiliza este método es importante que el equipo de carga no siga funcionando durante un tiempo excesivo después de alcanzada la tensión de gasificación. Es precisa, pues, una desconexión automática al cabo de un cierto tiempo.

**Carga a tensión constante**

Los acumuladores pueden cargarse con corrientes de gran intensidad hasta que alcanzan la tensión de gasificación, hecho que se aprovecha en la carga rápida.

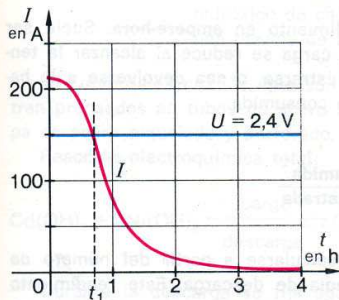


Fig. 13.62. Curvas durante la carga rápida a tensión constante.

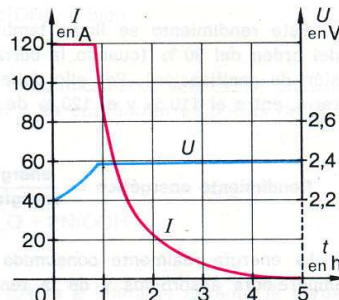


Fig. 13.63. Curva de carga con intensidad limitada.

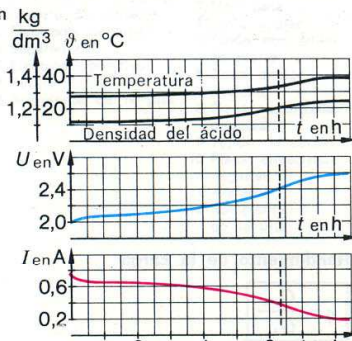


Fig. 13.61. Curvas del proceso de carga a tensión constante.

La figura 13.62 nos muestra la gran intensidad inicial. Desde cero hasta  $t_1$  es posible una carga rápida. Sin embargo, el acumulador aún no estará completamente cargado y deberá seguir conectado a la tensión de 2,4 V.

#### Carga con intensidad limitada hasta 2,4 V

La punta de intensidad del procedimiento anterior y el consiguiente esfuerzo del aparato de carga son bastante grandes. Por este motivo se emplean también equipos de carga que mantienen constante la intensidad de la corriente hasta alcanzar la tensión de gasificación. En la figura 13.63 se ha mantenido una corriente de 120 A.

Una carga incompleta puede provocar también un desgaste prematuro del acumulador, pues las placas no se transformarán completamente en dióxido de plomo y plomo esponjoso. El sulfato de plomo restante se acumula y tapona los poros, con lo que se reduce el rendimiento del acumulador.

Los acumuladores deben siempre cargarse completamente.

Es de suma importancia en los acumuladores que las placas estén completamente sumergidas en el líquido.

En las baterías de arranque que suministran los fabricantes las placas están ya completamente transformadas en plomo y dióxido de plomo. Este estado se denomina cargado en seco. Al cabo de unos 20 minutos después de introducir el ácido sulfúrico diluido puede utilizarse la batería directamente, sin necesidad de cargarla.

Las baterías de arranque, además del número de modelo y año, llevan marcadas sus características, como por ejemplo:

36 A h	180 A	12 V
Capacidad nominal	Corriente de prueba	Tensión nominal

En los acumuladores se produce una conversión de energía. Distinguimos dos tipos de rendimiento.

#### Rendimiento de la carga

$$\eta = \frac{Q_{\text{con}}}{Q_{\text{al}}}$$

$$\text{Rendimiento de carga} = \frac{\text{cantidad de carga consumida}}{\text{cantidad de carga alimentada}}$$

Este rendimiento se llama también rendimiento en **ampere-hora**. Suele ser del orden del 90 % (cuando la corriente de carga se reduce al alcanzar la tensión de gasificación). Por ello deberá suministrarse, o sea devolverse a la batería, entre el 110 % y el 120 % de la carga consumida.

#### Rendimiento energético

$$\eta = \frac{E_{\text{con}}}{E_{\text{sum}}}$$

$$\text{Rendimiento energético} = \frac{\text{energía consumida}}{\text{energía suministrada}}$$

La energía realmente consumida puede calcularse a partir del número de ampere-hora absorbidos y de la tensión media de descarga. Este rendimiento suele oscilar entre un 69 % y un 77 %. También se le llama **rendimiento en watt-hora**.

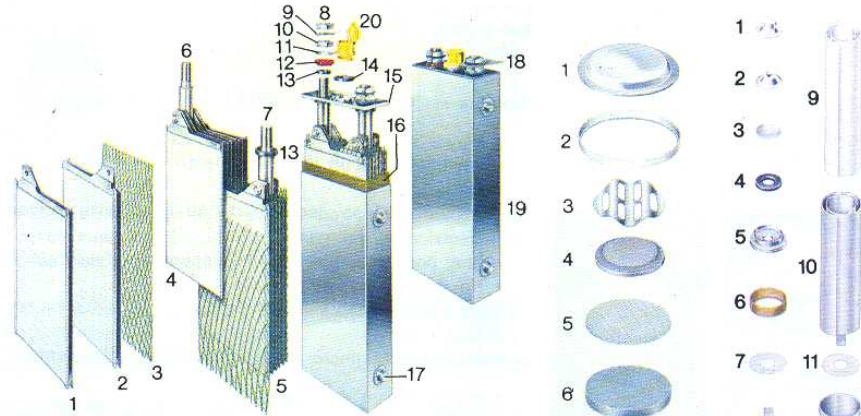


Fig. 13.64. Estructura de los acumuladores de níquel.

- |                                      |   |                                |
|--------------------------------------|---|--------------------------------|
| 1 Placas positivas                   | △ | 11 Disco de la espiga polar    |
| 2 Placas negativas                   |   | 12 Manguito de la espiga polar |
| 3 Rejilla aislante entre placas      |   | 13 Junta interior del polo     |
| 4 Juego de placas positivas          |   | 14 Junta anular                |
| 5 Juego de placas negativas          |   | 15 Tapa de pila, soldada       |
| 6 Espiga polar positiva              |   | 16 Revestimiento aislante      |
| 7 Espiga polar negativa              |   | 17 Soportes para sujetar       |
| 8 Tuerca polar                       |   | 18 Unión entre pilas           |
| 9 Arandela de seguridad              |   | 19 Recipiente de la pila       |
| 10 Anillo opresor de la espiga polar |   | 20 Válvula plegable            |

- |                         |   |                               |
|-------------------------|---|-------------------------------|
| 1 Tapa de la pila       | △ | 1 Contacto                    |
| 2 Junta anular aislante |   | 2 Caperuza                    |
| 3 Resorte de contacto   |   | 3 Membrana                    |
| 4 Electrodo negativo    |   | 4 Junta anular                |
| 5 Separador             |   | 5 Tapón con anillo de cierre  |
| 6 Electrodo positivo    |   | 6 Junta anular                |
| 7 Rejilla               |   | 7 Aislante                    |
| 8 Recipiente de la pila |   | 8 Placa sinterizada positiva  |
|                         |   | 9 Tejido de perlón            |
|                         |   | 10 Placa sinterizada negativa |
|                         |   | 11 Aislante                   |
|                         |   | 12 Recipiente de la pila      |

13.5.2. Acumuladores de níquel

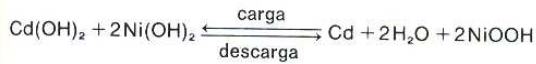
Mientras en los acumuladores de plomo el electrólito es ácido (ácido sulfúrico diluido) los de níquel contienen hidróxido potásico disuelto en agua. Por ello los acumuladores de níquel se llaman también **acumuladores alcalinos**.

Cuando el acumulador está descargado los materiales de las placas son:

- Placa positiva:** hidróxido de níquel, Ni(OH)<sub>2</sub>  
**Placa negativa:** hidróxido de hierro, Fe(OH)<sub>2</sub> o bien hidróxido de cadmio, Cd(OH)<sub>2</sub> o bien una mezcla de ambos.

Los materiales citados, que son los electroquímicamente activos, se encuentran prensados en tubos de acero niquelado o se encuentran en bolsas de chapa de acero niquelado y perforado.

Reacción electroquímica total:



Durante la descarga se fija agua, que vuelve a liberarse durante la carga. Por ello el electrólito tiene una densidad mayor cuando el acumulador está cargado que después de la descarga. No obstante la diferencia es tan pequeña

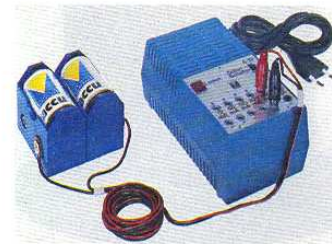


Fig. 13.65. Aparato de carga para acumuladores pequeños. Unidad Operativa SENATI - Abanca

que no sirve para determinar en qué estado se encuentra el acumulador. Densidad a 20° C: 1,2 kg/dm<sup>3</sup>.

Tensión nominal de todos los tipos: 1,2 V.

#### Ventajas respecto a los acumuladores de plomo

- Mayor resistencia a los esfuerzos mecánicos bruscos y fuertes.
- Posibilidad de un almacenamiento casi ilimitado (el electrolito no ataca las placas).
- La duración no depende de su edad, sino únicamente de su utilización eléctrica (descargas).
- Muy poco sensible a las sobrecargas y descargas excesivas.
- No despiden vapores ácidos.
- Es posible una construcción a prueba de gases en las pilas pequeñas.

#### Inconvenientes respecto a los acumuladores de plomo

- Mayor precio de adquisición.
- Mayor reducción de la tensión durante la descarga.
- Menores rendimientos.
- Mayor resistencia interna.

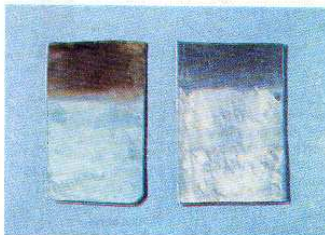


Fig. 13.66. Fenómenos corrosivos en superficies de plomo y cobre.



Fig. 13.67. Tobera corroída en una válvula de seguridad.

#### Ejercicios sobre 13.5

1. ¿De qué materiales se componen las placas de una pila de un acumulador de plomo descargado?
2. ¿De qué materiales se componen las placas de un acumulador de plomo cargado?
3. ¿Qué color tienen las placas de un acumulador de plomo cargado?
4. ¿Qué modificaciones experimenta el electrolito de un acumulador de plomo durante la carga y la descarga?
5. Trazar un esquema del circuito para la carga de acumuladores. (Indicar la polaridad del aparato de carga y del acumulador.)
6. ¿Cuál es la definición de capacidad nominal en las baterías de arranque?
7. ¿A partir de qué tensión empieza la descomposición del electrolito al cargar un acumulador de plomo?
8. ¿Por qué debe reducirse la intensidad cuando se alcanza la tensión de gaseificación al cargar los acumuladores de plomo?
9. ¿Qué cualidades debe tener el agua adecuada para rellenar los acumuladores de plomo?
10. ¿Qué posibilidades existen para comprobar el estado de carga de un acumulador de plomo?
11. ¿Cuáles son las definiciones de los rendimientos válidos en los acumuladores?
12. Citar las partes principales de un acumulador de níquel.
13. Indicar las ventajas y desventajas de los acumuladores de níquel respecto a los de plomo.

#### 13.6. Corrosión

Anualmente se pierden enormes cantidades de dinero por la corrosión de metales en el aire, en la tierra y en el agua.

Las figuras 13.66 y 13.67 nos muestran dos metales dañados por la corrosión. Ésta empieza en la superficie y según cuáles sean el metal y las influencias



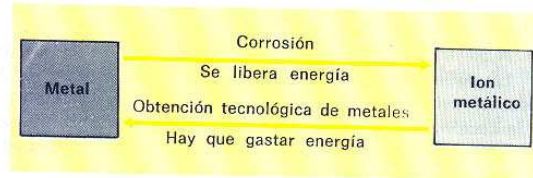


Fig. 13.68. Transformación de los metales debido a la corrosión.

externas, puede llegar a la total destrucción del metal. La corrosión provoca que los metales se transformen en iones metálicos (fig. 13.68). Las combinaciones de metales diferentes son las más amenazadas.

La corrosión es la destrucción de materiales, que empieza en la superficie y ataca progresivamente a todo el objeto, debida a reacciones químicas o electroquímicas con el ambiente.

En los apartados siguientes vamos a estudiar los fenómenos eléctricos y químicos que se producen durante la corrosión.

#### 13.6.1. Acción de gases y líquidos

El aire se compone de los siguientes gases:

Nitrógeno	78,09 %	Gases nobles	0,93 %
Oxígeno	20,95 %	Dióxido de carbono	0,03 %

El nitrógeno, los gases nobles y el dióxido de carbono no contribuyen a la corrosión. En cambio, el oxígeno se combina con los metales formando óxidos (ver 13.1.3). En muchos casos la capa de óxido es compacta y evita el avance ulterior de la corrosión (por ejemplo, el óxido de aluminio). Sin embargo, otros agentes adicionales, como por ejemplo sales y agua, destruyen esta capa protectora y provocan con ello la descomposición total del metal (fig. 13.70).

A la corrosión también contribuyen algunos productos, provocados por procesos de combustión, que polucionan el aire. Así, por ejemplo, el dióxido de azufre forma con el agua ácido sulfuroso, y éste ataca los metales.

La acción del agua en la corrosión está siempre relacionada con la del oxígeno.

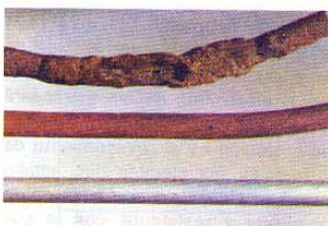


Fig. 13.70. Corrosión en una tubería de freno provocada por agua y sal anticongelante.



Fig. 13.71. Zona oxidada en la sujeción del amortiguador de un coche.

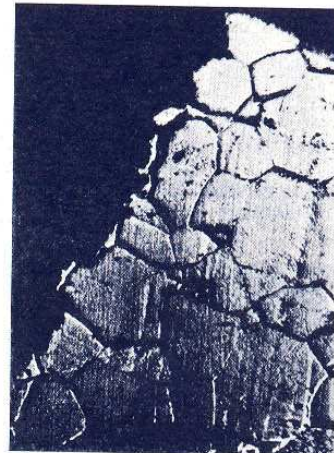
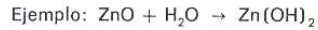


Fig. 13.69. Fotografía de una superficie de acero rectificada después de haber sido corroída por el oxígeno y el agua.

Unidad Operativa SENATI — Abancay

Prof. Efraín Gamarra Samanez

1999



A partir del óxido de zinc se forma hidróxido de zinc por la acción del agua.

La oxidación del hierro es una corrosión especial y bastante rápida. En realidad el proceso es relativamente complicado. La oxidación se produce debido a la acción del oxígeno y del agua. Se forman así diferentes hidróxidos de hierro, cuyos volúmenes específicos son diferentes, con lo que la capa de óxido se agrieta y permite que la corrosión continúe rápidamente su avance (fig. 13.71).

La amenaza de corrosión es aún mayor cuando existen ácidos y lejías, pues disuelven lentamente los metales innobles. Cuanto más innoble sea el metal mayor será la corrosión.

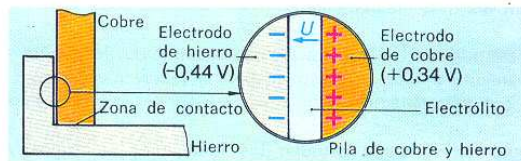


Fig. 13.72. Fenómenos de corrosión por formación de pilas.

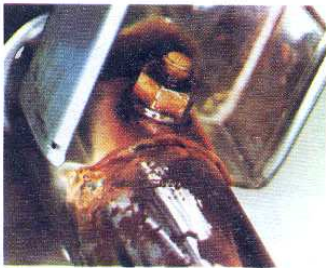


Fig. 13.73. Corrosión en la escalera de una piscina.

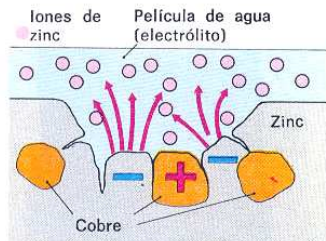
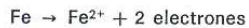


Fig. 13.74. Corrosión por formación de micropilas (corrosión inter-cristalina).

### 13.6.2. Corrosión por formación de pilas galvánicas

En los puntos de contacto de dos metales diferentes se producen fuertes corrosiones cuando en el espacio intermedio se deposita humedad. Veamos como ejemplo un ángulo de hierro al que se ha atornillado una chapa de cobre (figura 13.72).

En el espacio intermedio ha penetrado la humedad, que actúa como un electrolito, dando lugar en este caso a una pila electrolítica de tensión 0,78 V. Sin embargo, los polos de la fuente de tensión no están aislados, sino unidos uno con otro a través de los puntos de contacto entre los dos metales. Por tanto, circula corriente de una manera continua. Pero como la circulación de la corriente en una pila galvánica significa la entrada de iones de hierro en el electrolito, se producirá una disolución del electrodo de hierro (desplazamiento de iones metálicos). Con todo ello se extenderá la corrosión.



Cuando entre dos metales diferentes penetre la humedad se formará una pila galvánica. El metal menos noble se disolverá.

Los metales empleados en la técnica no son puros, sino que están más o menos dotados de sustancias extrañas. Entre ellas son nocivas otros metales y el carbono. Si además en la superficie se encuentra una película de agua se formarán micropilas que contribuirán a la destrucción del metal. La figura 13.74 muestra esquemáticamente una superficie de zinc impurificada por átomos de cobre. Por el cortocircuito de los polos de la pila circulará una corriente, que provocará la disolución de los iones de zinc en el electrolito. Así se estropeará la superficie y aparecerán grietas.

Una posible medida de protección contra la corrosión es el revestimiento de la superficie, por ejemplo del acero, con otros metales, por ejemplo zinc, estaño o níquel. Los agentes externos también provocan una capa de corrosión sobre dichos metales, capa que sin embargo es compacta y resistente, con lo que protege el metal que se encuentra bajo ella.

Sin embargo, la protección desaparece cuando esta capa resulta dañada mecánicamente en algunos puntos y queda el hierro al descubierto. En los pun-

tos dañados se producirá una corrosión muy intensa. La causa de ella vuelve a ser la formación de pilas electroquímicas.

En la figura 13.76 hemos reproducido este fenómeno en una chapa de hierro estañado.

Proceso químico de la disolución:

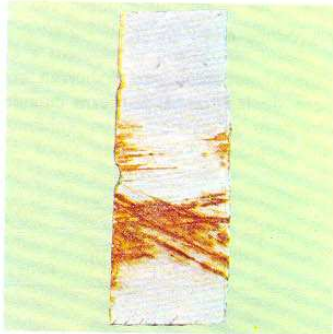
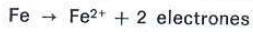


Fig. 13.76. Corrosión en una chapa de hierro estañado (hojalata) con la superficie dañada.

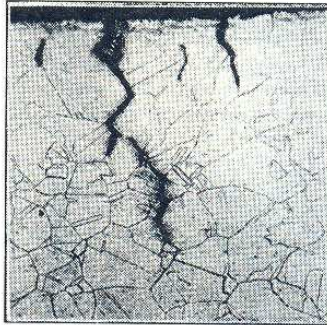


Fig. 13.77. Fotografía de una superficie rectificada con corrosión intercrystalina).

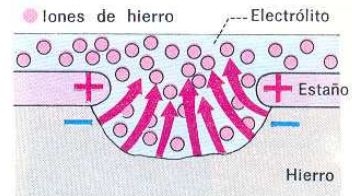


Fig. 13.75. Corrosión en una chapa de acero estañado.

### 13.6.3. Corrosión por corrientes derivadas

Dado que la causa de toda corrosión electroquímica se encuentra en la circulación de una corriente, la corrosión también se presentará en los circuitos de corriente continua, y precisamente en aquellos puntos en los que los iones se disuelvan en un electrólito. Decimos que se produce una corrosión por corriente derivada cuando del circuito principal de la corriente puede salirse una parte de ella, la corriente derivada. En principio no se trata más que de una electrólisis.

Para aclarar estos hechos vamos a describir brevemente un experimento (fig. 13.78).

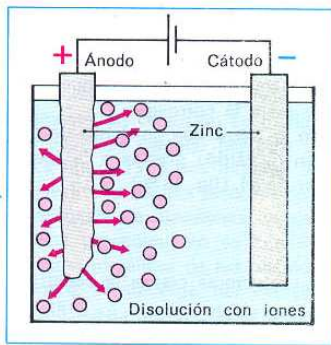


Fig. 13.78. Montaje experimental para estudiar la corrosión por corrientes derivadas.

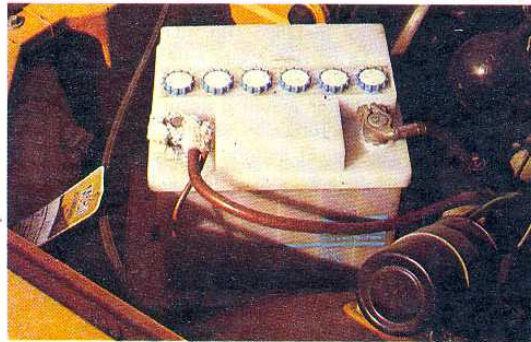


Fig. 13.79. Corrosión por corrientes derivadas en el borne de una batería.

En el electrolito se encuentran sumergidos dos electrodos de zinc. Debido a la circulación de la corriente se descompone el ánodo, pues en él los iones positivos pueden entrar a formar parte de la disolución.

Como ejemplo práctico nos servirá un terminal de la batería de un coche. La humedad presente se encarga de que al circuito principal se encuentre conectado otro circuito en paralelo, por el que puede circular la corriente derivada (fig. 13.79). Engrasando los terminales puede impedirse la entrada del agua, y por tanto la corrosión.

La corrosión por corrientes derivadas se produce en el ánodo.

Piezas amenazadas son, por ejemplo, los tubos metálicos que discurren enterrados, y también los revestimientos metálicos de las tomas de tierra cuando circulen corrientes continuas por la tierra.

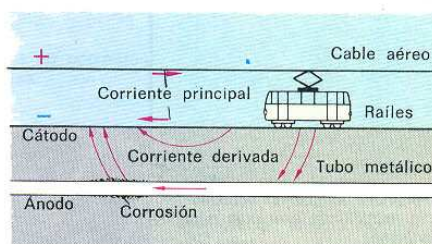


Fig. 13.80. Conductores metálicos enterrados amenazados por la corrosión.

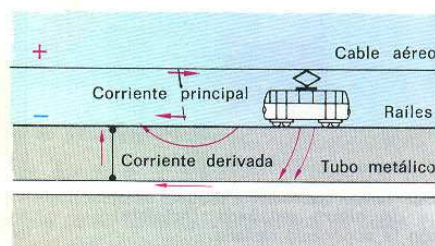


Fig. 13.81. Se impide la corrosión uniendo eléctricamente los metales que se encuentran enterrados.

En los tranvías, por ejemplo, la corriente continua llega por el cable aéreo y vuelve al generador por los raíles. En especial las interrupciones de éstos provocan que la corriente circule bajo tierra, tomando preferentemente para ello los conductores metálicos que se encuentran enterrados. Los iones de los conductores enterrados se disuelven en la tierra destruyendo así el conductor metálico (fig. 13.80).

La corrosión puede impedirse uniendo las canalizaciones de tubos o los revestimientos metálicos de cables directamente con los raíles mediante un conductor metálico (fig. 13.81).

La corriente que antes circulaba por los tubos y a través de la tierra hasta los raíles circulará ahora por el camino eléctricamente más favorable, que es el conductor metálico de unión. De este modo se evita la corrosión.

La protección es aún mejor si se inyecta en la tierra una corriente de protección. El material a proteger se convertirá en el cátodo gracias a la fuente de tensión, con lo que los iones no podrán salir de él (fig. 13.86).

#### 13.6.4. Protección contra la corrosión

Es inevitable el tener que emplear medidas protectoras contra la corrosión. Para ello existen diversas posibilidades.

Como la corrosión empieza siempre en la superficie deberemos proteger ésta contra la acción de sustancias nocivas. Métodos sencillos y eficaces son las **pinturas de color** y los **esmaltes**. Las pinturas que contienen plomo son especialmente eficaces.



Fig. 13.82. Medidas en una canalización de tubos afectada por corrientes derivadas.

Para que estas sustancias se adhieran bien es necesario que la superficie esté seca y exenta de óxidos antes de tratarla. Como las pinturas de color presentan una relativa porosidad será necesario utilizar varias capas. Es frecuente el utilizar entonces pinturas diferentes (primera capa, esmalte, etc.).

En las piezas que pueden quedar sueltas o que estén siempre en movimiento es poco conveniente la pintura. No obstante estos objetos pueden protegerse **lubrificándolos o engrasándolos**.

Los metales forman en su superficie **capas de óxido o de hidróxido**. Si éstas son delgadas y sin poros el metal inferior quedará protegido automáticamente. Para mejorar la protección puede reforzarse esta capa electrolíticamente (ver 13.2.4.2.). Los poros restantes pueden taponarse con pinturas o por impregnación.

Los **revestimientos metálicos** pueden obtenerse por inmersión en metales fundidos, por vaporización, mediante electrolisis o por pulverización. Sin embargo, todos estos procedimientos sólo serán una protección eficaz si la superficie no queda dañada.

Un **revestimiento plástico de una superficie metálica** es una protección muy eficaz. Sin embargo, debe vigilarse que la capa de plástico quede bien adherida, pues si no se podrán formar zonas de corrosión en los huecos.

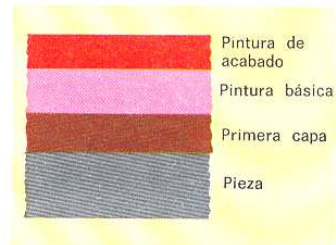


Fig. 13.83. Capas de pintura contra la corrosión.



Fig. 13.84. Ánodos de desgaste.

Los objetos amenazados por la corrosión que se encuentren enterrados (por ejemplo, depósitos de petróleo, tubos, raíles, cables) precisan una atención especial, pues en la tierra húmeda siempre se encuentran electrolitos. Una protección eficaz contra la corrosión se consigue con los **ánodos de desgaste**. Para ello se conecta el objeto a proteger con un electrodo de un material diferente, obteniendo así una pila galvánica. El electrodo menos noble se disolverá paulatinamente. La corrosión se traslada del objeto a proteger al ánodo de desgaste, que podemos cambiar por otro cuando sea necesario.

La figura 13.85 nos muestra la protección de un tubo de acero mediante un bloque hecho de una aleación de magnesio. Frecuentemente se emplean ánodos de desgaste de aleaciones de zinc debido a su mayor duración.

Este procedimiento se emplea también, por ejemplo, para proteger las estructuras metálicas de los puentes. Un bloque de zinc, unido eléctricamente con el acero, se sumerge, por ejemplo, en el agua.

Una buena protección se suele lograr también con el **método de las corrientes exteriores** (protección activa contra la corrosión). La corriente protectora se inyecta en el suelo mediante una fuente de alimentación (fig. 13.86). No es preciso que el ánodo sea de un material menos noble que el objeto a proteger, pues se convierte en ánodo gracias a la polaridad de la fuente de tensión. Los

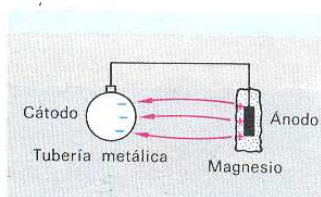


Fig. 13.85. Protección contra la corrosión mediante un ánodo de desgaste.

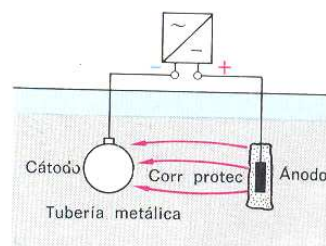


Fig. 13.86. Protección contra la corrosión mediante inyección exterior de corriente.

Fig. 13.87. Protección del interior de un depósito de agua potable.

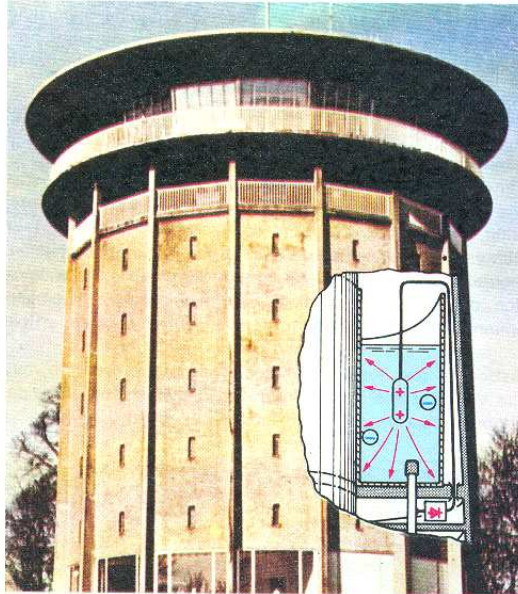


Fig. 13.88. Unión de acero y aluminio mediante un tornillo de acero.

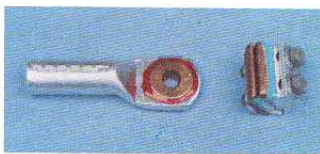
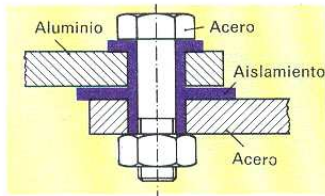


Fig. 13.89. Piezas de unión entre conductores de cobre y aluminio. Los puntos de contacto que se encuentran en la superficie están protegidos contra la acción de la humedad mediante esmalte.

iones solamente pueden salir del ánodo, con lo que quedan protegidos los objetos conectados como cátodo.

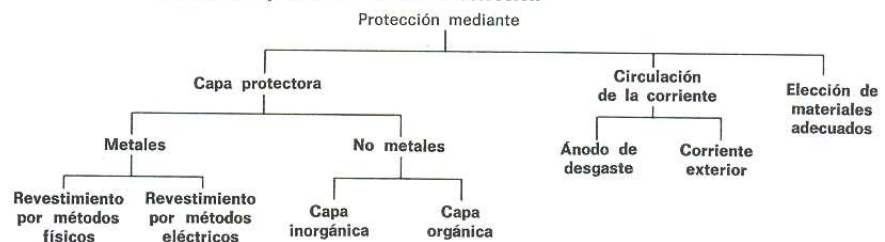
En general los ánodos que se entierran son de aleaciones de silicio y hierro colado, pues este material se descompone con lentitud. Además se rodean con un asentamiento de coque.

Este procedimiento de protección se puede emplear también para interiores. La figura 13.87 nos muestra la protección interna de un depósito de agua potable. El ánodo puede ser, por ejemplo, de titanio chapeado.

Para evitar la corrosión deberá tenerse en cuenta lo siguiente:

- Las superficies amenazadas por la corrosión deberán revestirse (o bien engrasarse).
- Los puntos por donde la corriente pase de un metal a otro deberán estar especialmente protegidos.
- En las juntas de dos metales diferentes se emplearán a ser posible sólo metales que se encuentren muy próximos en la serie de potenciales de electrodo. Si no fuera posible esto, se procurará un aislamiento suficiente entre ambos.

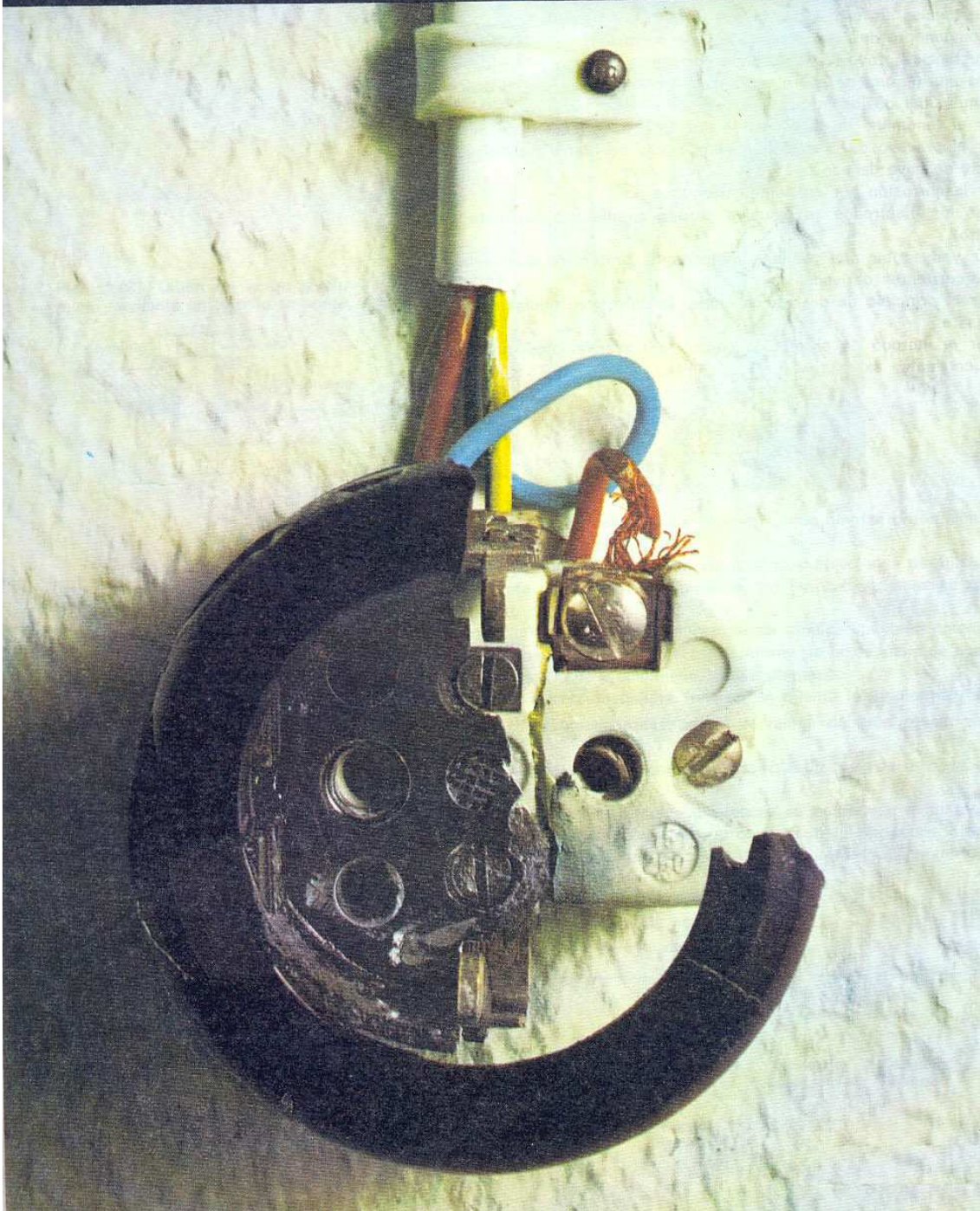
**Métodos de protección contra la corrosión**



**Ejercicios sobre 13.6**

1. Explicar el concepto de corrosión.
2. ¿Qué sustancias se forman por la corrosión de los metales?
3. ¿Qué componente del aire contribuye a la corrosión?
4. ¿Qué sustancias provocan fenómenos corrosivos de gran intensidad?
5. Tenemos una juntura de cobre y hierro. Describir la causa y el proceso de corrosión. ¿Cuál de los metales se disuelve?
6. Explicar el fenómeno de la corrosión debido a la formación de micropilas.
7. Explicar el proceso de corrosión en una chapa de hierro galvanizado cuya superficie se haya dañado.
8. Explicar la corrosión por corrientes derivadas.
9. ¿Cuál de los electrodos se disuelve cuando circula una corriente por un electrólito?
10. Nombrar y describir dos posibles métodos de protección contra la corrosión por corrientes derivadas.
11. Describir el principio de protección contra la corrosión mediante un ánodo de desgaste.
12. Describir el método de protección contra la corrosión mediante la inyección de corrientes exteriores.

**¡Caja inadmisibile!**





## 14. Protección contra los peligros de la corriente eléctrica

### 14.1. Peligros de la corriente eléctrica

La figura 14.1 nos muestra el cable estropeado de una plancha eléctrica, plancha que un ama de casa sensata no utilizaría nunca en estas condiciones, pues podría sufrir una descarga eléctrica.



Fig. 14.1. Cable de conexión defectuoso en una plancha eléctrica.

Seguro que tampoco los lectores emplearían un aparato así porque les resultaría demasiado peligroso. Pero, ¿saben cuáles son exactamente los peligros que les acecharían? ¿Y por qué? Por ejemplo, ¿por qué no nos ocurre nada al tocar las vías de un tren eléctrico en miniatura?

Vamos a contestar a éstas y a otras preguntas similares en los apartados siguientes.

#### 14.1.1. Efectos sobre el cuerpo humano

Para los seres humanos la corriente eléctrica es peligrosa porque no poseemos ningún sentido para la electricidad; sólo podemos registrar sus consecuencias. Para el cuerpo humano (y el de los animales) la corriente eléctrica tiene tres efectos principales:

- efecto químico
- efecto fisiológico
- efecto calorífico.

El hombre no puede percibir directamente la corriente eléctrica, sino solamente sus efectos.

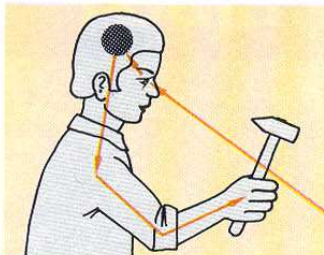


Fig. 14.2. Recorridos del estímulo y de la señal.

**Efecto químico:** Aproximadamente 2/3 del cuerpo humano se componen de agua. Al aplicar una tensión aparecerá, pues, una descomposición (ver 14.2.2). Los componentes básicos de nuestro organismo, las células, se mueren cuando se descompone el líquido celular.

**Efecto fisiológico:** En nuestro organismo necesitamos permanentemente electricidad para que nuestros sentidos corporales informen al cerebro y para que éste envíe señales de mando a los terminales nerviosos de los músculos (figura 14.2). Para ello se generan impulsos de tensión del orden de 0,1 V. Si desde el exterior quedara aplicada una tensión adicional resultarían perturbados los procesos normales; así, por ejemplo, los músculos no se relajarían (calambre muscular).

El centro de mando de nuestro corazón se encuentra en el propio corazón (el llamado nódulo seno-auricular), por lo que las corrientes extrañas que circulen a través del corazón serán muy peligrosas. Casi siempre trabajamos con una corriente alterna de 50 Hz, con lo que los músculos del corazón recibirían 100 veces por segundo la orden de contraerse, o sea unas 80 veces más rápido de lo normal. Como consecuencia el corazón trabajaría a toda prisa y superficialmente, con lo que dejaría de bombear la sangre. Este fenómeno se llama fibrilación ventricular o cardíaca, y provoca el paro cardíaco.

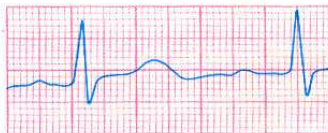


Fig. 14.3. Detalle de un electrocardiograma de un corazón sano.

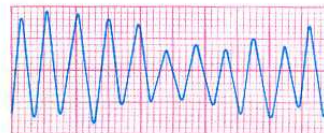


Fig. 14.4. Electrocardiograma de un corazón con fibrilación (experimento con animales).



Fig. 14.5. Marcas dejadas por la corriente en una mano (puntos de entrada y salida de la corriente).

**Efecto calorífico:** Todas las sustancias se calientan al paso de la corriente (ver 2.9) y, por tanto, también lo hará el cuerpo humano. En especial los puntos de entrada y de salida de la corriente quedarán amenazados, pues debido a las resistencias de paso, relativamente grandes, se disiparán en ellos grandes potencias ( $P = I^2 \cdot R$ ) que se transformarán en calor (fig. 14.5). Además en los tejidos calientes las proteínas se coagulan y, por otro lado, una elevación de sólo 15°C de la temperatura de los músculos destruye los glóbulos rojos de la sangre.

#### 14.1.2. Márgenes de intensidad

La gravedad que pueden tener en cada caso los efectos descritos depende sobre todo de la **intensidad de la corriente**, pero también del **camino por el que circule la corriente** por el cuerpo, así como del **tiempo que actúe** y del **tipo de corriente** (corriente continua pura, corriente alterna, corriente mixta).

Distinguimos cuatro márgenes de intensidad

0 ... 25 ... 80 ... 5000... (valores en mA)

← ① → ← ② → ← ③ → ← ④ →

Los valores de la tabla 14.1 «intensidades de corriente y sus efectos» se obtuvieron en experimentos derivados de accidentes. Ello significa que **en algún**

Tabla 14.1: Intensidades de corriente y sus efectos

Margen	Intensidad (corriente alterna) en mA	Efectos	Consecuencias
①	2 10 hasta 25	Ligero cosquilleo Entumecimiento calambre musculares Aumento de la presión sanguínea	Susto con movimientos incontrolados «Ya no puede uno soltarse» Paralización de la respiración, a veces pérdida del conocimiento
②	25 hasta 80	Convulsiones del estómago Fuertes calambres musculares Fibrilación ventricular al cabo de un tiempo	Náuseas Rotura de huesos debidas a contracciones Falla la circulación de la sangre Falta de oxígeno en el cerebro al cabo de 4 min. muerte de las células del cerebro
③	80 hasta 5000	Fibrilación ventricular al cabo de 0,1 s	Paro cardíaco y muerte
④	más de 5000	Quemaduras graves, frecuentemente paro cardíaco, en general no provoca fibrilación ventricular	Muerte debido a quemaduras, a menudo al cabo de días o semanas

caso particular pueden también producirse efectos mortales para intensidades menores. El estado de salud y de ánimo también desempeñan un papel decisivo.

#### 14.1.3. Máximas tensiones de contacto permisibles

Para poder calcular la tensión que puede ya ser peligrosa para el ser humano debemos conocer primero la resistencia del cuerpo humano. Para ello se han realizado un sinnúmero de medidas y cálculos que han dado valores muy diferentes, por lo que no se puede citar ningún valor de validez general. Nosotros vamos a calcular con  $1000 \Omega$ , pues el valor real no suele ser menor. En la figura 14.6 hemos representado simplificada la distribución de la resistencia en el cuerpo humano.

Para el margen 2 de intensidades podemos calcular, pues, la tensión:

$$U = I \cdot R$$

$$U = 0,025 \text{ A} \cdot 1000 \Omega$$

$$U = 25 \text{ V}$$

Como podemos suponer en general que el cuerpo humano no quedará sometido a la tensión total se ha determinado que en las instalaciones con una tensión nominal de más de 50 V deberán tomarse medidas adicionales para proteger contra un posible contacto indirecto.

Esta tensión límite se denomina **máxima tensión permisible de contacto**, y es la tensión que puede soportar el ser humano sin sufrir lesiones duraderas.

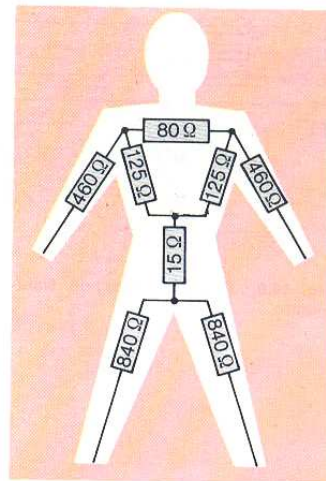


Fig. 14.6. Valores resistivos en el cuerpo humano (aproximados).



Fig. 14.7. Cortocircuito a 220 V; arco voltaico con partículas de cobre despedidas.

La máxima tensión permisible de contacto vale para el hombre 50 V, para animales útiles 24 V.

Esta determinación no debe llevarnos a la falsa conclusión de que las tensiones menores no son peligrosas. Estos valores son simplemente valores medios y el simple hecho de respetarlos no nos protege suficientemente contra los peligros de la corriente eléctrica.

## 14.2. Circuito de la corriente de fallo

Seguramente ya habrán oído durante sus prácticas o antes que alguien ha provocado un cortocircuito (fig. 14.7). Pero, ¿sabían también cuáles son las partes de una instalación que han quedado en contacto? Vamos a ocuparnos en los apartados siguientes del camino que recorre la corriente en caso de cortocircuito.

### 14.2.1. Tipos de fallos

En primer lugar precisamos algunas definiciones de conceptos que quedan aclarados en la figura 14.8.

Los contactos indeseados entre conductores están indicados mediante flechas en forma de rayo. Estos contactos vienen provocados por **fallos en el aislamiento**. Si estos contactos presentan una resistencia despreciable en la práctica los llamaremos cortocircuitos totales.

El cortocircuito incompleto, también llamado contacto entre hilos, se presenta en el caso de que la corriente deba recorrer una resistencia de utilización. Los demás tipos de averías se encuentran representados en la tabla de la figura 14.9.

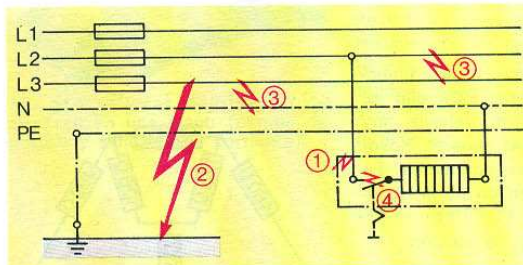


Fig. 14.8. Posibles fallos de aislamiento.

N.º	Nombre del fallo	Cubierta	Hilo	Hilo	Tierra
①	Contacto con la cubierta	↑	↑		
②	Corto a tierra			↑	↑
③	Cortocircuito		↑	↑	
④	Corto incompleto		↑	↑	*

Fig. 14.9. Tipos de fallos.

### 14.2.2. Tensiones en caso de fallo

Partamos del circuito eléctrico simplificado de un aparato; la corriente puede haber tomado el camino representado en la figura 14.10. Este tipo de circuito eléctrico se denomina **circuito de la corriente de fallo**. Un paso más en la simplificación consiste en utilizar resistencias equivalentes.

La tensión entre la cubierta del aparato y la tierra de referencia se denomina **tensión de fallo  $U_f$** .

El cuerpo humano puede quedar sometido a una parte de esta tensión.

El valor de esta tensión se denomina **tensión de contacto  $U_B$** .

Entendemos por tierra de referencia un potencial de tierra al que podamos referir las demás tensiones. Esto sólo se puede conseguir en determinadas condiciones.

#### Ejercicios sobre 14.1 y 14.2

1. ¿Qué consecuencias tienen los efectos de la corriente eléctrica sobre el cuerpo humano?
2. ¿Cuáles son las cuatro magnitudes de las que depende la intensidad de los efectos de la corriente sobre el cuerpo humano?
3. ¿Cuál es la intensidad a la que uno no puede ya soltarse?
4. ¿Bajo qué condiciones pueden ser peligrosas para el ser humano tensiones de más de 25 V?
5. ¿Por qué es mayor el calor desprendido en los puntos de contacto de un accidente eléctrico?
6. ¿Por qué son especialmente peligrosas las corrientes exteriores que circulan por el corazón?
7. ¿Por qué es menor la tensión de contacto que la tensión de fallo?
8. ¿Qué medidas deben tomarse en las instalaciones con tensiones nominales de más de 50 V?
9. Dar ejemplos sencillos de los fallos indicados en la figura 14.9.
10. Del parte de un accidente tomamos los siguientes datos: La fase L1 entró en contacto con la cubierta de un motor cuya toma de tierra estaba interrumpida (resistencia de fallo  $100 \Omega$ ). El accidentado se encontraba de pie sobre un suelo conductor (resistencia del lugar  $300 \Omega$ ) y tocó con la mano derecha la cubierta del motor (resistencia del cuerpo humano, incluida la resistencia de contacto con la cubierta,  $3400 \Omega$ ). Las medidas dieron como resultado que la resistencia de los conductores era  $2,5 \Omega$  y la resistencia a la tierra de régimen,  $5 \Omega$ .  
Se trataba de una red de tensión alterna de 220 V, siendo la resistencia interna de la fuente de tensión despreciable.
  - a) Dibujar el circuito de la corriente de fallo.
  - b) ¿Qué intensidad tenía la corriente de fallo?
  - c) ¿Qué valores tenían las tensiones de contacto y de fallo?
  - d) ¿Qué efectos ha podido tener esta corriente sobre la persona accidentada si el contacto duró aproximadamente  $1/5$  de segundo?
  - e) ¿Qué valor tenía el trabajo transformado en calor en los puntos de entrada y de salida de la corriente (mano derecha y pies) si para el cuerpo humano podemos suponer las resistencias representadas en la figura 14.6?

#### 14.3. Protección contra tensiones de contacto excesivas

En los últimos apartados estudiamos los efectos que puede tener la corriente eléctrica sobre el cuerpo humano y vimos qué tensiones pueden provocar corrientes peligrosas. Para proteger al usuario de instalaciones y aparatos eléctricos contra daños personales y materiales se utilizan determinadas medidas de protección.

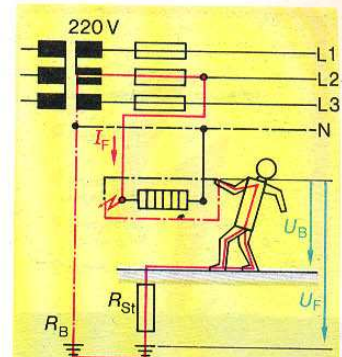


Fig. 14.10. Camino de la corriente de fallo (si no hay medidas de protección la corriente circulará por el cuerpo humano).

En esta obra sólo podremos tratar una **visión superficial** de estas medidas, pues por un lado no poseemos todavía los conocimientos de electrotecnia suficientes para una total comprensión del problema, y por otro lado las diversas medidas de protección a emplear dependen de las características específicas de cada oficio.

Para lograr que la tensión de contacto sea pequeña existen en principio dos posibilidades básicas:

1. Trabajar sólo con tensiones nominales de menos de 50 V.
2. Dimensionar las resistencias del circuito de la corriente de fallo de modo que en caso de fallo la tensión de contacto no sea superior a 50 V (ver fig. 14.11).



Fig. 14.12. Aislamiento del punto de trabajo al reparar un empalme de cables sometidos a tensión.

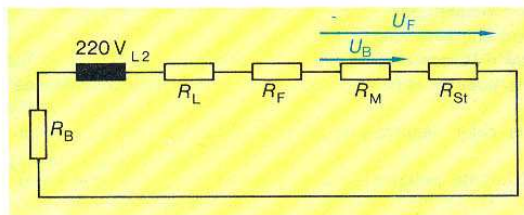


Fig. 14.11. Circuito eléctrico de fallo.

- $R_B$ : Resistencia de la puesta a tierra
- $R_L$ : Resistencia de la línea
- $R_F$ : Resistencia del fallo
- $R_M$ : Resistencia del cuerpo humano
- $R_{St}$ : Resistencia de paso del cuerpo al punto de trabajo



Fig. 14.13. Interruptor protector contra corriente de fallo.

La primera posibilidad se lleva a cabo mediante una medida de protección que consiste en utilizar tensiones pequeñas, mientras que el aislamiento protector y el aislamiento del punto de trabajo caen bajo la segunda alternativa.

La separación para protección no permite que aparezcan tensiones de contacto, pues no puede existir ningún circuito para la corriente de fallo. Otras medidas de protección no pueden evitar la aparición de una tensión peligrosa entre la cubierta y tierra, pero sí impiden que esta tensión exista demasiado tiempo. Para ello se desconectan los aparatos en funcionamiento al activarse los dispositivos de protección contra sobrecorriente (fusibles, disyuntores) u otros dispositivos especiales. Algunas de las posibles medidas son: puesta a neutro, puesta a tierra, sistema con cable protector, circuito protector contra corrientes de fallo y circuito protector contra tensiones de fallo.

Existen en total nueve métodos de protección contra contactos indirectos (norma VDE 0100, §3 h):

- |                         |   |  |
|-------------------------|---|--|
| Sin conductor protector | { | aislamiento protector<br>aislamiento del punto de trabajo<br>tensiones pequeñas como protección<br>separación para protección  |
| Con conductor protector | { | puesta a tierra<br>puesta a neutro<br>sistema con cable protector<br>circuito protector contra corrientes de fallo (FI)<br>circuito protector contra tensiones de fallo (FU) |

#### 14.4. Normas de seguridad al trabajar en instalaciones eléctricas

Ya sabemos que la corriente eléctrica puede tener efectos mortales para el cuerpo humano (ver 14.1). Por ello se toman determinadas medidas para que el usuario de instalaciones o aparatos eléctricos quede protegido contra tensiones de contacto excesivas. Estas medidas de protección deben resultar efectivas cuando falle el aislamiento de la instalación, o sea que son medidas adicionales. Pero, ¿cuánto aumenta el peligro cuando abrimos un aparato o instalación eléctricas y las partes del circuito portadoras de corriente quedan al descubierto? De esta manera, el operario o el técnico se encontrarían siempre en peligro de muerte cuando trabajasen con partes sometidas a tensión. Por ello esto está prohibido.

**Está prohibido terminantemente trabajar con partes de circuitos sometidas a tensión** (norma VDE 0105).

**Cinco son las normas de seguridad** para garantizar el cumplimiento de esta prohibición.

Antes de trabajar en instalaciones eléctricas deben tomarse las medidas necesarias para respetar las cinco normas de seguridad, y necesariamente en el orden indicado.

Cuando se haya concluido el trabajo se deberán retirar las medidas de protección en orden inverso.

El gremio de mecánicos de precisión y electrotécnicos de Colonia ha investigado las causas de los accidentes de trabajo en su campo de actividades. Ha llegado a la conclusión de que en la mayoría de los casos la culpa de los accidentes la tienen los propios operarios y técnicos. En la electrotecnia casi uno de cada tres accidentes era debido a no respetar las normas de seguridad. Aproximadamente 8000 personas quedaron lesionadas por no respetar las normas de seguridad durante el tiempo de 6 años que duraron las investigaciones. El porcentaje de los accidentes con consecuencias mortales es también el mismo, aproximadamente el 29 %.

Por ello somos de la opinión que todo técnico electricista debe hacer todo lo posible para protegerse a sí mismo y a sus compañeros de los posibles daños. O sea que deberá respetar como mínimo las normas de seguridad, aún incluso cuando otros sean más despreocupados y se las salten creyendo demostrar así su valentía.

**Ser valiente** no consiste en someterse conscientemente a un peligro al no respetar las normas de seguridad, sino en **rebelarse contra los comentarios despreciativos de los compañeros de trabajo**.

A continuación vamos a explicar detenidamente las citadas normas, indicando algunos consejos para su realización en la práctica.

##### Desconexión total

La desconexión total supone la desconexión de todos los polos y por todos lados de la instalación en cuestión.

**Realización:** Un método sencillo de cumplir esta norma es desenroscar los fusibles o automáticos o bien desconectar los disyuntores.

No es suficiente la desconexión de un interruptor monopolar, pues otra persona podría volverlo a conectar sin más. Además otros conductores no desconectados podrían seguir soportando una tensión. De aquí se puede ver la importancia de esta norma.

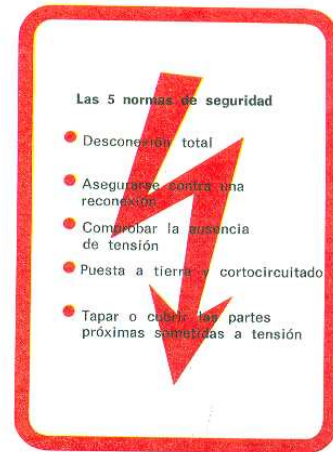


Fig. 14.14.

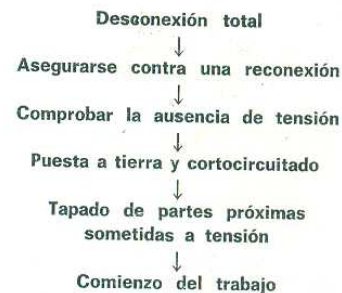


Fig. 14.15. Tapones roscados de bloqueo.

#### Asegurarse contra una reconexión

Deberán tomarse medidas que garanticen que sólo aquellas personas que trabajen en la instalación puedan volverla a conectar.

**Realización:** Si se han desenroscado los fusibles no deberán dejarse junto a la caja de distribución, sino que la persona que trabaje en la instalación deberá llevárselos consigo. Los dispositivos de bloqueo (fig. 14.15) ofrecen una seguridad adicional. Para informar a otros técnicos o usuarios de la instalación pueden emplearse etiquetas autoadhesivas que se pegarán sobre los dispositivos protectores, disyuntores o portafusibles. Suelen ser de color rojo o amarillo (ver fig. 14.16).

Fig. 14.16. Etiquetas de aviso autoadhesivas.



Fig. 14.17. Comprobación de la ausencia de tensión.

Evidentemente aún es más seguro que ninguna otra persona pueda tener acceso a los interruptores, o sea que los armarios o salas de conmutación estén cerrados con llave.

#### Comprobar la ausencia de tensión

Aunque se crea haber interrumpido el circuito eléctrico adecuado, en determinados casos aún puede suceder que determinadas partes de la instalación en cuestión estén sometidas a tensión, bien sea por fallos en el circuito de la instalación o por rotulados o indicadores equivocados. Por tanto, deberá necesariamente comprobarse la ausencia de tensión antes de empezar a trabajar.

**Realización:** Sólo deberán emplearse voltímetros o buscapolos bipolares (figura 14.18), pues los buscapolos corrientes (monopolares) pueden en determinadas condiciones no indicar la existencia de tensión aunque ésta esté presente. Esto se debe a que en los buscapolos sencillos la corriente necesaria para que se encienda la lámpara de efluvios debe circular a través del cuerpo humano. La intensidad de esta corriente puede ser demasiado pequeña a pesar de la tensión peligrosa si existe una resistencia excesiva del punto de trabajo. En este caso la lámpara de efluvios no se encendería.

Es además imprescindible comprobar el funcionamiento del aparato para controlar la tensión inmediatamente antes de su utilización.

#### Puesta a tierra y cortocircuitado

Estas medidas adicionales garanticen que los dispositivos de protección contra sobrecorrientes se activen y desconecten si por error se sometiera la instalación a tensión antes de tiempo.

Deberá en primer lugar ponerse a tierra y a continuación cortocircuitar para que las posibles cargas existentes (en cables largos) puedan pasar a tierra.



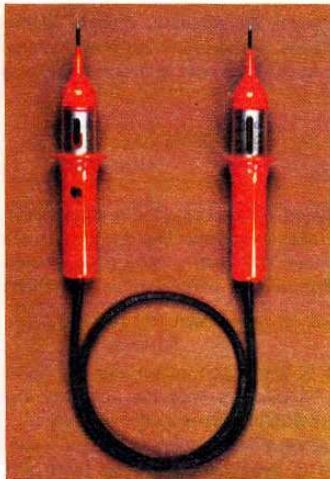


Fig. 14.18. Comprobador de tensión bipolar.

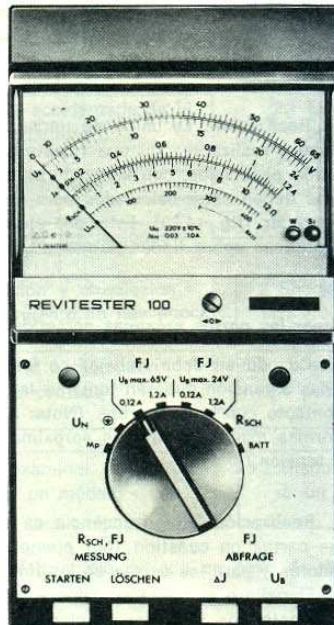


Fig. 14.19. Instrumento de medida para comprobar las medidas de protección según la norma VDE 0100.

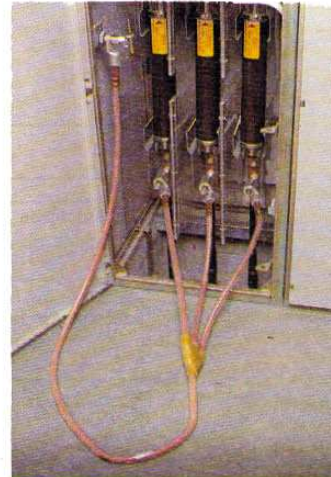


Fig. 14.20. Puesta a tierra y cortocircuitado de cables.



Fig. 14.21. Tapar y cubrir.

Al trabajar en instalaciones de hasta 1000 V de tensión nominal (excepto en líneas aéreas) puede suprimirse esta norma si ya se han respetado las normas de seguridad 1, 2 y 3.

**Realización:** La unión de tierra con los cables de fases y de éstos entre sí deberá realizarse con una resistencia mínima. Para ello se emplean cables de unión especiales, con abrazaderas, pinzas o garras de contacto, y cuyos diámetros deben estar calculados para las intensidades de cortocircuito que pudieran aparecer (fig. 14.20). Está, por ejemplo, prohibido el colocar cuerdas o cadenas metálicas sobre líneas aéreas.

#### **Tapar las partes próximas sometidas a tensión**

Cuando se deba trabajar en las proximidades de partes de circuitos sometidas a tensión deberán tomarse las medidas necesarias que impidan un posible contacto con estas partes. (Nota: En las normas VDE 0101 y VDE 0105 existen normas exactas sobre las aproximaciones permitidas a instalaciones sometidas a tensión.)

**Realización:** Con frecuencia es suficiente el tapar con materiales plásticos las partes en cuestión (por ejemplo, fundas de plástico para los soportes aisladores y para los cables en las líneas aéreas) (fig. 14.21) o vallar con rejillas.

El peligro aumenta cuando se emplean herramientas o aparatos voluminosos. Mediante una señalización clara y visible de la zona de peligro se logra una seguridad adicional.

## **14.5. Comportamiento en caso de accidentes eléctricos**

### **14.5.1. Visión general**

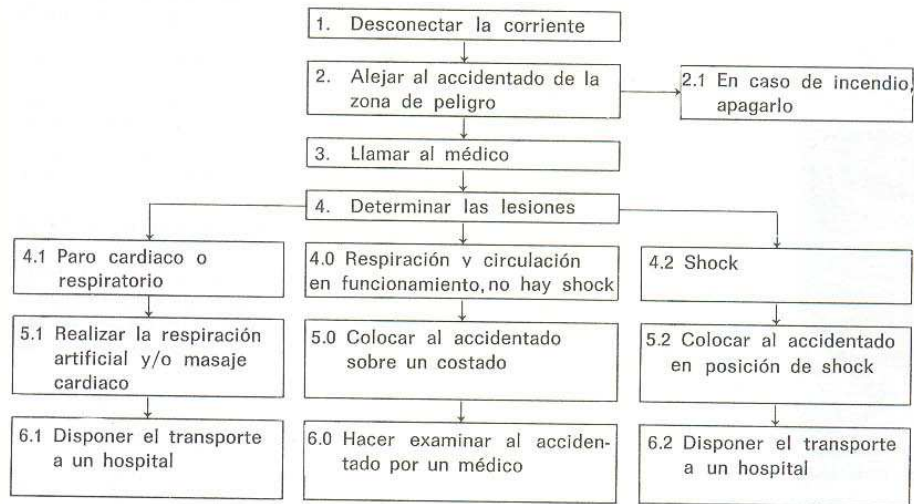
Al trabajar en instalaciones eléctricas pueden producirse accidentes a pesar de todas las medidas y normas de seguridad. En este caso es imprescindible una ayuda rápida, pues los efectos de una corriente eléctrica de duración prolongada pueden ser desastrosos (ver 14.1.2). En cuanto nos ocupemos concienzudamente de las pocas reglas de comportamiento estaremos en disposición de prestar una ayuda cuando las circunstancias lo requieran. Precisamente en los accidentes eléctricos un comportamiento incorrecto puede poner en peligro al lesionado, pero también al que le pretende ayudar. Por ello debemos leer detenidamente los párrafos siguientes y discutirlo detalladamente con el profesor.

Estos consejos no deben tomarse como sustitutivos de un cursillo de primeros auxilios, sino simplemente como **primera ayuda para cualquiera**.

#### **Primera ayuda para cualquiera**

Seguramente nos quedaremos con la impresión de que estos consejos son incompletos y quizá queramos hacer más. Sin embargo, esto sólo es posible después de seguir un cursillo adecuado, como los ofrecidos por la Cruz Roja u otras organizaciones.

**Primeros auxilios en accidentes eléctricos**



En nuestros consejos hemos seguido el principio de que **en caso de duda es mejor hacer de menos que de más.**

**14.5.2. Explicación de las normas citadas**

**1. Desconectar la corriente**

Seguro que todos intentarán, en primer lugar, desconectar la corriente, pero resulta que a veces esto no es posible con la rapidez requerida porque el accidentado bloquea el camino hacia el interruptor o fusible. En este caso deberá intentarse llegar al interruptor con un objeto aislante (por ejemplo, palo de madera) (fig. 14.22).

**2. Alejar al accidentado de la zona de peligro**

En caso de no haber podido desconectar la corriente deberá procederse con especial precaución para no quedar amenazado uno mismo ni otros. En primer lugar el que pretenda ayudar deberá aislarse respecto a tierra, lo que puede lograrse con mantas o prendas de vestir. Sólo entonces podrá moverse al accidentado. En ningún caso deberá tocársele directamente, sino que deberá alejarse de la zona de peligro por sus ropas o mediante objetos aislantes. Si ya se hubiera desconectado la corriente no deberán soltarse con violencia los dedos contraídos. En caso de duda debe hacerlo el médico.

**2.1 Apagar el fuego**

En los accidentes eléctricos se producen con frecuencia arcos voltaicos que provocan incendios. Deberán apagarse con mantas u objetos similares. ¡Precaución! Sólo podrá emplearse agua cuando se haya desconectado la corriente.

Las quemaduras del lesionado podrán enfriarse con agua, pero en ningún caso con pomadas o polvos de talco.

**3. Llamar al médico**

Antes de pasar a otras medidas deberá llamarse a un médico o una ambulancia. Antes de su llegada deberán realizarse aún las siguientes normas.



Fig. 14.22. Poner a salvo al accidentado únicamente con ganchos o barras de plástico o similares; escoger un punto aislado.

#### 4. Determinar las lesiones

Hay que determinar si además de las posibles lesiones externas (por ejemplo, quemaduras, roturas) existen dificultades o incluso paro cardíaco o de la respiración.

##### 4.1 Paro cardíaco o respiratorio

**Paro respiratorio:** Frente a la boca y la nariz se coloca un espejo. Si no se empaña existe un paro respiratorio. Otra posibilidad es colocar un trozo de papel sobre la boca y la nariz del accidentado y observar si el papel se mueve.

**Paro cardíaco:** Si las pupilas del accidentado no se estrechan al incidir sobre ellas la luz existe un paro cardíaco.

**En ambos casos deberán realizar los primeros auxilios personas preparadas especialmente para ello.** En el primer caso se realizará la respiración artificial y en el segundo, un masaje cardíaco. Es necesario darse prisa, pues la falta de oxígeno provoca que las células del cerebro mueran al cabo de unos 4 minutos. Por ello todo operario y técnico debería haber realizado un **curso de primeros auxilios** con clases especiales sobre la reanimación del corazón y los pulmones.

##### 4.2 Shock

El pulso se acelera y debilita simultáneamente. El accidentado tiene frío y tiene la frente sudorosa.

Deberá colocársele estirado sobre la espalda y levantarle las piernas para que la sangre pueda volver al cuerpo (fig. 14.23).



Fig. 14.23. Accidentado en posición de shock.

##### 5. Colocar al accidentado sobre un costado

El compañero que pretende ayudar ha comprobado ya que la respiración y la circulación funcionan y que no existe shock. Entonces deberá colocar al accidentado sobre un costado. La cabeza debe quedar ligeramente hacia atrás (figura 14.24). Además deberá protegerse al accidentado del frío, la humedad o el calor excesivos.



Fig. 14.24. Accidentado apoyado sobre un costado.

##### 6. Hacer examinar al accidentado por un médico

En cualquier caso el lesionado deberá ser examinado por un médico, ya que las lesiones internas pueden tener en determinadas condiciones efectos mortales al cabo de un cierto tiempo. Como persona que quiere ayudar deberá encargarse de que se cumpla esta norma aunque el propio accidentado no lo crea necesario.

#### Ejercicios sobre 14.4 y 14.5

1. Citar las normas de seguridad.
2. Explicar tomando un caso práctico cómo garantizaría el respeto de las normas de seguridad.
3. ¿Por qué deben seguirse las normas de seguridad en el orden indicado?
4. ¿Qué medidas hay que tomar en caso de accidente eléctrico?
5. ¿Cómo se determina la existencia de un paro cardíaco?
6. ¿Cómo se determina la existencia de un paro respiratorio?
7. ¿Cómo se determina la existencia de un shock?
8. Practicar la posición sobre un costado en que debe colocarse un accidentado.
9. ¿Por qué deberá realizar la respiración artificial o el masaje cardíaco una persona preparada especialmente para ello?
10. Describir la posición en que ha de colocarse a un accidentado que haya sufrido un shock.
11. ¿Por qué todo lesionado en accidente eléctrico debe ser examinado pronto por un médico?

## 15. Materiales

Los operarios y técnicos especialistas de las figuras 15.1 a 15.3 trabajan con diferentes materiales. Cada material fue elegido expresamente para cada uno de los procesos.

Para ello fue necesario que los correspondientes especialistas conocieran por un lado las exigencias y necesidades existentes y por otro lado que estuvieran informados exactamente de las propiedades de los diferentes materiales. A partir de estos datos puede elegirse el proceso de elaboración más adecuado y las herramientas necesarias.

Este tipo de razonamientos en cadena se realizan en principio antes de cada proceso de trabajo, pero como la mayoría de los especialistas tienen suficiente experiencia pueden elegir directamente en cada caso concreto el procedimiento y las herramientas más adecuadas. En este capítulo nos vamos a dedicar, por tanto, a las propiedades, campos de aplicación y consejos sobre la elaboración de materiales.

### 15.1. Sinopsis

#### 15.1.1. Propiedades

En este apartado vamos a explicar fundamentalmente los conceptos más frecuentes empleados en las expresiones técnicas sobre elaboración de materiales, pues muchos de ellos son desconocidos para el electricista.

Las propiedades de los materiales se clasifican en tres grupos: propiedades físicas, químicas y tecnológicas.

No siempre es posible una división clara entre ellas.

Este problema se presenta claramente con las propiedades tecnológicas, pues resultan de la combinación de otras propiedades determinadas. Ejemplo: la maquinabilidad 29 depende de la dureza, de la fragilidad y de la resistencia entre otras.

Algunas de las propiedades citadas en la tabla resumen quedan suficientemente explicadas por su propio nombre. Explicaremos brevemente las restantes. La numeración empleada sólo sirve para su caracterización y no contiene información alguna sobre la importancia de las propiedades.

1. **Densidad** es el cociente entre la masa del cuerpo y su volumen.
2. **Elasticidad** es la propiedad de un material de deformarse bajo la acción de una fuerza y volver a su forma original cuando desaparece la fuerza (figura 15.4).



Fig. 15.1.



Fig. 15.2.



Fig. 15.3.

$$[\rho] = \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$[\rho] = \frac{\text{kg}}{\text{dm}^3}$$

Resumen de las propiedades más importantes de los materiales

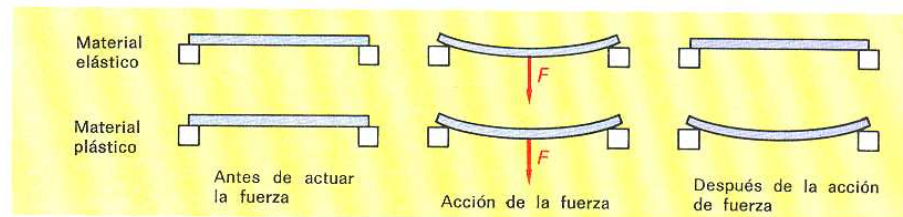
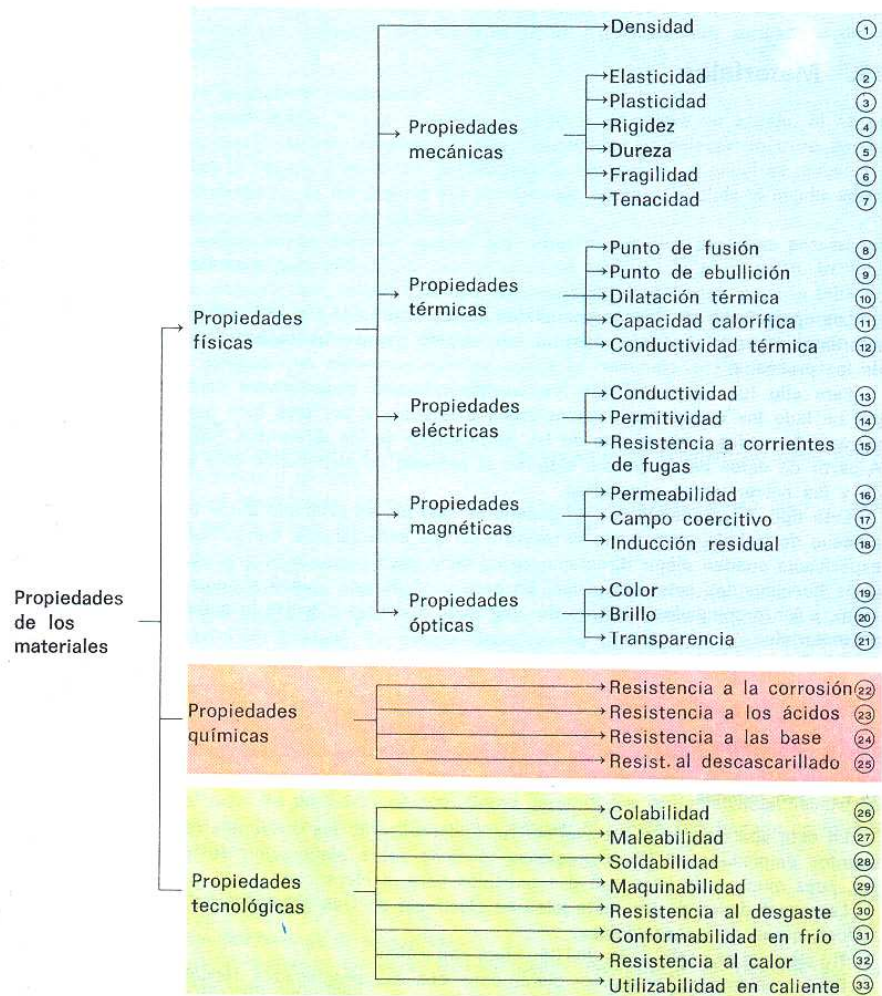
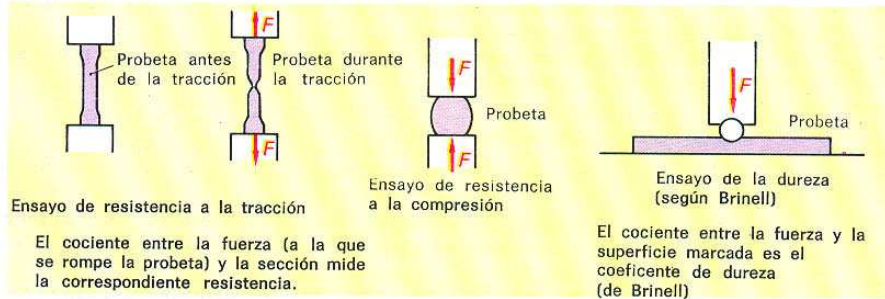
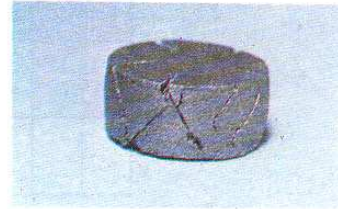


Fig. 15.4. Comparación entre un material elástico y uno plástico.



**Fig. 15.5.** Representación esquemática de los ensayos.



**Fig. 15.6.** Material frágil después de una prueba de presión.

3. **Plasticidad** es la propiedad de un material que queda deformado después de haber actuado sobre él una fuerza, o sea que no vuelve a su forma original al desaparecer la fuerza (fig. 15.4).

4. La **rigidez** de un material se refiere a la rotura o fractura. Se distinguen resistencia a la tracción, a la presión, a la flexión, al corte o cizalladura y a la torsión (fig. 15.5).

5. **Dureza** es la resistencia que opone un material a la penetración en él de otro objeto (fig. 15.5).

6. **Fragilidad** es la propiedad de un material que se rompe sin variar su forma (fig. 15.6).

7. La **tenacidad** es la propiedad inversa de la fragilidad. Los materiales tenaces presentan considerables deformaciones plásticas bajo la acción de una fuerza antes de llegar a romperse.

8. **Punto de fusión** es la temperatura a la que el cuerpo sólido se convierte en líquido.

9. **Punto de ebullición** es la temperatura a la que el cuerpo líquido se convierte en gaseoso.

10. **Dilatación térmica** es el incremento del volumen al aumentar la temperatura. En los cuerpos sólidos se suele emplear también el coeficiente de dilatación lineal  $\alpha$  (fig. 15.7).

11. La **capacidad calorífica** es la cantidad de calor necesaria para calentar un material. Si se refiere a la unidad de masa se denomina **calor específico**.

12. La **conductividad térmica** es la propiedad de un material de conducir el calor a su través.

13. **Conductividad eléctrica** (ver 3.2).

14. **Permitividad** (ver 11.2.3).

15. **Resistencia a las corrientes de fugas** es la resistencia que presentan los materiales aislantes a las corrientes que circulan por la superficie del objeto (corrientes de fugas).

16, 17, 18. Ver apartado 12.1.9.

22. **Resistencia a la corrosión** es la propiedad de los materiales que se oponen a su destrucción por reacciones químicas o electroquímicas con el medio ambiente.

25. **Resistencia al descascarillado** se refiere a la acción del aire y de gases de hornos a elevadas temperaturas.

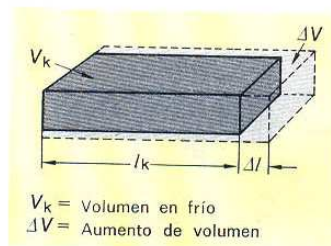
29. La **maquinabilidad** significa que el material puede ser mecanizado por arranque de virutas.

30. **Resistencia al desgaste** se refiere a la destrucción indeseada de la superficie del material; por ejemplo debido al rozamiento.

$$[\gamma] = \frac{1}{K}$$

$$[c] = \frac{J}{kg \cdot K}$$

$$[\lambda] = \frac{W}{K \cdot m}$$



**Fig. 15.7.** Dilatación térmica de un cuerpo.

32. La **resistencia al calor** es la oposición de un material a su destrucción a causa de temperaturas elevadas.

33. **Utilizabilidad en caliente** es la propiedad de un material que puede ser empleado a altas temperaturas.

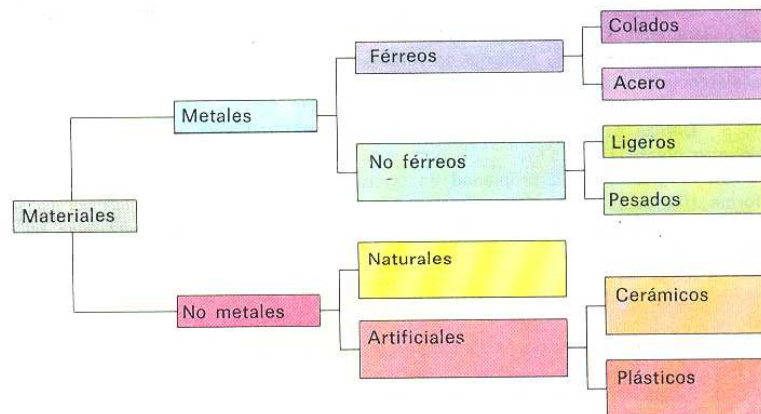
### 15.1.2. Clasificación de los materiales

En este apartado vamos a conocer la clasificación de los materiales utilizada en metalurgia.

Para ello se procede según criterios tecnológicos, esto es, los elementos, sus compuestos y aleaciones se clasifican en grupos de propiedades y aplicaciones técnicas similares.

Por tanto, cuando hablemos de metales no nos referiremos exclusivamente a los elementos, sino también a sus aleaciones.

#### Clasificación de los materiales (sinopsis)



Distinguimos los materiales que se encuentran en la naturaleza de aquellos otros que han sido elaborados.

Los materiales que se encuentran en la naturaleza se denominan materias primas. Ejemplo: mineral de hierro.

Las materias primas elaboradas se denominan materiales. Ejemplo: acero.

En la tabla periódica simplificada hemos distribuido a los elementos según el número total de electrones que poseen y según el número de electrones de su capa exterior. Los símbolos de los elementos se encuentran sobre un fondo de color igual al correspondiente en la sinopsis de clasificación de materiales. Podemos ver que los elementos con propiedades comunes ocupan posiciones vecinas.

#### Explicación de los conceptos de la sinopsis:

Los **metales** se diferencian considerablemente de las de los demás materiales por su estructura y propiedades.

Una de las características de los metales es la distribución de sus átomos (mejor núcleos atómicos) en una estructura tridimensional. Cuando se solidifi-

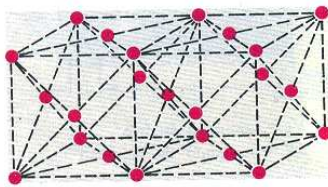


Fig. 15.8. Modelo de una red cristalina cúbica de caras centradas.



Tabla periódica de los elementos (simplificada)

H 1																	He 2
Li 3	Be 4											B 5	C 6	N 7	O 8	F 9	Ne 10
Na 11	Mg 12											Al 13	Si 14	P 15	S 16	Cl 17	Ar 18
K 19	Ca 20	Sc 21	Ti 22	V 23	Cr 24	Mn 25	Fe 26	Co 27	Ni 28	Cu 29	Zn 30	Ga 31	Ge 32	As 33	Se 34	Br 35	Kr 36
Rb 37	Sr 38	Y 39	Zr 40	Nb 41	Mo 42	Tc 43	Ru 44	Rh 45	Pd 46	Ag 47	Cd 48	In 49	Sn 50	Sb 51	Te 52	I 53	Xe 54
Cs 55	Ba 56	Lan táni dos	Hf 72	Ta 73	W 74	Re 75	Os 76	Ir 77	Pt 78	Au 79	Hg 80	Tl 81	Pb 82	Bi 83	Po 84	At 85	Rn 86
Fr 87	Ra 88	Acti- nidos	Ku 104	Ha 105	106	107											

Metales ligeros   
  Metales pesados   
  Metales nobles   
  Semimetales   
  No metales  
 Gases nobles

can las fundiciones metálicas aparecen cristales en diferentes puntos que se forman totalmente independientes unos de otros. Los átomos, que hasta esta temperatura son relativamente móviles, se unen unos con otros, formando gérmenes sobre los que se depositan otros átomos. Así se forman cristalitas (o sea varios cristales) o granos. Las cristalitas metálicas, que crecen a gran velocidad, chocan unas con otras y dan lugar a unos límites irregulares entre los diferentes granos. Las cuatro fases de este proceso se encuentran representadas esquemáticamente en la figura 15.9.

Si en la fundición se encuentran átomos extraños sobre ellos se formarán los gérmenes de las cristalitas.

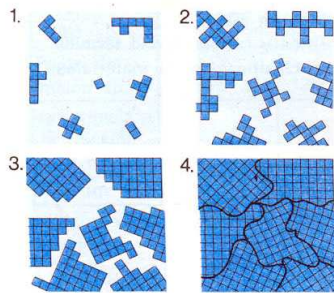
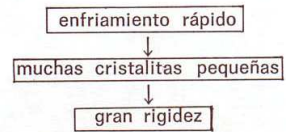


Fig. 15.9. Representación esquemática del crecimiento de un cristal.

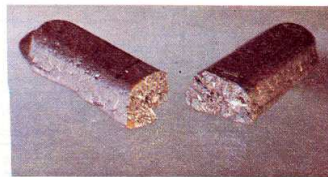


Fig. 15.10. Lingote de zinc fraccionado.

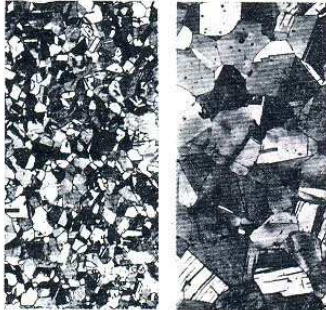


Fig. 15.11. Estructura de dos fundiciones enfriadas (a igual ampliación).

Metales ligeros  $< 5 \frac{\text{kg}}{\text{dm}^3}$   $<$  Metales pesados



Fig. 15.12. Herramientas de acero.

El número de cristalitas y con él también su tamaño depende de la velocidad de enfrentamiento. De ella dependen, pues, la rigidez y dureza del material, pues un conglomerado de granos grandes facilita más el que las diferentes estructuras cristalinas puedan deslizarse unas sobre otras.

En las piezas metálicas rotas puede reconocerse con frecuencia a simple vista la estructura cristalina (fig. 15.10). Los cristales muy pequeños sólo pueden verse al microscopio. Para ello se lima una pieza del metal correspondiente y a continuación se la ataca con ácido. Como las diversas redes cristalinas están orientadas según diferentes direcciones, reflejarán la luz incidente según ángulos diferentes, con lo que veremos los diferentes granos coloreados en tonos diversos (fig. 15.11).

La estructura cristalina de los metales es también la causa de su brillo característico. Excepto el cobre y el oro, así como sus aleaciones, todos los demás metales tienen un color gris-blanco, con un brillo azulado en algunos.

Otras propiedades características de los metales son:

- gran tenacidad y rigidez
- buena aleabilidad
- gran conductividad térmica y eléctrica.

Se denominan **metales ligeros** aquellos cuya densidad es menor que  $5 \text{ kg/dm}^3$ . A pesar del gran desarrollo de los plásticos los más empleados siguen siendo los **materiales féreos**. En el apartado 15.2 los trataremos con más detalle.

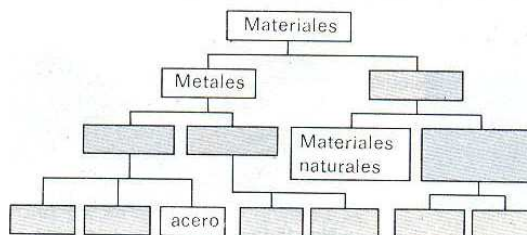
Los **no metales** no forman un grupo uniforme. Existen gran cantidad de posibles grupos. Sólo trataremos algunos de ellos, por ejemplo en 15.5 y 15.6. En otros apartado ya hemos citado algunos no metales y sus aplicaciones, bien sea como componentes de aleaciones o como mezcla indeseada que empeora las propiedades de los materiales.

Los **materiales naturales** son aquellos que se obtiene de la elaboración y transformación de materias primas, por ejemplo madera.

Los **materiales artificiales**, en cambio, se fabrican fundamentalmente mediante procedimientos químicos. Un grupo de ellos lo constituyen los plásticos, con cuya denominación queremos obtener una delimitación clara con respecto a los demás materiales fabricados artificialmente.

#### Ejercicios sobre 15.1

1. Describir la diferencia entre la zona plástica y la zona elástica en los materiales.
2. Explicar la diferencia entre rigidez y dureza de un material.
3. Explicar la diferencia entre capacidad calorífica y conductividad térmica.
4. Copiar la figura y completar el resumen de clasificación de materiales.



5. Nombrar las propiedades características de los metales.

**15.2. Materiales féreos**

De los materiales corrientes en la actualidad los aceros son los más empleados. Este hecho se explica principalmente por la multitud de posibles aplicaciones de los aceros, pues mediante la adición de las sustancias adecuadas pueden presentar propiedades muy diferentes (ver 15.2.1).

Todos nosotros nos encontramos a diario con este material, especialmente en la vida profesional, pues la mayoría de nuestras herramientas son de **acero**.

El acero es una aleación maleable de hierro y carbono, con un porcentaje de este último entre el 0,05 % y el 2,06 %.

El **hierro colado** contiene una cantidad mayor de carbono. No se emplean materiales con más de un 4 % de carbono a causa de su reducida rigidez.

**Formas comerciales:** acero conformado, barras de acero, acero de fleje ancho, chapas, tubos, perfiles de acero.

**15.2.1. Propiedades del acero**

Cuando machacamos con un martillo un clavo en una pared, el material de ambos es acero. Como las exigencias que imponemos en ambos son muy diferentes, aunque utilizamos acero en ambos casos, deberemos poder variar en amplios márgenes las propiedades de este material.

La tabla 15.1 nos ayudará a comprender este hecho. En la segunda columna se encuentran los valores del hierro puro. En la tercera están los valores mínimos y máximos de los diferentes tipos de acero. La última columna contiene los valores para el acero expresados en porcentaje del valor correspondiente para el hierro. Podemos obtener así una idea clara de las posibles variaciones de las propiedades del acero.

**Tabla 15.1: Comparación de las propiedades del acero y del hierro puro**

Propiedad	Hierro puro ( $\cong 100\%$ )	Acero	
		Valores absolutos	en % (referido al hierro)
Densidad en $\frac{\text{kg}}{\text{dm}^3}$	7,88	7,4...7,95	94...101
Punto de fusión en $^{\circ}\text{C}$	1536	1200...1500	82...98
Resistencia a la tracción en $\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$	180	330...1900	183...1055
Conductividad térmica en $\frac{\text{W}}{\text{K}\cdot\text{m}}$	73	12,5...54,3	17...74
Inducción residual en T	max. 1,1	0,53...1,35	48...123

**Hierro**  
Símbolo Fe  
(latín: ferrum)

**0,05 % C < Acero < 2,06 % C**



**Fig. 15.13.**  
Fijación de una línea plana.  
Unidad Operativa SENATI - Abancay

*Prof. Elvia Gomez Rosales*



Fig. 15.14. Microfotografía de una estructura con gran contenido de cementita (la cementita es la red blanca entre los límites de los granos).

Estas grandes diferencias en las propiedades del acero se consiguen mediante

- diferentes **porcentajes de carbono**
- diferentes **componentes en la aleación**, y
- diferentes **tratamientos posteriores**.

#### Influencia del contenido de carbono

El hierro puro es relativamente blando, pero se vuelve duro al alearlo con el carbono. Para ello es de suma importancia un compuesto de carbono y hierro, el carburo de hierro ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ), también llamado cementita (fig. 15.14). Podemos, por tanto, llegar a la conclusión de que la dureza aumenta con el contenido de carbono, o sea con la proporción de cementita existente.

Simplificando podemos deducir que también aumentará la rigidez.

Sin embargo, cuanto más duro y resistente sea un material, más difícil será deformarlo, o sea prensarlo, forjarlo, etc.

Resumiendo podemos decir del acero:

Un aumento del contenido de carbono provoca un aumento de la dureza y de la rigidez, pero una reducción de la conformabilidad.

Al enfriar lentamente la fundición de hierro y carbono se formarán consecutivamente diferentes estructuras cristalinas según cuál sea la temperatura y el contenido de carbono. En cambio, al enfriar rápidamente se saltarán algunas fases provocando otras estructuras. Entraremos en más detalles en el apartado 15.2.3.

#### Influencia de los componentes de la aleación

La influencia de los componentes de la aleación consiste fundamentalmente en desplazar los márgenes de temperatura a los que se forman las diferentes configuraciones cristalinas. Algunas de ellas aparecen antes y otras más tarde que en las aleaciones puras de hierro y carbono. De este modo se modifican considerablemente las propiedades del acero. El valor y el tipo de las modificaciones debidas a los componentes de la aleación dependen de la estructura cristalina que formen sus átomos y de su tamaño.

#### Denominaciones:

Las composiciones y, por tanto, también las propiedades de los diferentes tipos de aceros están normalizadas. Se clasifican según el grado de aleación con otras sustancias en

- aceros no aleados,
- aceros de baja aleación,
- aceros de aleación alta.

Los tipos de acero denominados no aleados contienen también otras sustancias pero en porcentajes muy reducidos. Los aceros no aleados se clasifican en

- aceros de construcción
- aceros de cementación y aceros mejorados, y
- aceros para herramientas.

Las distintas denominaciones se adaptan a esta clasificación.

Los **aceros de construcción** se caracterizan mediante las letras «St» y el valor de la mínima resistencia a la tracción.

Ejemplo: St 37.

Acero de construcción no aleado con una resistencia mínima a la tracción de 360 N/mm<sup>2</sup>.

Los **aceros de cementación y los mejorados** se caracterizan con la letra C y el contenido de carbono.

Ejemplo: C 45.

Acero de cementación no aleado con un 0,45 % de carbono.

Los **aceros para herramientas** se caracterizan como los de cementación y mejorados añadiendo la letra W y una cifra que indica la clase de calidad.

Ejemplo: C 100 W 2.

Acero no aleado para herramientas con un 1 % de carbono y calidad 2.

Los **aceros aleados** (de baja y de alta aleación) se denominan mediante la combinación de los símbolos químicos y los porcentajes de los componentes de la aleación.

Ejemplo: 30 CrNiMo 8.

Acero aleado con 0,3 % de carbono, 2 % de cromo, 0,4 % de molibdeno y 2 % de níquel.

Según la norma DIN 17007 todos los materiales pueden caracterizarse también mediante el número del material, de 7 cifras. La primera cifra indica el material fundamental, por ejemplo:

- 1 para el acero,
- 2 para los metales pesados (sin hierro),
- 3 para los metales ligeros.

Las cuatro cifras siguientes indican la composición, por ejemplo 01 12 = acero de construcción St 37-2.

Las dos últimas cifras dan información sobre el método de obtención y tratamiento, por ejemplo 61 = acero calmado Martin-Siemens, recocido normal.

### 15.2.2. Tratamiento del acero

Supongamos que se nos ha roto la punta de un destornillador y que la renovamos con una máquina rectificadora. A continuación es posible que observemos que el destornillador se torsiona al intentar atornillar porque se ha vuelto blando. ¿Qué es lo que ha ocurrido? (figs. 15.15 y 15.16).

Al limarlo el objeto se calentó, y se modificó su estructura interna.

A continuación vamos a explicar lo sucedido con más detalles.

#### Temple

Al temple se aprovecha el fenómeno de que al enfriarse rápidamente la estructura interna se transforma de manera diferente que cuando el descenso de la temperatura es lento (influencia del contenido de carbono).

El temple se realiza en dos fases. Primero se calienta el acero hasta 720...900° C. A continuación se enfría la pieza rápidamente (por ejemplo, en agua), con lo que no puede formarse ninguna otra estructura. El carbono queda retenido en la estructura cristalina del hierro, con lo que aparecen deformaciones y desplazamientos de los retículos cristalinos. Estas fuerzas provocan una mayor dureza exterior ya que oponen una gran resistencia a la penetración de la herramienta de mecanización. Esta nueva estructura es aproximadamente 250 veces más dura que la del hierro puro.

#### Revenido

Con el temple aparecen también tensiones mecánicas indeseadas que hacen que el material sea muy sensible. Además es frecuente que el material resulte demasiado duro para determinados fines. Por ello se vuelve a calentar la pieza en



Fig. 15.15.



Fig. 15.16.

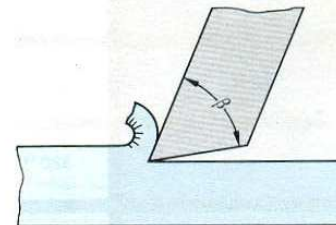


Fig. 15.17. Angulo de filo en la cuchilla de una herramienta.

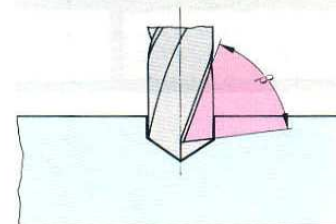


Fig. 15.18. Angulo de filo de una broca.

Unidad Operativa SENATI - Abancay

Colores de revenido



cuestión hasta una temperatura previamente fijada con exactitud, con lo que ocurren una serie de transformaciones en la estructura, que llevan consigo la desaparición de una parte de la dureza.

Como también ahora es decisivo el contenido de carbono, los fabricantes de aceros prescriben unas temperaturas exactamente determinadas para sus productos. Comparando el color del material caliente con los colores de la tabla de revenido puede determinarse, y por tanto mantenerse, exactamente la temperatura prescrita.

15.2.3. Datos sobre su mecanizado

Las propiedades tecnológicas y físicas de los materiales determinan los procedimientos de mecanizado así como las propiedades y formas de las herramientas, por ejemplo el ángulo de filo. Por tanto, debe conocerse la dureza y rigidez del objeto a mecanizar para elegir la cuchilla de forma adecuada. La oposición a la penetración de una cuña o filo es muy grande en los materiales duros y rígidos. Por ello la cuchilla deberá ser robusta, o sea que el ángulo de filo de una herramienta para mecanizar acero deberá ser grande (figs. 15.17 y 15.18).

Ángulo de filo  $\beta = 65^\circ \dots 85^\circ$  (según la dureza)

No sólo el ángulo de filo desempeña un papel importante en la mecanización por arranque de virutas sino también el ángulo de ataque  $\gamma$  y el ángulo de despullo  $\alpha$  (fig. 15.19).

Del ángulo de despullo depende primordialmente el rozamiento existente entre la pieza a mecanizar y la cuchilla, por lo que de él dependerá también la duración de la herramienta. En los materiales tenaces y elásticos como el acero, el ángulo de despullo deberá ser relativamente grande porque el material cede ligeramente detrás de la cuchilla y llena parcialmente el espacio intermedio (fig. 15.20).

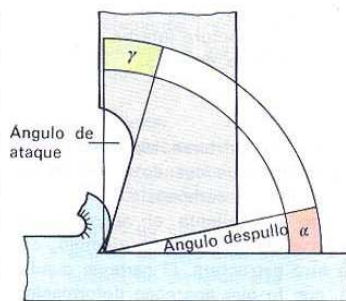


Fig. 15.19. Ángulos de ataque y de despullo.

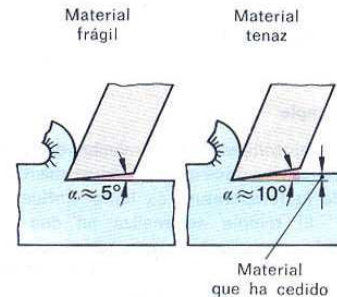


Fig. 15.20. Ángulos de despullo para un material frágil y para uno tenaz.

Ángulo de despullo  $\alpha = 8^\circ$

Del ángulo de ataque depende fundamentalmente la formación de virutas, que también se ve influida por la **velocidad de corte**. Si el ángulo de ataque es pequeño las partículas del material serán aplastadas y empujadas por la cuchilla, con lo que se formarán virutas cortas. Con ángulos de ataque mayores, en

cambio, se puede cortar más material, formándose virutas largas y rizadas. Sin embargo, este tipo de mecanizado sólo es posible en materiales blandos, pues si los materiales fueran duros las cuchillas quedarían clavadas.

**Ángulo de ataque:**  $\gamma$   $0^\circ \dots 14^\circ$  (según la dureza)

La **velocidad de corte** también depende de las propiedades del material. Cuanto más rígido sea éste mayor será el calentamiento durante el mecanizado. Por tanto, para materiales duros deberán elegirse pequeñas velocidades de corte. Para el acero no podemos indicar valores que tengan validez general, pues la utilizabilidad en caliente de las herramientas y la refrigeración durante el mecanizado desempeñan un papel muy importante. Para poder elegir la velocidad adecuada existen unas tablas que tienen en cuenta las diferentes condiciones.

A partir de estas consideraciones generales podemos indicar algunas características de las herramientas especiales para la mecanización del acero.

**Limas:** Limas de surcos cruzados con ángulo de ataque negativo, aproximadamente  $-15^\circ$  (fig. 15.21). Para limar acero es conveniente emplear limas ya usadas, pues las nuevas se desgastan muy rápidamente.

**Sierras:** El ángulo de filo de las sierras de metal es  $50^\circ$  para que exista un ángulo de despulpo suficiente para albergar las virutas (fig. 15.23).

Las sierras de mano presentan un ángulo de ataque de  $0^\circ$  para evitar que los dientes puedan quedar trabados.

Para distribuir mejor las fuerzas de reacción al mecanizar materiales duros se aumenta el número de dientes (fig. 15.24). Por ello las sierras para cortar acero poseen 22 y más dientes por cada 25 mm ( $25,4 \text{ mm} = 1 \text{ in}!$ ).

**Brocas:** De acero rápido (SS) y de acero rápido y gran rendimiento (HSS) con ángulo de ataque lateral de  $22^\circ$  (fig. 15.25), y para aceros muy duros, de aproximadamente  $12^\circ$ . El ángulo de punta vale  $118^\circ$ .



Fig. 15.21. Lima de surcos cruzados.

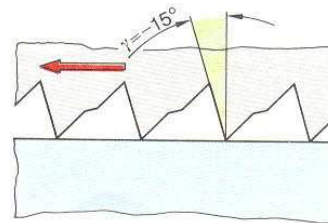


Fig. 15.22. Ángulo de ataque en una lima

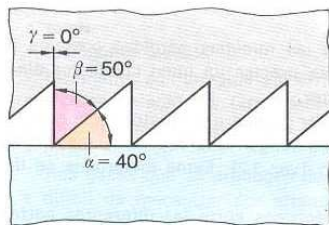
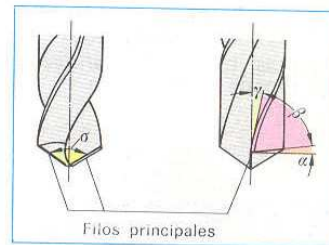


Fig. 15.23. Ángulos en una sierra de arco.

	5	10	15	20	25,4
	mm				
	1 in				
Aluminio	Gruesa				
Cobre	5 10 15				
	Dientes				
Acero	Media				
St 37	5 10 15 20 22				
	Dientes				
Acero	Fina				
St 60	10 20 30 33				
	Dientes				

Fig. 15.24. Diferentes dientes en las hojas de sierras.



$\alpha$  = Ángulo de despulpo  
 $\beta$  = Ángulo de filo  
 $\gamma$  = Ángulo de ataque lateral  
 $\sigma$  = Ángulo de punta

Fig. 15.25. Ángulos en los filos de una broca.

Ejercicios sobre 15.2

1. ¿Cuál es el punto de fusión del hierro?
2. ¿Cuáles son las propiedades del acero que aumentan considerablemente cuando aumenta el contenido de carbono?

3. ¿Para qué se revienen los aceros templados?
4. ¿Con qué número de dientes elegiría una sierra para cortar acero?  
 $z_1 = 15$  dientes;  $z_2 = 25$  dientes;  $z_3 = 35$  dientes
5. ¿Cuál(es) de las siguientes brocas elegiría para perforar acero?

Broca	Material	Angulo de punta	Angulo de ataque lateral
1	HSS	90°	12°
2	SS	118°	12°
3	SS	118°	22°
4	SS	118°	40°

### 15.3. Materiales conductores

Observando el esquema de la lámpara de la figura 15.26 podemos reconocer tres materiales que tienen diferentes funciones. Estas dependen de la conductividad eléctrica de los materiales (fig. 15.27).

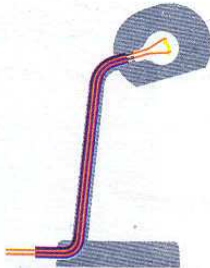


Fig. 15.26. Diferentes materiales en una lámpara de sobremesa.

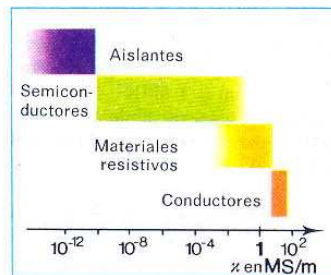


Fig. 15.27. Conductividad de materiales.



Fig. 15.28. Broca de tipo N para acero.

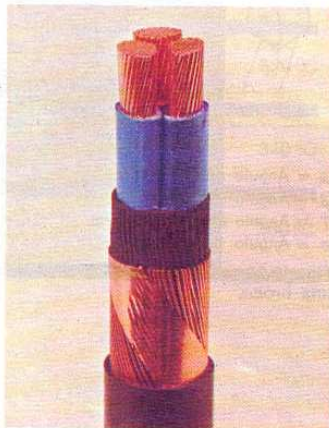


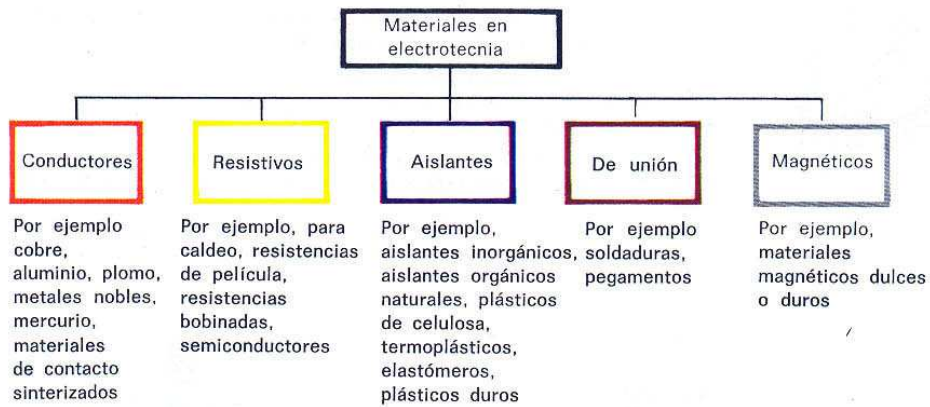
Fig. 15.29. Cable de cobre.

- La energía eléctrica debe llevarse con las mínimas pérdidas posibles al «convertidor», o sea al filamento. Para ello se precisa un buen conductor eléctrico, que será, pues, de un **material conductor**.
- En el «convertidor» se ha de transformar la energía eléctrica en energía térmica. Para ello se precisan materiales que tengan una resistencia eléctrica mucho mayor que los cables de alimentación (ver 3.2). Estos materiales se llaman **materiales resistivos**.
- Para que no se produzcan contactos eléctricos entre las diferentes partes conductoras o con el cuerpo humano se colocan entre ellos materiales de resistencia eléctrica muy elevada, llamados **materiales aislantes**.

Estas consideraciones desde el punto de vista de las aplicaciones dan lugar a una clasificación de los materiales diferente a la metalúrgica (ver 15.1.2) y mucho más corriente en electrotecnia. Los diversos materiales se clasifican según su campo principal de aplicación. Naturalmente sucede también que algunos elementos y compuestos deban ser citados varias veces, por ejemplo el cobre como material conductor y también como material resistivo.



**Sinopsis de los materiales empleados en electrotecnia**



**15.3.1. Cobre, símbolo Cu (latín: cuprum)**

**Propiedades**

Color	Densidad	Punto de fusión	Conductividad eléctrica	Conductividad térmica	Calor específico	Resistencia a la tracción
Marrón rojizo	$8,93 \frac{\text{kg}}{\text{dm}^3}$	$1083^\circ\text{C}$ (1356 K)	$56 \frac{\text{MS}}{\text{m}}$	$395 \frac{\text{W}}{\text{K m}}$	$0,39 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$	$220 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

El cobre es

- tenaz
- **fácilmente aleable**
- fácilmente conformable sin arranque de viruta, sobre todo en frío
- **fácilmente soldable** (con material de aporte)
- de fácil soldadura autógena en atmósfera de gas protector
- difícil de colar  
(los gases que se producen dan lugar a un material poroso)
- difícil de mecanizar por arranque de virutas porque «unta»
- resistente a la corrosión

**Aplicaciones**

La combinación de todas estas propiedades hace al cobre muy versátil. Aproximadamente la mitad de la producción mundial se emplea en electrotecnia con fines conductores. En este caso es de gran importancia que sea muy puro para lograr la elevada conductividad eléctrica deseada. El **cobre electrolítico** o afinado tiene una pureza de hasta el **99,98 %**

**Formas comerciales:** Chapas, cintas, barras, hilos, tubos, perfiles.

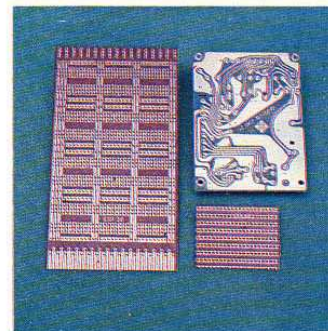


Fig. 15.30. Platinas con pistas de cobre.

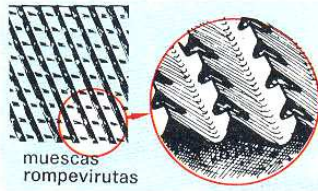


Fig. 15.31. Lima fresada.

#### Datos sobre su mecanizado

Como el cobre es muy blando deberá prestarse especial cuidado a los ángulos de las cuchillas de mecanizar por arranque de virutas.

El ángulo de filo puede ser pequeño:  $\beta = 50^\circ \dots 60^\circ$ .

El ángulo de ataque debe ser grande:  $\gamma = 20^\circ \dots 30^\circ$ .

El ángulo de despullo debe ser grande:  $\alpha = 10^\circ$ .

De aquí se deducen las exigencias requeridas para las herramientas:

**Limas:** Se emplean limas fresadas con ángulo de ataque positivo y muescas rompevirutas (fig. 15.31).

**Sierras:** Se deben utilizar sierras con pocos dientes (aproximadamente 15 por cada 25 mm) y un ángulo de filo pequeño. El corte libre (fig. 15.33) debe ser grande.

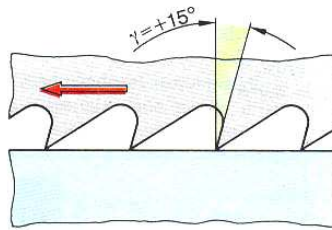


Fig. 15.32. Ángulo de ataque lateral en las limas fresadas.

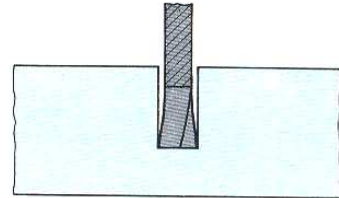


Fig. 15.33. Corte libre al serrar.



Fig. 15.34. Broca de tipo W.

**Brocas:** Se emplearán brocas con gran ángulo de punta ( $140^\circ$ ) y gran ángulo de ataque lateral ( $35^\circ \dots 40^\circ$ ). El material de la herramienta puede ser acero para herramientas. La velocidad de corte puede ser doble que en el acero.

#### Obtención

En un baño de ácido sulfúrico y sulfato de cobre se cuelgan placas de «cobre negro» (cobre impuro), que son los ánodos, y barras de cobre muy puro, que son los cátodos. A continuación se aplica una tensión pequeña (aproximadamente 1 V).

Debido a la gran conductividad de la solución circulará una corriente muy intensa, de unos 200 A por  $m^2$  de superficie de placa. Los iones positivos de cobre irán al cátodo, donde se depositarán.

Las impurezas caen al fondo de la cuba a lo largo del proceso dando lugar al barro anódico, que como contiene metales nobles en pequeñas cantidades se vuelve a tratar convenientemente.

#### 15.3.2. Aleaciones de cobre

De las diversas aleaciones de cobre en electrotecnia desempeñan un papel importante los diversos tipos de latón y de bronce, por lo que sólo trataremos estas dos aleaciones:

**Latón = cobre + zinc**

El **latón** es una aleación de cobre y zinc. Según la norma DIN 17660 deberá denominarse, pues, **aleación de cobre y zinc** aunque el nombre latón también está permitido.

**Propiedades del latón** 85% Cu...55% Cu  
15% Zn...45% Zn

Color	Rojo dorado Amarillo verdoso
Densidad	8,73...8,4 $\frac{\text{kg}}{\text{dm}^3}$
Punto de fusión	1030...870°C
Conductividad eléctrica	20...8 $\frac{\text{MS}}{\text{m}}$
Conductividad térmica	155...54 $\frac{\text{W}}{\text{K m}}$
Calor específico	0,39 $\frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$
Resistencia a la tracción	260...530 $\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

A partir de estos valores podemos concluir que al alea el cobre con zinc se pueden variar las propiedades en amplios márgenes.

El latón es

- fácil de soldar (con material de aporte)
- más fácil de soldar autógenamente que el cobre
- difícil de colar
- fácil de mecanizar sin arranque de virutas.

#### Aplicaciones

El latón se emplea frecuentemente cuando otros tipos de cobre de baja aleación no reúnen las exigencias mecánicas y tecnológicas y no se puede emplear acero, bien porque el material deba ser buen conductor o porque no deba imantarse (figs. 15.36 y 15.37). Por ello el latón tiene una gran difusión en la electrotecnia.

**Formas comerciales:** chapas, cintas, tubos, barras, hilos, perfiles.

Una aleación de tres componentes formada por cobre, níquel y zinc se emplea preferentemente para resortes de contacto, pues tiende menos a oxidarse que el latón. Esta aleación se denomina **alpaca** y también **plata nueva o alemana** debido a su color claro.

#### Datos sobre su mecanizado

El latón es más rígido que el cobre y precisa, pues, los siguientes ángulos para ser mecanizado:

- Ángulo de filo:  $\beta = 80^\circ$
- Ángulo de ataque:  $\gamma = 3^\circ$
- Ángulo de despullo:  $\alpha = 7^\circ$ .

De esto resultan herramientas similares a las utilizadas para el acero.

#### Bronce = cobre + estaño

El **bronce** es una aleación de cobre y estaño. Antiguamente se denominaban también bronce otras aleaciones de cobre, como por ejemplo el bronce de aluminio, el bronce de plomo. Según la norma DIN 17662 para estas otras aleaciones

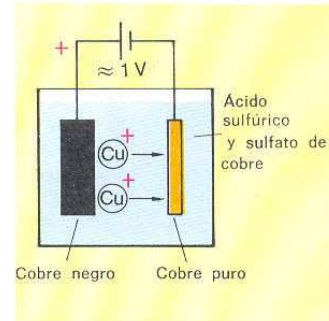


Fig. 15.35. Obtención de cobre electrolítico (esquema)



Fig. 15.36.

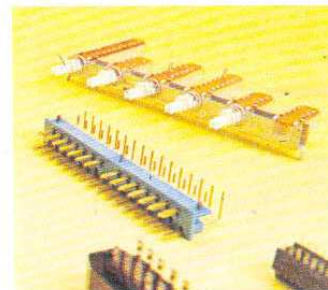


Fig. 15.37.

se deberá emplear la denominación que resulte de sus componentes principales, por ejemplo aleación de cobre y aluminio.

#### Propiedades del bronce

Color	Marrón rojizo
Densidad	aprox. $8,8 \frac{\text{kg}}{\text{dm}^3}$
Punto de fusión	aprox. $990^\circ\text{C}$
Conductividad eléctrica	aprox. $9 \frac{\text{MS}}{\text{m}}$
Conductividad térmica	aprox. $70 \frac{\text{W}}{\text{K} \cdot \text{m}}$
Calor específico	aprox. $0,37 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$
Resistencia a la tracción	$260 \dots 590 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$



Fig. 15.38. Piezas de alpaca.



Fig. 15.39. Broca de tipo H para latones de viruta corta.

#### Aplicaciones

En electrotecnia el bronce se emplea fundamentalmente para la fabricación de máquinas, en concreto para los resortes, flejes y cintas de alimentación de corriente de los rotores. También se emplea como disipador de calor en los tubos canjeadores.

**Formas comerciales:** Cintas, barras, tubos, cables.

#### Datos sobre su mecanizado

Como el bronce es más duro que el latón, para su mecanización se utilizarán las mismas herramientas que para los aceros duros.

**Aluminio**  
Símbolo Al

#### 15.3.3. Aluminio

##### Propiedades

Color	Blanco
Densidad	$2,7 \frac{\text{kg}}{\text{dm}^3}$
Punto de fusión	$660^\circ\text{C}$ (837 K)
Conductividad eléctrica	$36 \frac{\text{MS}}{\text{m}}$
Conductividad térmica	$210 \frac{\text{W}}{\text{K} \cdot \text{m}}$
Calor específico	$0,92 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$
Resistencia a la tracción	$70 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

El aluminio es

- blando
- fácilmente aleable
- fácil de conformar sin arranque de virutas, especialmente en frío
- fácil de mecanizar con arranque de virutas  
(vigilar los ángulos de ataque pequeños y las grandes velocidades de corte)
- fácil de soldar (autógenamente)
- limitadamente soldable (con material de aporte)
- limitadamente colable (por ello: fundición a presión)
- **resistente al agua y a los ácidos**
- corrosible con agua de mar y con lejías

El aluminio expuesto al aire queda recubierto por una capa de óxido de aluminio, que es muy dura y densa, por lo que la oxidación no puede continuar su penetración. La capa de óxido es muy delgada (aprox.  $0,01 \mu\text{m} = 0,00001 \text{ mm}$ ). Cuando esta capa resulta dañada ella misma se «autorregenera», o sea que el aluminio que queda descubierto se vuelve a revestir rápidamente con una nueva capa de óxido.

#### Aplicaciones

La combinación de una densidad muy pequeña y de sus buenas propiedades mecánicas y tecnológicas así como su resistencia a la corrosión ha dado lugar a que el aluminio sea actualmente el metal más utilizado después del acero.

En electrotecnia el aluminio se emplea fundamentalmente gracias al cociente conductividad/peso, que es muy pequeño y, por tanto, favorable. La deducción siguiente nos ayudará a comprenderlo mejor: el cobre tiene una conductividad eléctrica de  $56 \text{ MS/m}$  y, por tanto, conduce mejor que el aluminio ( $36 \text{ MS/m}$ ). Si formamos el cociente de las dos conductividades obtenemos:

$$\frac{56}{36} = \frac{1,6}{1}$$

Si queremos obtener la misma conductancia con el aluminio que con el cobre, a la misma longitud la sección del conductor de aluminio deberá ser 1,6 veces mayor que la de cobre, por tanto el volumen también será 1,6 veces mayor. Sin embargo, la densidad del aluminio es sólo aproximadamente  $1/3$  de la densidad del cobre:

$$\frac{2,7}{8,9} = \frac{1}{3,3}$$

Por tanto, la masa necesaria del aluminio será aproximadamente sólo la mitad que la del cobre si queremos obtener la misma conductancia.

Esto se aprovecha sobre todo en la construcción de líneas aéreas. Para altas tensiones y grandes longitudes de vano se utilizan aleaciones de aluminio (por ejemplo, aldrey = AlMgSi) o líneas de aluminio con alma de acero (fig. 15.41).

También en la fabricación de cables aumenta la difusión del aluminio, bien como revestimiento del cable, como capa de blindaje y, sobre todo, como conductor (fig. 15.40), para lo que se emplean aleaciones especiales de aluminio, por ejemplo E-AlMgSi.

En las máquinas eléctricas son de aluminio la cubierta y también otras partes eléctricas de importancia, por ejemplo los rotores en jaula de ardilla (figura 15.42).

En los condensadores se emplea el aluminio de muy diversas maneras, como



Fig. 15.40. Cable de aluminio.

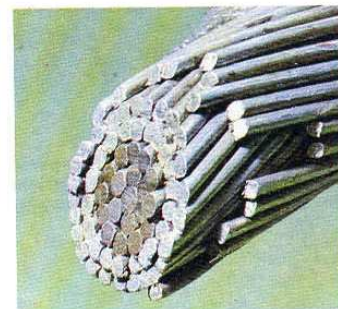


Fig. 15.41. Línea aérea de aluminio con alma de acero.

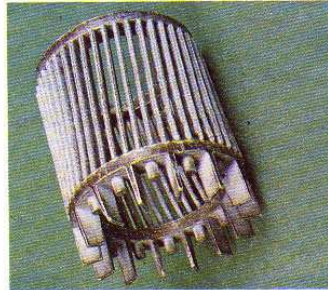


Fig. 15.42. Rotor en jaula de ardilla.

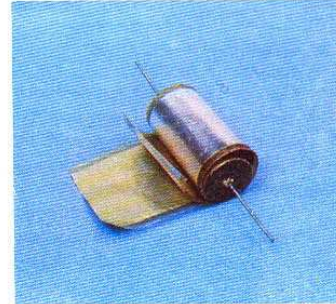


Fig. 15.43. Hoja de un condensador.



Fig. 15.44. Barras colectoras de corriente de aluminio en una instalación de conmutación de tensión intermedia.

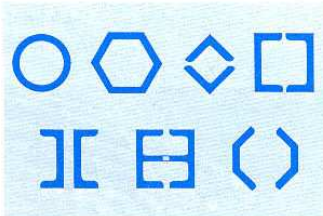


Fig. 15.45. Secciones de los perfiles de barras colectoras de corriente sometidas a grandes esfuerzos.

para los recipientes y las placas, por ejemplo en forma de hoja (fig. 15.43), y en forma de placa en los condensadores giratorios.

El aluminio presenta un calor específico casi doble que el del cobre, o sea que a la misma intensidad de corriente el conductor de aluminio se calentará la mitad que el de cobre. Por ello el aluminio resulta especialmente apropiado para las barras colectoras de corriente y las piezas de contacto (fig. 15.44). Evidentemente también es ventajosa la menor densidad del aluminio.

En la construcción de antenas se aprovecha la resistencia del aluminio a la corrosión.

#### Aleaciones de aluminio

Para mejorar sus propiedades mecánicas el aluminio se alea con magnesio, silicio, cobre, zinc, manganeso, níquel y cromo. Se diferencian las aleaciones de forja y aleaciones de fundición, pudiendo alcanzar las primeras resistencias a la tracción de hasta 500 N/mm<sup>2</sup> por conformación en frío.

Algunas de las aleaciones de aluminio pueden templarse, con lo cual las deformaciones difíciles se realizan cuando el material aún es blando, y a continuación se temple el objeto ya conformado.

**Formas comerciales:** chapas, láminas, barras, tubos, perfiles y cables.

#### Datos sobre su mecanizado

Cuando se deban unir piezas de aluminio de modo que la **unión** sea buena **conductora** deberá alejarse la capa de óxido inmediatamente antes del proceso de unión. Puede lograrse esto mecánicamente rascando, raspando y limando, o químicamente con agentes reductores.

Al **soldar con material de aporte** deberá tenerse más cuidado que en el caso de otros metales. Por un lado deben emplearse fundentes especiales para alejar la capa de óxido, y por otro lado se precisará una cantidad mayor de calor debido al mayor calor específico del aluminio.

Al **mecanizar por arranque de virutas** deberán adaptarse los ángulos de las cuchillas a la menor rigidez de este metal ligero.

El ángulo de filo podrá ser pequeño:  $\beta = \text{aprox. } 50^\circ$ .

El ángulo de ataque deberá ser grande:  $\gamma = \text{aprox. } 30^\circ$ .

El ángulo de despullo deberá ser grande:  $\alpha = 10^\circ$ .

De aquí se deduce que las herramientas deberán reunir los mismos requisitos que las de mecanizar cobre, con la salvedad ya mencionada de que deberá

alejarse previamente, sobre todo al limar, la dura capa de óxido, pues en caso contrario la lima «resbalaría».

#### 15.3.4. Plomo

El plomo es

- **muy blando**
- muy fácilmente conformable sin arranque de virutas
- fácil de soldar (autógenamente)
- fácil de soldar con soldadura de aporte (precaución: punto de fusión bajo)
- fácil de colar
- fácil de alear
- **muy venenoso** (respetar las normas de prevención de accidentes)
- mecanizable por arranque de virutas (vigilar el gran ángulo de ataque)
- **impermeable a las radiaciones de onda corta** (por ejemplo, rayos X).

#### Propiedades

Color	Gris azulado
Densidad	<b>11,34</b> $\frac{\text{kg}}{\text{dm}^3}$
Punto de fusión	327°C (600 K)
Conductividad eléctrica	4,8 $\frac{\text{MS}}{\text{m}}$
Conductividad térmica	35 $\frac{\text{W}}{\text{K m}}$
Calor específico	0,13 $\frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$
Resistencia a la tracción	<b>25</b> $\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

El plomo expuesto al aire queda recubierto por una capa de óxido de color gris mate, que crece mucho más lentamente que la del aluminio. Esta capa de óxido de plomo no sólo protege contra la penetración de la corrosión sino también contra la mayoría de los ácidos. En cambio el ácido nítrico, el sulfhídrico, el sulfúrico y algunos ácidos orgánicos reaccionan con el plomo.

#### Aplicaciones

En electrotecnia el plomo se emplea primordialmente como material para las placas de acumuladores y para los revestimientos de cables (figs. 15.46 y 15.47). Por otro lado está contenido en la aleación denominada soldadura blanda.

#### Datos sobre su mecanización

El plomo es extraordinariamente blando (aproximadamente 1/9 de la dureza del cobre) y «unta», por lo que se evita la mecanización por arranque de virutas. Si a pesar de ello hubiera que perforarlo o serrarlo los ángulos de despullo y de ataque deberán ser muy grandes para evitar que el taladro o la sierra queden atascados.

Como el punto de fusión es muy bajo (327°C) y el calor específico muy pequeño (sólo 1/3 del calor específico del cobre), al soldar, tanto autógenamente

#### Plomo

Símbolo Pb  
(latín: plumbum)

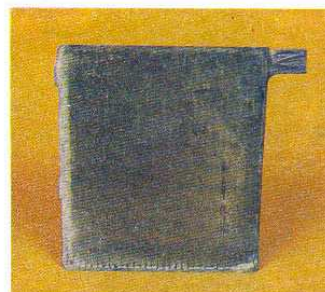


Fig. 15.46. Placa de un acumulador.

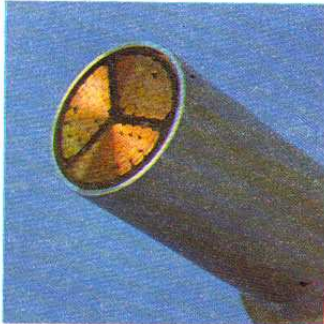


Fig. 15.47. Cable con envoltura de plomo.

	Símbolo	Nombre lat
Oro	Au	aurum
Platino	Pt	
Plata	Ag	argentum

como con soldadura de aporte, habrá que trabajar, a temperaturas bajas y con pequeñas cantidades de calor. Además hay que tener en cuenta la mala conductividad térmica del plomo.

Consecuencias: Los puntos de soldadura con material de aporte deberán calentarse con pequeñas cantidades de calor y uniformemente (llama pequeña al soldar los revestimientos de cables).

El metal de soldadura no deberá fundirse en contacto con el punto de soldadura sino por encima de éste. Así goteará sobre el punto de soldadura y se distribuirá con un trapo untado en sebo.

**¡Precaución! ¡El plomo (vapores) y sus compuestos son venenosos!**

**15.3.5. Metales nobles**

**Propiedades**

	Oro	Platino	Plata
Color	Amar	Blanco gris	Blanco claro
Densidad en $\frac{kg}{dm^3}$	19,3	<b>21,5</b>	10,5
Punto de fusión en °C	1063	1770	960
Conductividad eléctrica en $\frac{MS}{m}$	44	9,4	<b>62</b>
Conductividad térmica en $\frac{W}{K \cdot m}$	300	70	<b>407</b>
Resistencia a la tracción en $\frac{N}{mm^2}$	120	140	200
Calor específico en $\frac{kJ}{kg \cdot K}$	0,13	0,13	0,23

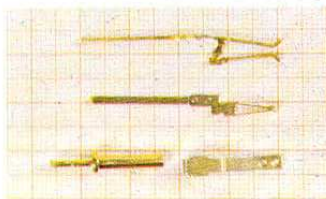


Fig. 15.48. Piezas de contacto doradas.



Fig. 15.49. Piezas de contacto plateadas.

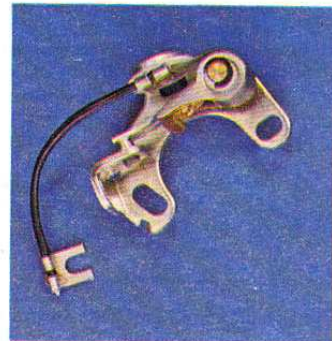


Fig. 15.50. Contacto interruptor con revestimiento de wolframio.

Los metales nobles son **químicamente muy estables**, esto es, en condiciones normales no se oxidan ni forman apenas compuestos.



**Aplicaciones**

En electrotecnia el mayor campo de aplicación de los metales nobles es como **materiales de contacto**. Para ello se aprovecha el hecho de que los metales nobles apenas se oxidan y forman, por tanto, resistencias de contacto muy pequeñas. Como también presentan puntos de fusión muy altos se reduce el peligro de quemar los contactos.

Como estos materiales son muy caros suelen sólo emplearse como revestimientos galvánicos (ver 13.2.4.1) (por ejemplo, plateado de hilos de cobre).

Mediante aleaciones pueden combinarse las buenas propiedades de los distintos materiales, por ejemplo plata-paladio en los selectores de giro y alzada de la compañía de teléfonos alemana. Aquí se suman la buena conductividad de la plata con la gran resistencia a la erosión eléctrica del paladio.

Como materiales de contacto se utilizan junto a los metales nobles oro, plata y platino, también wolframio y paladio, así como sus aleaciones, por ejemplo oro-níquel, oro-plata, plata-cobre, plata-cadmio y platino-iridio.

**15.3.6. Mercurio****Propiedades**

Color	Plateado
Densidad	$13,6 \frac{\text{kg}}{\text{dm}^3}$
Punto de fusión	$-39^\circ\text{C}$ (234 K)
Conductividad eléctrica	$1,04 \frac{\text{MS}}{\text{m}}$
Conductividad térmica	$10 \frac{\text{W}}{\text{K} \cdot \text{m}}$
Calor específico	$0,14 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$

El mercurio es

- líquido a la temperatura ambiente
- fácil de alea con otros metales (excepto antimonio, hierro y wolframio)
- venenoso.

El mercurio posee grandes fuerzas cohesivas, de modo que al verterlo sobre una superficie plana tiende a formar gotas esféricas y no moja la superficie.

**Aplicaciones**

El mercurio tiene dos aplicaciones importantes en electrotecnia, por un lado en lámparas (por ejemplo, lámparas de vapores de mercurio) o en lámparas de rayos ultravioleta (sol artificial) (fig. 15.51) y, por otro lado, como material de contacto. Las válvulas conmutadoras de mercurio (fig. 15.52) y los conmutadores subminiatura de mercurio, actualmente muy utilizados, apenas presentan desgaste.

**15.3.7. Materiales de contacto sinterizados**

Como ya hemos citado en el apartado 15.3.5, para obtener mejores propiedades se realizan aleaciones, para lo cual deben fundirse los materiales. Sin

<sup>1</sup> En latín: plata líquida.

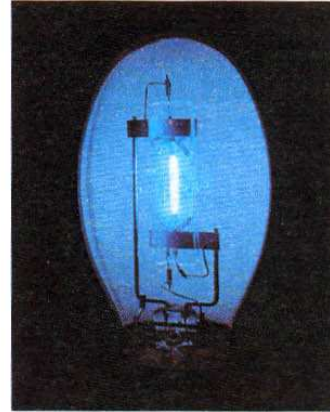


Fig. 15.51. Lámpara de vapor de mercurio.

**Mercurio**  
Símbolo Hg  
(hydrargyrum) <sup>1</sup>



Fig. 15.52. Interruptor de mercurio.  
Unidad Operativa SENATI - Abancay

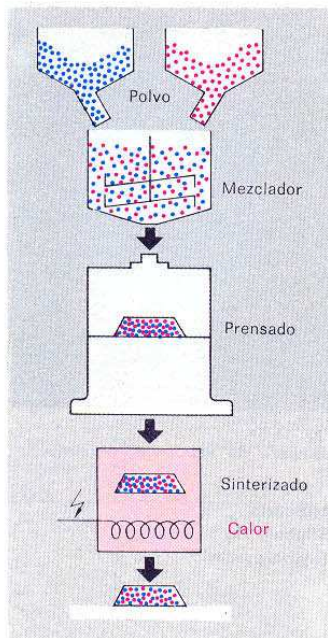


Fig. 15.53. Representación esquemática del sinterizado.



Fig. 15.54. Escobillas de un motor eléctrico.

embargo, debido a los altos puntos de fusión de algunos materiales pueden presentarse problemas para fundir. Además algunos materiales pierden sus propiedades mecánicas (por ejemplo, dureza) cuando se los funde. En estos casos se emplean procedimientos de sinterizado (fig. 15.53). Para ello en primer lugar se muelen los materiales de partida, se mezclan a continuación y finalmente se los prensa con la forma deseada. En el paso siguiente se calienta la pieza en cuestión a temperaturas entre el 50 % y el 95 % del punto de fusión. Las diferentes partículas del polvo se adhieren unas a otras gracias al movimiento térmico.

Una de las principales ventajas de este procedimiento es que se pueden sinterizar materiales que no podrían alearse, por ejemplo no metales u óxidos metálicos.

Las llamadas aleaciones impregnadas resultan ser muy resistentes al calor. Se componen del llamado «material esqueleto» sinterizado (por ejemplo wolframio) «impregnado» con un material de buena conducción (por ejemplo, plata). Mediante esta combinación se consigue que la pieza de contacto conserve su forma incluso a temperaturas mayores que la de fusión del material impregnante.

Algunos de los materiales empleados son: plata-níquel, plata-óxido de cadmio, plata-óxido de zinc, plata-grafito y wolframio-cobre.

Aparte de estos materiales también se emplea frecuentemente **carbón** como material de contacto. Se obtiene a partir de negro de humo, coque o grafito con ayuda de un medio aglutinante. Las barras de carbón, también llamadas escobillas, se suelen sinterizar también con metales (20 %...80 %) para alcanzar mayores cargas permisibles de corriente.

#### Propiedades del carbón

Color	Negro
Densidad	$1 \frac{\text{kg}}{\text{dm}^3} \dots 1,9 \frac{\text{kg}}{\text{dm}^3}$
Conductividad eléctrica	$0,015 \frac{\text{MS}}{\text{m}}$
Conductividad térmica	$40 \frac{\text{W}}{\text{K} \cdot \text{m}}$

El carbón es frágil y, por tanto, sólo puede mecanizarse por arranque de virutas con suma precaución.

#### 15.3.8. Comparación de las principales propiedades de materiales

En la figura 15.55 hemos representado gráficamente los valores de las propiedades más importantes de algunos materiales para obtener una comparación fácil.

#### Ejercicios sobre 15.3

- Indicar las correspondencias entre los materiales conductores y las conductividades siguientes:  
aluminio, plomo, oro, cobre, platino, plata;  
 $\times$  en MS/m: 62; 56; 44; 36; 9,4; 4,8.
- ¿Cuáles son las propiedades del cobre que se aprovechan en electrotecnia?

3. ¿Cuáles son las propiedades del cobre que varían considerablemente al alearlo con zinc?
4. Citar ejemplos de aplicación del latón.
5. Indicar las correspondencias entre los siguientes materiales conductores y sus densidades:

aluminio, plomo, oro, cobre, platino, plata;

$\rho$  en  $\text{kg}/\text{dm}^3$ : 21,5; 19,3; 11,34; 10,5; 8,93; 2,7.

6. ¿Cuáles son las principales ventajas del aluminio frente al cobre?
7. Indicar diez ejemplos de aplicaciones del aluminio.
8. ¿Qué propiedades especiales tiene el plomo?
9. ¿Qué peligros encierra la soldadura del plomo?
10. ¿Cuáles son los materiales conductores que expuestos al aire quedan recubiertos rápidamente por una capa de óxido?
11. ¿Por qué se llaman así los metales **nobles**?
12. ¿Para qué se emplean primordialmente los metales nobles en electrotecnia?
13. ¿Para qué se sinterizan los materiales?
14. Para mover la antena de un radioaficionado debe construirse un motor pequeño y ligero situado en el exterior. ¿Qué materiales emplearemos para las diferentes partes del motor (cubierta-estator, rotor, bobinados, alimentación del rotor)?  
Razonar la elección.  
Sugerencia para la solución:  
a) Determinar las exigencias que debe reunir cada una de las partes del motor.  
b) Buscar de entre los materiales del apartado 15.3 aquellos que cumplan mejor dichas exigencias.

15. ¿Cuál de las siguientes brocas es adecuada para la perforación de cobre? ¿Y cuál para latón?

Broca	Ángulo de punta	Ángulo de ataque lateral
1	140°	40°
2	140°	12°
3	118°	12°
4	118°	35°

### 15.4. Materiales resistivos

#### 15.4.1. Materiales para caldeo

El conductor para caldeo de la figura 15.56 pertenece a una lavadora, y en él debe transformarse energía eléctrica en calor. Para ello debe dificultarse la circulación de los electrones (ver 3.2) a fin de que éstos cedan parte de su energía cinética a los núcleos atómicos, con lo que éstos efectuarán mayores vibraciones. De aquí se deduce que la resistencia eléctrica (o sea, la oposición al paso de los electrones) debe ser grande. Evidentemente los metales puros no nos servirán para esto, por lo que suelen utilizarse metales de baja aleación

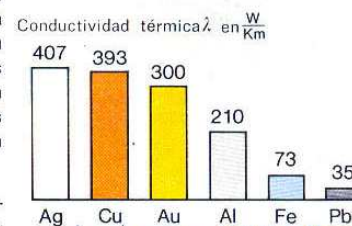
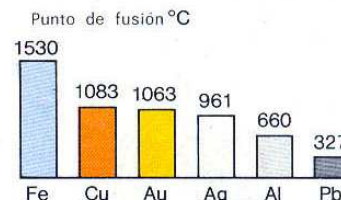
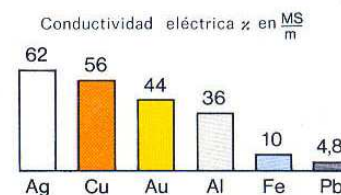
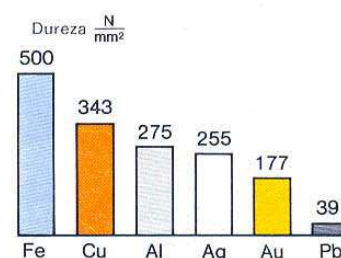
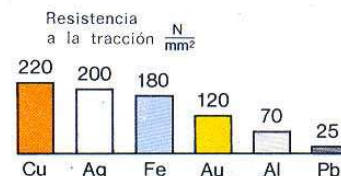
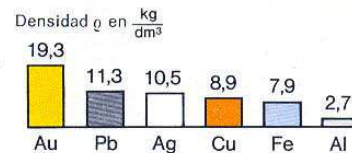


Fig. 15.55. Comparación de las propiedades importantes de materiales.

Unidad Operativa SENATI - Abanca

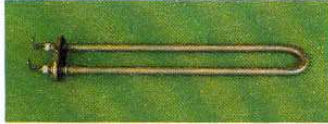


Fig. 15.56. Conductor para caldeo de una lavadora.

(o sea, materiales con pequeños porcentajes de los componentes de la aleación), pues pequeñas irregularidades en los retículos cristalinos suponen ya un fuerte obstáculo para los electrones.

Como los conductores para caldeo deben alcanzar temperaturas altas con pequeñas cantidades de energía, deberán presentar pequeños calores específicos y una buena conductividad térmica.

Estas grandes temperaturas no podrán evidentemente provocar modificaciones en el material, esto es, los materiales deberán conservar sus propiedades mecánicas y tecnológicas, y lógicamente no deberán fundirse en ningún caso, ni tampoco quemarse. Por tanto, deberemos alejar materiales que o bien impidan totalmente la formación de cascarillas de óxido o formen una capa de óxido tal que impida el descascarillado.

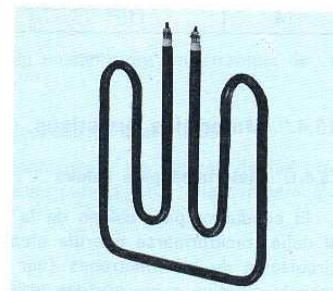
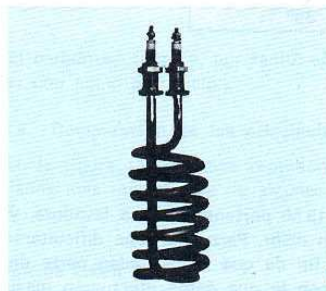
Naturalmente el «medio ambiente» desempeña un papel decisivo. Cuando los materiales resistivos estén completamente encapsulados (por ejemplo, enterrados en cerámica) el oxígeno no podrá penetrar y no aparecerá oxidación. Sin embargo, como los materiales cerámicos son malos conductores del calor, sólo se podrán emplear en determinados casos. Al calentarse las sustancias cerámicas se dilatan menos que los metales, con lo que los conductores para caldeo se saldrían del encapsulado. Mediante aleaciones se obtienen materiales con coeficientes de dilatación muy pequeños.

Con todo esto obtenemos los siguientes **requisitos** para los conductores de caldeo:

- gran resistividad
- pequeño calor específico
- buena conductividad térmica
- elevado punto de fusión
- buena resistencia a la corrosión
- buena resistencia al descascarillado en los conductores descubiertos
- pequeños coeficientes de dilatación.

Para todo ello se han desarrollado muchos materiales, cuyos componentes principales son: aluminio, cromo, hierro, níquel.

Ejemplo: Cr Al 20 5 (20 % Cr, 5 % Al, 75 % Fe). Existen distintas composiciones bajo nombres comerciales registrados.



Figs. 15.57 a 15.59. Diversos conductores para caldeo.

#### 15.4.2. Materiales para resistencias peliculares

Con las resistencias de la figura 15.60 no debe generarse calor, como es el caso en los conductores para caldeo, sino simplemente «consumirse» energía

eléctrica. Como no es posible el consumo de energía sino simplemente la transformación de una forma en otra, en estos componentes también se generará calor. Como éste es nocivo los materiales de las resistencias peliculares deberán poseer grandes calores específicos y mala conductividad térmica.

Los materiales cerámicos reúnen estas propiedades, pero sus resistividades muy elevadas limitan sus aplicaciones. Por ello se emplean carbón, metales y óxidos metálicos.

Los materiales resistivos pueden bien vaporizarse sobre un soporte o dispersarse en solución y aplicarse por rociado. Dosificándolos adecuadamente y tratándolos a continuación (quemando o limando) se pueden lograr valores muy exactos, lo cual es de suma importancia, pues el funcionamiento de un circuito sólo queda garantizado cuando los componentes están calculados con exactitud. De aquí resulta entre otras cosas que las oscilaciones de la temperatura tampoco deben influir sobre los valores eléctricos.

Las pequeñas dimensiones de estas resistencias limitan también la carga permisible. Por ello se utilizan poco en las técnicas energéticas.

Algunos de los requisitos que deben reunir los materiales de los conductores para caldeo también deben cumplirse en este caso, con lo que obtenemos los requisitos siguientes:

- gran resistividad
- gran calor específico
- mala conductividad térmica
- buena resistencia a la corrosión
- buena resistencia al descascarillado
- pequeño coeficiente de dilatación
- pequeño coeficiente de temperatura.

Los componentes principales de estos materiales son carbón, cromo, níquel, tántalo, así como sus aleaciones y óxidos.

#### 15.4.3. Materiales para resistencias bobinadas

En las resistencias de la figura 15.61 tampoco se trata de convertir energía eléctrica en calor, sino de una reducción de la energía eléctrica. Por tanto, los materiales empleados deberán reunir requisitos similares a los de las resistencias peliculares.

Sin embargo, en muchos casos carece de importancia la variación de la resistencia con la temperatura. Tan sólo las resistencias de medida deberán presentar coeficientes de temperatura muy pequeños, para lo cual ha dado un excelente resultado una aleación de cobre-níquel-manganeso conocida bajo el nombre de **constantán**.

Constantán: 54 % Cu, 45 % Ni, 1 % Mn.  
 Coeficiente de temperatura  $\alpha = 0,00004$  1/K.  
 Resistividad  $\rho = 0,5 \mu\Omega\text{m}$ .

A las propiedades eléctricas ya citadas se añaden en estos materiales algunas otras mecánicas, pues hay que devanar los hilos. Por otro lado, los materiales deben conservar su resistencia mecánica a temperaturas elevadas.

Por tanto, los materiales para resistencias bobinadas deberán reunir los siguientes requisitos:

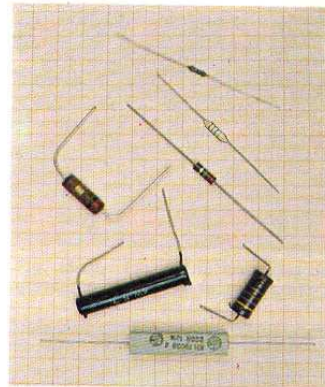


Fig. 15.60. Resistencias peliculares.

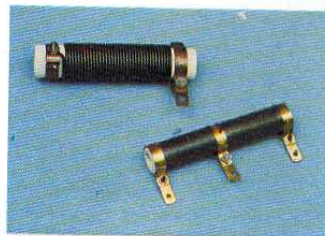


Fig. 15.61. Resistencias bobinadas.

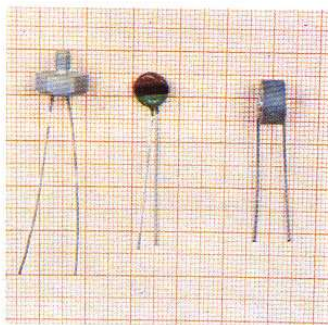


Fig. 15.62. Resistencias variables especiales.

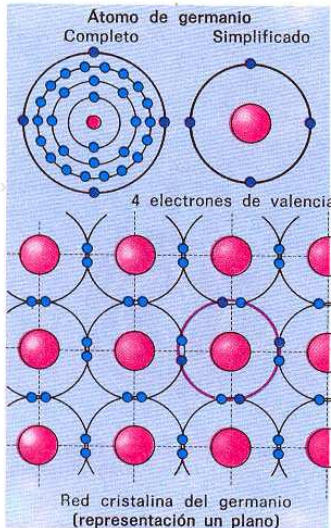


Fig. 15.63. Estructura cristalina del germanio.

- gran resistividad
- gran calor específico
- mala conductividad térmica
- buena resistencia a la corrosión
- buena resistencia al descascarillado
- pequeño coeficiente de dilatación
- pequeño coeficiente de temperatura (en las resistencias de medida)
- buenas propiedades mecánicas (elasticidad, resistencia a los golpes)
- buenas propiedades tecnológicas (soldabilidad, también con soldadura de aporte, estabilidad frente al calor).

Los materiales empleados al efecto están normalizados.

Algunos nombres comerciales conocidos son:

Constantán, Niquelina, Manganina, Aurotán, Goldina, Isotán, Isa-ohm, Iso, Novoconstán, Ceranina, Isabelina.

#### 15.4.4. Materiales para resistencias especiales (semiconductores)

La figura 15.62 nos muestra varios componentes. El valor de sus resistencias puede variarse considerablemente mediante diversas influencias. La dependencia es alineal, y está definida por curvas con pendientes muy diferentes. Esta propiedad se busca a propósito y se aprovecha adecuadamente. Las diferentes resistencias pueden depender de la temperatura, de la luz, de la inducción magnética, de la tensión (ver 3.3 y 3.4) y del sentido de la tensión (rectificadores).

Los materiales empleados al efecto son elementos semiconductores (por ejemplo, germanio, silicio) o sus compuestos (semiconductores compuestos, por ejemplo arseniuro de galio).

Los **semiconductores** son sustancias cuyos electrones de valencia están fuertemente ligados al retículo cristalino (fig. 15.63), con lo que no pueden contribuir al transporte de cargas.

Los semiconductores son malos conductores eléctricos a temperatura ambiente.

Al aumentar la temperatura los átomos o moléculas se moverán más rápidamente, con lo que se soltarán algunos de los enlaces de los electrones de valencia. De este modo dispondremos de portadores de carga negativos (fig. 15.64) que aumentarán la conductividad del material.

La conductividad de los semiconductores crece al aumentar la temperatura. Esta propiedad se denomina conductividad intrínseca.

Cuando los semiconductores se «impurifican» o «contaminan» con otros elementos, estos átomos extraños perturbarán la estructura regular de la red cristalina y la conductividad aumentará.

La conductividad de los semiconductores aumenta con la contaminación. Esta propiedad se denomina conductividad extrínseca.

Los **materiales de partida de los semiconductores** son principalmente el germanio y el silicio, y las impurezas, aluminio, boro, galio o indio, así como antimonio, arsénico o fósforo.

Otros materiales también empleados son: telurio, arseniuro de galio, seleniuros, sulfuros y fosfuros.

En la fabricación de resistencias fotoeléctricas o **fotorresistencias** se utiliza casi exclusivamente sulfuro de cadmio, pues este material posee una gran sensibilidad óptica. La fabricación de los propios componentes se logra mediante sinterización, vaporización o dispersión de polvo de CdS sobre un material soporte.

Las **resistencias CTP, CTN y VDR** (varistores) suelen fabricarse por sinterización de cristales de los elementos ya citados y sus compuestos.

**Ejercicios sobre 15.4**

1. ¿Por qué es favorable que los materiales para caldeo presenten un calor específico pequeño?
2. ¿Por qué deben tener un coeficiente de dilatación pequeño los materiales para caldeo?
3. ¿Qué materiales se emplean en los conductores de caldeo?
4. ¿En qué se diferencia la misión de las resistencia bobinadas y peliculares de la de los conductores para caldeo?
5. ¿Por qué deben presentar un gran calor específico los materiales para resistencias peliculares?
6. ¿Qué significan las abreviaturas o denominaciones WM 100 y CuNi30Mn3?
7. ¿Por qué son malos conductores los semiconductores no contaminados a temperatura ambiente?
8. ¿Cuáles son los materiales más importantes en la tecnología de los semiconductores?

**15.5. Materiales aislantes**

Los materiales aislantes tienen las misiones de

- **evitar el contacto de las diferentes partes conductoras entre si** (aislamiento de la instalación)
- **proteger a las personas frente a las tensiones eléctricas** (aislamiento protector)

Casi todos los no metales son apropiados para ello, pues tienen resistividades relativamente grandes. Este hecho se debe a la ausencia de electrones libres (ver 3.2).

El sinnúmero de materiales aislantes puede clasificarse según diferentes puntos de vista. Sin embargo, siempre existen solapamientos, de modo que al-

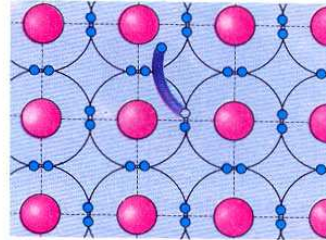


Fig. 15.64. Estructura cristalina del germanio al elevar la temperatura.

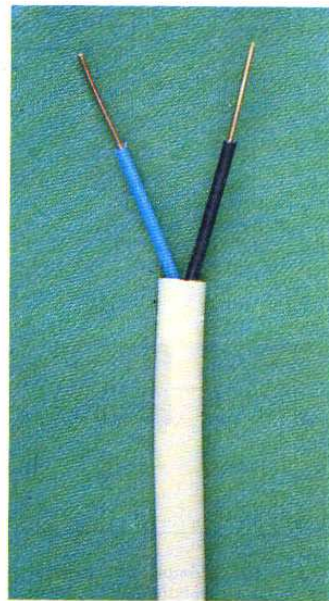


Fig. 15.65. Aislamientos en una línea.

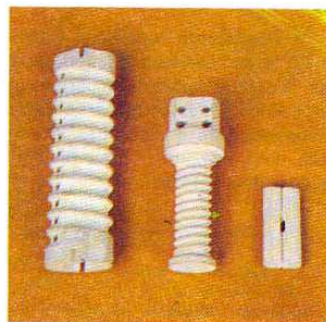


Fig. 15.66. Soportes para conductores de caldeo.

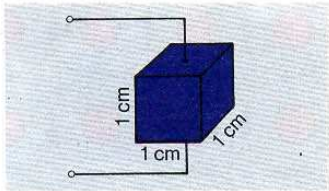


Fig. 15.67. Resistividad de paso.

Algunos materiales pueden clasificarse en más de un grupo. Tampoco en la clasificación que hemos elegido pudimos evitar este hecho.

Los materiales que vamos a tratar a continuación representan simplemente una selección, a partir de la cual explicaremos las características típicas de cada grupo. Precisamente en los plásticos el número de variedades es enorme y continuamente aparecen nuevos materiales en el mercado.

**Clasificación de los materiales aislantes**

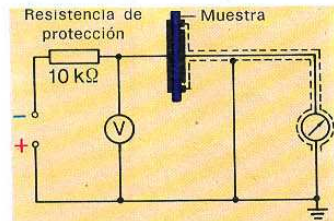
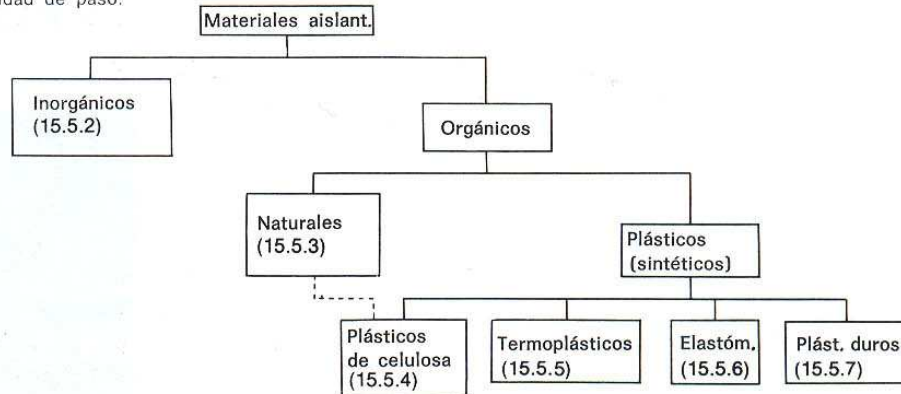


Fig. 15.68. Ejemplo de circuito para medir la resistividad de paso.

**15.5.1. Características de los aislantes**

Los materiales aislantes deben tener una resistencia muy elevada, requisito del que pueden deducirse las demás características necesarias.

Para ello se han normalizado los siguientes conceptos y se han fijado los procedimientos de medida:

**Propiedades eléctricas**

- Resistividad de paso  $\rho_D$  en  $\Omega \text{ cm}^1$ .

Es la resistencia que presenta un cubo de 1 cm de arista (fig. 15.67).

Ejemplos:

- PVC  $\rho_D = 10^{17} \Omega \cdot \text{cm} (= 10^{21} \mu\Omega \cdot \text{m})$
- Porcelana  $\rho_D = 10^{11} \Omega \cdot \text{cm} (= 10^{15} \mu\Omega \cdot \text{m})$

- Resistencia superficial y resistencia a las corrientes de fuga.

A altas tensiones pueden aparecer corrientes eléctricas como consecuencia de depósitos sobre la superficie de los aislantes. Al cabo de un cierto tiempo la corriente podría atacar a estos materiales. Precisamente los plásticos son muy sensibles a ello, pues al ser sustancias orgánicas contienen carbono. Por ello debe comprobarse su resistencia con circuitos semejantes a los de las figuras 15.68 y 15.69.

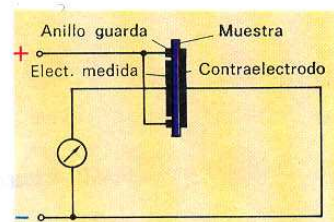


Fig. 15.69. Circuito para medir la resistencia superficial.

<sup>1</sup> Transformación a la unidad usual en conductores:  
 $1 \Omega \text{ cm} = 1 \Omega \cdot 10^{-2} \text{ m} = 10^{-2} \Omega \text{ m} = 10^{-2} \cdot 10^6 \mu\Omega \text{ m}$   
 $1 \Omega \cdot \text{cm} = 10^4 \mu\Omega \cdot \text{m}$



- Rigidez dieléctrica  $E_d$  en kV/mm (ver 11.2.1).

Se mide la tensión a la que se produce una descarga disruptiva entre dos electrodos (fig. 15.70).

La rigidez dieléctrica no es una magnitud lineal, sino que depende de una serie de factores.

Ejemplo:

PVC:  $E_d \approx 45$  kV/mm; porcelana:  $E_d \approx 35$  kV/mm.

- Permitividad relativa  $\epsilon_r$ .

Ya la tratamos en el apartado 11.2.3.

Es importante que la permitividad relativa de los aislantes sea pequeña, pero por otro lado los aislantes empleados como dieléctricos en los condensadores deberán presentar una gran permitividad. Además para poder valorar las propiedades del material debe saberse en qué forma depende  $\epsilon_r$  de la frecuencia.

Ejemplos: PVC  $\epsilon_r = 3,5 \dots 6$   
 Porcelana  $\epsilon_r = 6$   
 Dióxido de titanio  $\epsilon_r \approx 100$

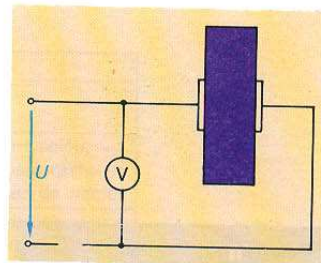


Fig. 15.70. Medida de la rigidez dieléctrica.

Tabla 15.2: Clases de resistencias al calor en los aislantes

Cl	Material	Tratamiento	TP
Y	Algodón, viscosilla, seda, tejidos de poliamida, papel, cartón, prespán, fibra vulcanizada, goma	Sin impregnado	90
A	Los mismos que en Y, esmalte de hilos, goma sintética	Impregnado con aglutinantes orgánicos	105
Ao	Los mismos que en A, esmalte para hilos	en aceite	115
E	Hojas plásticas resistentes al calor, papel duro, papel charol, esmalte para hilos	Sin impregnado	120
	Papel	Impregnado con resinas sintéticas	
	Materiales de capas de papel, algodón o viscosilla y resinas sintéticas	—	
B		Impregnado con resinas sintéticas	130
F	Sustancias inorgánicas como mica, asbesto, productos de vidrio y sustancias minerales similares	Impregnados con siliconas y sustancias orgánicas	155
H		Impregnado con siliconas puras	180
C	Mica, porcelana, vidrio, cuarzo y materiales similares resistentes al fuego	No impregnado, sin aglutinantes	> 180

TP = máxima temperatura permanente permisible en °C



Fig. 15.71. Aislamiento mediante aire en una subestación de la red de alta tensión.

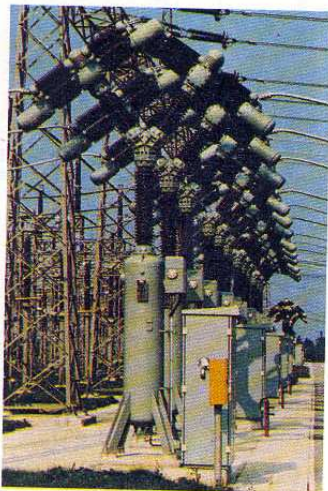


Fig. 15.72. Aisladores cerámicos en una instalación conmutadora de alta tensión.

- Comportamiento electrostático.

Todos conocemos los fenómenos de carga electrostática de los objetos de plástico. Son perceptibles sobre todo por los ruidos de fondo en los aparatos magnetofónicos y de cine.

Esta carga electrostática es posible debido a las altísimas resistencias de los plásticos.

Junto a las propiedades eléctricas ya citadas los aislantes deben reunir también una serie de **requisitos térmicos, mecánicos, químicos y tecnológicos** que dependen de los fines para los que se destinen (ver 15.1.1).

Los aislantes se clasifican en clases según las máximas temperaturas de régimen permisibles. Las diferentes clases se caracterizan mediante letras mayúsculas.

### 15.5.2. Aislantes inorgánicos

En los comienzos de la electrotecnia los materiales aislantes inorgánicos desempeñaron un papel importantísimo. Mientras antiguamente se utilizaron todo tipo de materiales naturales, actualmente sólo se emplean materiales sintéticos. Por ejemplo, el mármol, antaño tan utilizado, casi no se aplica actualmente. Sin embargo, en algunos campos de la técnica moderna son insustituibles los aislantes inorgánicos.

Aislantes inorgánicos: aire, mica, asbesto, cerámica, vidrio.

El aislante más barato, el **aire**, se empleaba antiguamente más que ahora. No obstante, aún no ha perdido toda su importancia (por ejemplo, en las líneas aéreas y en las instalaciones de conmutación; fig. 15.71).

Mediante tensiones suficientemente altas puede lograrse que los gases sean conductores, generando iones al arrancarles los electrones. Por ello en los gases es más importante la rigidez dieléctrica que la resistividad de paso.

La **mica** y el **asbesto** (amianto) son minerales. La mica se encuentra en forma de hojas, mientras que el asbesto se presenta como material fibroso.

Los **aislantes cerámicos** se forman a partir de silicatos pulverizados ( $\text{SiO}_2$ ) y otros óxidos metálicos, y se cuecen a continuación. Por tanto, se trata de un proceso de sinterización (ver 15.3.6). Finalmente se les suele proveer de un revestimiento vitrificado para evitar la entrada de agua al desgastarse los poros.

La gran multitud de posibles materiales está normalizada según sus materias primas en distintos grupos subdivididos a su vez. Todos tienen determinadas propiedades comunes, más o menos marcadas según los casos.

Los aislantes cerámicos (excepto la esteatita) son:

- duros
- muy frágiles
- resistentes a las roturas por cargas estáticas
- resistentes a la tracción (hasta  $60 \text{ N/mm}^2$ , excepto los óxidos y muy resistentes a la presión (hasta  $2100 \text{ N/mm}^2$ )
- resistentes a los ácidos (excepto al ácido fluorhídrico)
- resistentes a las lejías
- después de cocerlos sólo se pueden mecanizar por esmerilado en húmedo.

La tabla 15.3 indica los grupos principales con algunos representantes típicos, así como algunos datos importantes.

Los materiales cerámicos se obtienen por sinterización. En cambio el vidrio es una mezcla, siendo sus sustancias de partida arena (dióxido de silicio, sílice o cuarzo), carbonato sódico y carbonato cálcico.

Tabla 15.3: Aislantes cerámicos

Grupo	Tipo de material	Aplicación
Silicato aluminico	Porcelana dura	Aisladores
Silicato magnésico	Esteatita, forsterita	Aisladores, piezas en cajas de derivación, bornes, portalámparas, soportes para resistencias, condensadores, recipientes de vacío
Dióxido de titanio (Rutilo)	Titanato de magnesio Rutilo con otros óxidos Titanatos de Sr, Ca o Ba	Condensadores para altas frecuencias (permitividades relativas hasta 3000)
Mezcla de silicatos aluminico y magnésico		Piezas aisladoras expuestas a grandes oscilaciones de la temperatura
Silicato aluminico	Productos porosos	Soportes de conductores de caldeo, piezas protectoras contra chispas y arcos voltaicos, aislamiento de electrodos de encendido
Óxido de aluminio		Piezas aislantes a prueba de fuego, aislamiento de bujías
Cerámica de óxidos	Óxido de aluminio Óxido de magnesio Óxido de zirconio	Aislamiento de bujías, tubos aislantes, empleo a altas temperaturas, soportes y recubrimiento de circuitos integrados y de resistencias de película gruesa y delgada, placas térmicas, materiales abrasivos

El vidrio es

- incoloro y transparente
- **muy duro**
- muy frágil
- **muy poco resistente a los golpes**
- resistente a los ácidos (excepto el fluorhídrico)
- mal conductor del calor
- nada higroscópico
- mecanizable sólo por esmerilado en húmedo o con herramientas de ultrasonidos

El vidrio tiene una gran resistividad de paso ( $\rho_0 = 10^{13} \Omega \cdot m = 10^{17} \mu\Omega \cdot m$ ) pero un coeficiente de temperatura negativo, por lo que conduce cuando está incandescente (aproximadamente a 700° C).

#### Datos sobre su mecanizado

La cerámica y el vidrio son muy duros y frágiles, por lo que únicamente pueden mecanizarse por esmerilado o con cuchillas de diamante. Tampoco pueden dividirse por otros métodos, aunque sin embargo pueden partirse con las medidas deseadas después de rayar su superficie («cortavidrio»).



Fig. 15.73. Ampollas de vidrio para lámparas de incandescencia.



Fig. 15.74. Aisladores de vidrio.

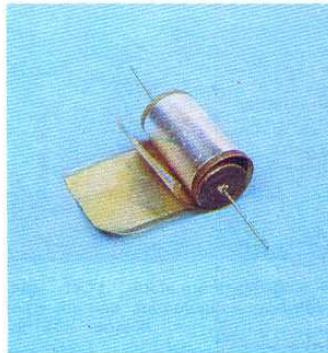


Fig. 15.75. Dieléctrico de un condensador de papel.

### 15.5.3. Aislantes orgánicos naturales

Vamos a tratar ahora algunos materiales que son sustancias naturales más o menos elaboradas y de origen orgánico. Aunque no son, pues, materias primas se las denomina aún materiales naturales (ver 15.1.2).

Materiales aislantes importantes son: papel, tejidos, goma, alquitrán, aceites, clófono.

El **papel** se fabrica a partir de madera molida mediante un «proceso de cocción». Es combustible e higroscópico, por lo que debe tratarse antes de emplearlo para fines de aislamiento. Este tratamiento suele ser un impregnado. La permitividad relativa y la rigidez dieléctrica son elevadas. Por ello se emplea papel como dieléctrico en los condensadores (fig. 15.75). También se aplica

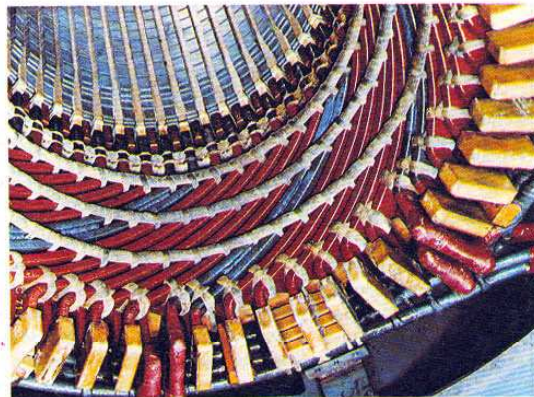


Fig. 15.76. Aislamiento del devanado de un estator mediante cinta de seda.

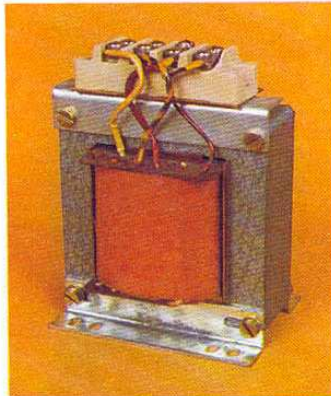


Fig. 15.77. Aislamiento de papel en un devanado.

como aislante de hilos y bobinados en líneas, cables y bobinas (fig. 15.77), aunque también en este campo se van imponiendo cada vez más las hojas de materias plásticas.

Los **tejidos** empleados en electrotecnia se fabrican de diferentes materiales, como algodón, lino, cáñamo, yute y seda. Las diferentes fibras se hilan primero y a continuación se suelen tejer los hilos. Como los tejidos son también higroscópicos, se les suele impregnar casi siempre.

Campos de aplicación: aislamiento de líneas (actualmente cada vez menos), encintado de bobinados, relleno de líneas, hilos para caracterización de líneas.

La **goma** se obtiene del caucho natural.

La goma

- es **muy extensible** (hasta el 600 %)
- no es higroscópica
- es poco resistente a la intemperie (se vuelve frágil y se rompe)
- es soluble en gasolina, bencol, aceite y ácidos fuertes
- es **combustible**
- es muy poco resistente al calor (temperatura máxima: 60° C).

Su resistividad es aproximadamente igual a la de la mica ( $\rho = 10^{16} \Omega \cdot \text{cm} = 10^{20} \mu\Omega \cdot \text{m}$ ), mientras que su rigidez dieléctrica es ligeramente menor (apro-

ximadamente 25 kV/mm<sup>2</sup>], o sea aproximadamente 2,5 veces mayor que la del papel no tratado.

Campos de aplicación: En electrotecnia la goma se emplea casi exclusivamente como aislamiento de líneas móviles (fig. 15.78). Sin embargo, actualmente se emplea mucho más la goma sintética (caucho buna, ver 15.5.6).

El **alquitrán** es uno de los productos que se obtienen de la destilación del petróleo, aunque también se encuentra en la naturaleza impregnando determinadas rocas llamadas bituminosas.

Es un líquido viscoso a temperatura ambiente, por lo que se le calienta a temperaturas entre 100 y 200° C para su tratamiento.

Campos de aplicación: Masa impregnante o pez aislante (fig. 15.79).

También el alquitrán se sustituye cada vez más por plásticos.

Los **aceites minerales** se llaman así porque se obtienen del petróleo.

Los aceites empleados en electrotecnia deben estar exentos de humedad, porque ya unas cantidades mínimas provocan un considerable empeoramiento de la resistividad, la permitividad relativa y la rigidez dieléctrica.

Campos de aplicación: Aislamiento y refrigeración de transformadores, apagado de arcos voltaicos en instalaciones de conmutación, dieléctrico en condensadores grandes.

El **clofeno** se obtiene a partir del cloro y del benceno, y también es líquido a temperatura ambiente.

El clofeno tiene la misma resistividad que el aceite mineral pero una rigidez dieléctrica mucho mayor. Su estabilidad química es también mucho mejor que la de los aceites, aunque los arcos voltaicos lo descomponen pero sin quemarlo.

El clofeno tiene los mismos campos de aplicación que los aceites minerales siempre que se tengan en cuenta las características ya citadas.

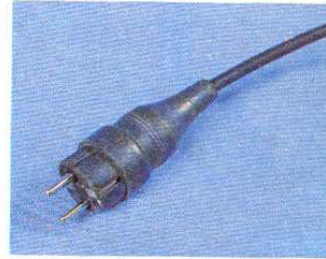


Fig. 15.78. Línea con enchufe aislados con goma.



Fig. 15.79. Relleno de alquitrán en un empalme de cables.

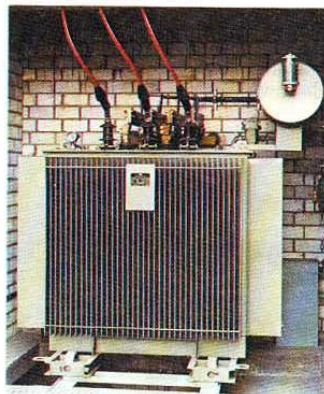


Fig. 15.80. Transformador con refrigeración por aceite.

#### 15.5.4. Plásticos de celulosa

Estos plásticos se forman a partir de la celulosa. Como la celulosa se obtiene de sustancias vegetales como la madera los consideraremos materiales **naturales**, que se someten a continuación a un tratamiento para dar sustancias de



Fig. 15.81. Aislamiento de ranuras en el devanado de un motor (hemos representado una fase intermedia de su fabricación).

características **plásticas**. Por ello clasificaremos estos materiales entre los plásticos y los materiales naturales.

Entre otros citaremos los siguientes materiales sintéticos obtenidos a partir de la celulosa: cartón prespán, papel charol, nitrato de celulosa, acetato de celulosa.

El **cartón prespán** se fabrica prensando varias capas de papel impregnadas en resina, con lo que aumenta su resistencia mecánica. El prespán se utiliza en los cuerpos de bobinas, placas aislantes y aislamiento de ranuras (fig. 15.81).

El **papel charol** es un papel impregnado en esmaltes sintéticos que se utiliza para el aislamiento de bobinas.

El **acetato de celulosa** se obtiene de la celulosa tratada con ácido acético.

Campos de aplicación: hojas de material aislante, piezas moldeadas por inyección para botones de interruptores, etc.

**Nombres comerciales:** Cellidur, Trolit, Ultrafán.

### 15.5.5. Termoplásticos

Los termoplásticos constituyen un subgrupo de los plásticos. Para empezar vamos a ocuparnos de todo el conjunto de materiales llamados plásticos.

Los **plásticos** se diferencian de todas las demás sustancias porque se componen de moléculas enormes (**macromoléculas**) (fig. 15.82).

Ejemplo: Las macromoléculas de la resina acrílica pueden tener hasta 30 000 unidades fundamentales iguales. Estas unidades fundamentales o recurrentes, son ya complicados compuestos del carbono con el hidrógeno y el oxígeno, pero también con silicio, nitrógeno, cloro, flúor, calcio y azufre entre otros.

Los plásticos se componen de macromoléculas, cuyas unidades recurrentes son compuestos orgánicos del carbono.

Estas macromoléculas forman cadenas larguísimas, siendo también posible la existencia de ramificaciones (figura 15.83). Están retorcidas y enmarañadas, con lo que el material es muy rígido.

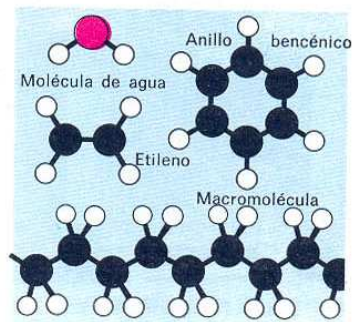


Fig. 15.82. Modelos de moléculas.

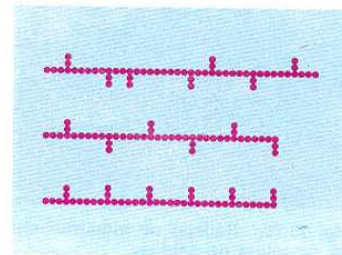
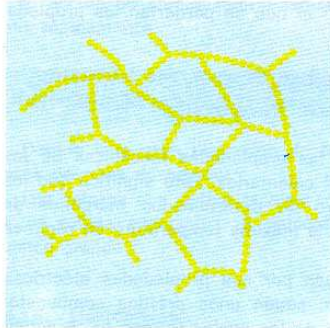
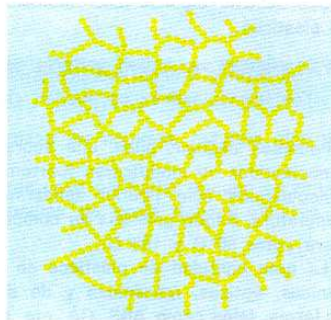


Fig. 15.83. Macromoléculas en forma de cadenas lineales (representación esquemática).

Si las diferentes cadenas se enlazan unas con otras mediante «puentes» aparecerán redes tridimensionales, que pueden ser de malla gruesa o fina (figs. 15.84 y 15.85).



**Fig. 15.84.** Macromoléculas con «puentes» formando una malla gruesa (representación esquemática en un plano).



**Fig. 15.85.** Macromoléculas con «puentes» formando una malla fina (representación esquemática en un plano).

Los plásticos con macromoléculas en forma de cadenas (fibras) sin enlaces entre ellas se llaman **termoplásticos**.

Los plásticos con macromoléculas formando mallas gruesas se llaman **elastómeros**.

Los plásticos con macromoléculas formando redes de malla fina se llaman **plásticos duros o termoestables**.

Cuanto más numerosos sean los enlaces entre las diferentes cadenas menos se podrán desplazar las moléculas unas con respecto a otras. Por tanto, el grado de enmarañamiento será un factor fundamental del comportamiento y propiedades de los plásticos.

Sin embargo, todos los plásticos tienen una serie de propiedades comunes, que pueden modificarse considerablemente en cada caso particular mediante procedimientos químicos.

Los plásticos son en general

- químicamente estables
- fáciles de colorear
- resistentes a la corrosión
- poco resistentes a la temperatura (temperatura máxima  $\approx 120^\circ\text{C}$ )
- buenos aislantes térmicos
- **malos conductores eléctricos**
- no higroscópicos
- fáciles de mecanizar sin arranque de virutas
- más ligeros que los metales ligeros  $\rho = 0,9 \dots 2 \text{ kg/dm}^3$ .

Los plásticos tienen en general

- peores propiedades mecánicas que los metales
- grandes dilataciones térmicas.

Al calentar las macromoléculas enmarañadas se separan unas de otras debido al movimiento térmico (fig. 15.86), con lo que el material pierde su rigidez y puede conformarse fácilmente (extrusión, inyección, etc.). Al enfriarse, los movimientos se vuelven a reducir, con lo que el material recobra su rigidez. Este proceso puede repetirse, aunque los cambios frecuentes de temperatura



**Fig. 15.86.** Macromoléculas después de su calentamiento.

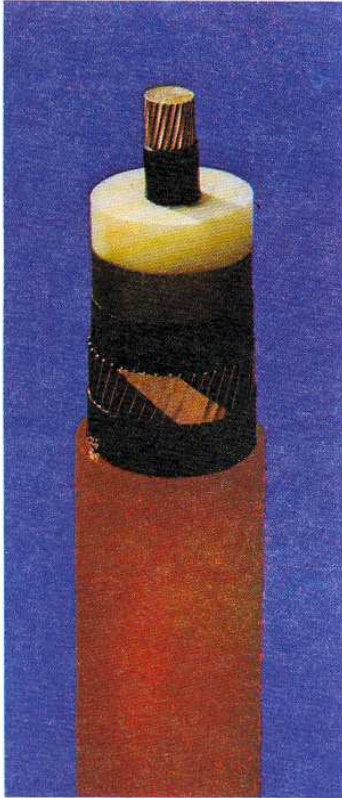


Fig. 15.87. Cable para corriente intensa con aislamiento de polietileno enmarañado.

pueden destruir algunas macromoléculas, con lo que se perderían las propiedades plásticas.

Los termoplásticos son conformables en caliente.  
Los termoplásticos no pueden endurecerse (revenirse).

Podemos deducir, pues, que sobre todo las propiedades mecánicas de los termoplásticos se modificarán fuertemente al calentarlos. Esto significa que los termoplásticos sólo podrán aplicarse dentro de determinados márgenes de temperatura. Según cual sea su composición la máxima temperatura de régimen estará entre 80° C y 160° C.

La gran cantidad de plásticos se clasifican por sus propiedades eléctricas, térmicas, ópticas, mecánicas y de duración, según unos prefijos compuestos por letras, tales como ABS, CA, etc, algunos de los cuales forman parte actualmente del lenguaje corriente, por ejemplo PVC (cloruro de polivinilo).

**Formas comerciales:** hojas, placas, barras, hilos, tubos, perfiles, granulados, polvo, líquidos.

Después de estas consideraciones generales vamos a ocuparnos ahora específicamente de los polímeros **termoplásticos**, **plastómeros** o simplemente **termoplásticos**.

Por tanto los termoplásticos son, a temperatura ambiente, elásticos o blandos, aumentando su rigidez y dureza a temperaturas bajas hasta llegar a ser incluso frágiles. Por ello al utilizar termoplásticos no sólo deberán tenerse en cuenta determinadas temperaturas máximas, sino también temperaturas mínimas. La gran variedad y formas de los plásticos no nos permiten hacer afirmaciones generales sobre las correspondientes magnitudes.

En la tabla 15.4 se encuentran algunos termoplásticos con sus propiedades y campos de aplicación.

#### Datos sobre su mecanizado

Los termoplásticos se mecanizan principalmente sin arranque de virutas, a temperaturas que van de los 100° C a los 300° C.

No obstante es también fácil cortarlos, serrarlos o perforarlos. Como en los metales blandos el ángulo de filo puede ser pequeño. Los ángulos de ataque y de despolvo pueden ser grandes.

De esto resulta que las herramientas para su mecanizado deben reunir los siguientes requisitos:

**Limas:** Los termoplásticos no suelen limarse. En caso de que fuera necesario se emplearán limas fresadas como las utilizadas para el cobre.

**Sierras:** El ángulo de ataque debe ser positivo, en los termoplásticos blandos de más de 15°. El número de dientes debe ser pequeño (4 a 15 dientes por cada 25 mm) para dejar espacio a la salida de virutas.

**Brocas:** Como los plásticos disipan mal el calor del rozamiento debe procurarse que haya una refrigeración suficiente. Para ello se emplea primordialmente aire a presión, pues los refrigerantes líquidos no son apropiados para todos los plásticos.

Las brocas utilizadas tienen ángulos de punta muy pequeños (60°...90°) para que los filos principales sean muy largos (fig. 15.88), con lo que se facilita la disipación del calor a través de la broca.



El ángulo de ataque lateral también es pequeño para que las virutas puedan salir rápidamente.

**¡Atención! Los agujeros perforados en plástico deben ser siempre algo mayores (0,05 mm ... 0,01 mm).**

Debido a la gran dilatación de los plásticos los agujeros resultan algo menores después de perforar.

Los valores que deben emplearse en cada caso particular pueden encontrarse en tablas especiales. A velocidades medias de corte deberá elegirse un avance grande.

### 15.5.6. Elastómeros

Las macromoléculas de estos plásticos están enlazadas por algunos «puentes» formando redes de malla gruesa que permiten que las moléculas en forma de cadena lineal puedan moverse dentro de ciertos límites. Sin embargo, debido a los «puentes» no pueden resbalar totalmente unas sobre otras.

Según esto los elastómeros perderán al aumentar la temperatura algo de su rigidez, pero no se volverán totalmente plásticos (fig. 15.89).

Si se someten estos plásticos a una carga mecánica las moléculas se estirarán, pero no se romperán porque los «puentes» entre las diferentes cadenas lo impedirán. Aparecerán tensiones mecánicas que al desaparecer la carga harán que el material recupere su estado y forma originales (fig. 15.89). Estos plásticos presentan, pues, un comportamiento similar a la goma, razón por la que reciben el nombre de elastómeros o cauchos sintéticos.

Los elastómeros son muy extensibles.

Esta afirmación sólo es válida naturalmente dentro de un determinado margen de temperaturas. En algunos materiales (los verdaderos elastómeros) empieza por debajo de 0° C, mientras en otros (también llamados termoelastómeros) empieza este margen algo por encima de los 0° C. Los valores máximos de este margen dependen del material, y vienen dados por las temperaturas a las que las macromoléculas empiezan a descomponerse, con lo que se perderán las propiedades plásticas.

#### Campos de aplicación:

Los mismos que la goma, o sea para aislamiento de cables y líneas, etc.

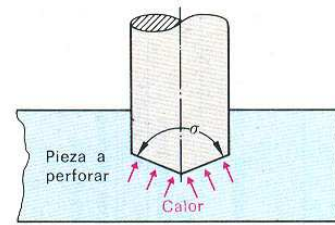
Algunos **nombres comerciales conocidos** son: buna o caucho buna, perbunán, neopreno, vulcolán, silastic.

#### Datos sobre su mecanizado

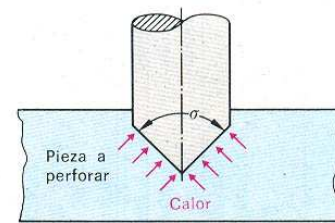
Los elastómeros se mecanizan casi exclusivamente sin arranque de virutas. Para el electricista posee gran interés la separación con un cuchillo o unos alicates. Como el material es muy blando deberán utilizarse ángulos de filo pequeños, o sea que las cuchillas de las herramientas deberán ser muy agudas.

### 15.5.7. Plásticos duros o termoestables

Las macromoléculas de las cadenas de los plásticos duros, también llamados durómeros, plásticos termofijos o termoestables, forman una red de malla



$\sigma = 135^\circ$   
Filo principal corto



$\sigma = 90^\circ$   
Filo principal largo

Fig. 15.88. Longitud de los fillos principales en función del ángulo de punta.

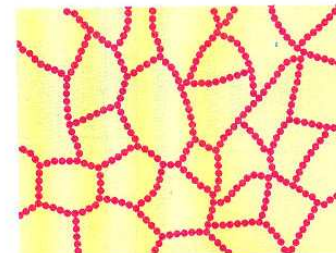
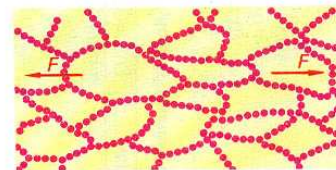


Fig. 15.89. Macromoléculas de elastómero sometidas a tracción y después de ésta.

Tabla 15.4: Propiedades y aplicaciones de algunos termoplásticos

Plásticos	Nombres comerciales	Propiedades	Aplicaciones
Poliétileno PE	Hostalen Lupolen Vestolen Bayolen	PE de baja presión: duro, rígido, utilizable hasta 100° C  PE de alta presión: más blando y flexible que el PE de baja presión, utilizable hasta 80° C  PE de baja y PE de alta presión: resistente a los ácidos, bases, aceites, disolventes corrientes, sensible a los aceites calientes	Cubiertas, máquinas eléctricas, cascos protectores, tubos  Aislamiento de cables, cuerdas
Cloruro de polivinilo PVC	Mipolan Pegulan Skai Hostalit Vinoflex Vestolit Vinnol	PVC blando: blando, extensible, resistente al desgaste  PVC duro: frágil, sobre todo en frío  PVC duro y PVC blando: resistente a los álcalis, ácidos, alcoholes, inestable frente a disoluciones orgánicas	Aislamiento de cables e hilos, tubos, tubos flexibles aislantes, cintas enrollables y adhesivas
Polipropileno	Hostalen pp Novolen Luporen Vestolen P	Rígido, duro, extensible, gran dilatibilidad, resistente a los aceites, agua, álcalis, ácidos (excepto H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> y HNO <sub>3</sub> ), resistente a temperaturas de hasta 140° C	Cuerpos de bobinas, regletas de contactos, construcción de aparatos, tejidos
Polimetilmetacrilato PMMA	Plexiglas, Plexigum Acronal Resarit	Transparente como el vidrio, duro, extensible, gran resistencia mecánica, resistente al agua, ácidos y bases diluidos, inestable frente a los disolventes orgánicos	Cuerpos de alumbrado, material aislante
Poliestireno PS	Styroflex Luran Novodur Trolitul Styropor	Barato, incoloro, transparente, frágil, hidrófugo, resistente a los álcalis, aceites, y ácidos, inestable frente a los disolventes orgánicos	Piezas aislantes para electrotecnia, empuñaduras de herramientas, aislamientos
Politetrafluoroetileno PTFE	Hostafión TF Teflón, Fluón	Químicamente muy estable, incluso contra el agua regia; resistente a temperaturas desde -200° C...250° C	Aislamiento a altas frecuencias Aislamiento a altas temperaturas

Plásticos	Nombres comerciales	Propiedades	Aplicaciones
Poliamidas PA	Perlon Ultramid Nylon, Durethan	Gran resistencia y tenacidad, higroscópicas, químicamente estables excepto frente a ácidos fuertes	Cuerdas, redes, correas de transmisión
Poliéster	Poliésteres lineales Trevira Diolen Hostadur, Hostaphan	Gran resistencia a la tracción y dilatabilidad, resistente al rasgado, transparente, resistente a los ácidos y bases, inestable frente a los disolventes orgánicos	Hojas, cubiertas de instalaciones eléctricas pequeñas, fibras sintéticas
Poliuretano PU	Durethan U Perlon U, Ultramid U	Poliuretanos lineales: como las poliamidas, muy resistentes al envejecimiento	Juntas, aislamientos contra la humedad, el calor y la corriente eléctrica

**Tabla 15.5: Propiedades y aplicaciones de algunos plásticos duros (termoestables)**

Plásticos	Nombres comerciales	Propiedades	Aplicaciones
Resinas fenólicas PF	Trylitan Asplit Trolitax Corephan Bakelite Pertinax, Azolone	Baratas, duras, gran resistencia a la tracción, frágiles, resistentes a los disolventes orgánicos, ácidos y bases, resistentes al calor, buenas propiedades eléctricas, no resistentes a las corrientes de fugas	Masas a presión con materiales de relleno: empuñaduras, vainas de cojinetes, ruedas dentadas, cubiertas, materiales prensados a capas: <b>placas aislantes</b>
Resinas aminoplásticas	Resinas de ureaformaldehído: Albamit Beckamin Resamin Pollopas, Cibanoide	Gran resistencia mecánica, duras, frágiles, buenos aislantes eléctricos, resistentes a los ácidos diluidos, bases y disolventes orgánicos, relativamente resistentes a las corrientes de fugas	<b>Piezas conformadas para la fabricación de aparatos eléctricos</b> Letreros, rótulos
Siliconas SI	Resinas de melamina: Albamit Resamin Resopal Ultrapas, Cibamin	Gran resistencia mecánica, duras, frágiles, buenos aislantes eléctricos, resistentes a los ácidos diluidos, bases y disolventes orgánicos, resistentes a las corrientes de fugas	Materiales prensados a capas <b>Piezas aislantes</b>
Resinas epoxídicas EP	Silicon Silopren  Lekutherm Epoxin Araldit Duroxin	Resistentes a temperaturas hasta aprox. 180° C químicamente estables  Gran dureza, resistencia a la tracción, inencontrable, gran adhesividad, químicamente muy estable, muy buenos aislantes eléctricos	<b>Pastas para juntas y aislantes, aislamientos eléctricos muy resistentes al calor</b>  Pegamentos de metales, esmaltes y barnices

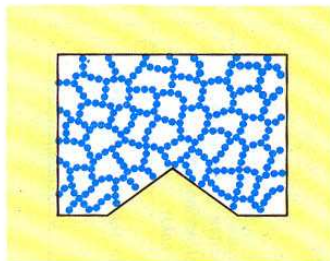


Fig. 15.90. Pieza de plástico duro (representación esquemática).

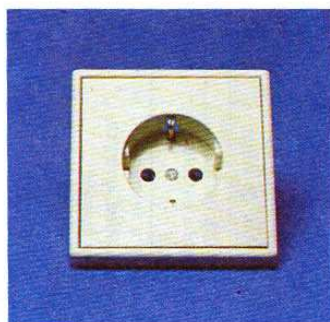


Fig. 15.91. Cubierta de enchufe de plástico duro.

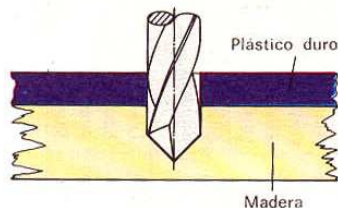


Fig. 15.92. Perforado de un plástico duro sobre una base de madera.

finas gracias a multitud de «puentes» entre ellos. Prácticamente toda la pieza es una sola molécula gigante (fig. 15.90).

Como consecuencia de esto, las diferentes cadenas de moléculas ya no podrán moverse ni a causa de un aumento de la temperatura ni de una tracción. Esto significa que los plásticos duros tendrán las siguientes propiedades:

- Las variaciones de la temperatura apenas modifican la resistencia mecánica. Los plásticos duros no se vuelven ni elásticos ni líquidos. Naturalmente, a temperaturas muy elevadas quedarán también destruidas las macromoléculas, con lo que se perderán las propiedades plásticas.
- Los plásticos duros no se pueden estirar, dilatar ni deformar.

Existen dos métodos principales para la fabricación de este tipo de plásticos. El primer grupo de plásticos duros (por ejemplo, resina de melamina) se fabricaron en líquido, impregnando luego con ellos papel, tejidos, madera, etc. A continuación se prensaban estos materiales en caliente, con lo que las moléculas de plástico se enmarañaban incluyendo a los materiales de relleno (papel, tejidos, madera, etc.).

La segunda posibilidad, empleada por ejemplo en las resinas fenólicas, consiste en fabricar materiales de partida líquidos sin macromoléculas. A continuación se cuecen, se inyectan o se extrusionan, con lo que se obtiene la forma deseada apareciendo simultáneamente las macromoléculas enmarañadas.

Ambos tipos de enmarañado se denominan **templado**. Este proceso es irreversible.

Los plásticos duros están templados.

En la tabla 15.5 se encuentran algunos plásticos duros junto con sus propiedades y campos de aplicación.

#### Datos sobre su mecanizado

En los plásticos duros el mecanizado por arranque de virutas es más frecuente que en los demás plásticos. Los ángulos de las cuchillas deben ser como para los metales duros, o sea ángulo de ataque pequeño y ángulo de filo grande.

Por tanto, para las herramientas especiales resultan los siguientes requisitos:

**Limas:** Hay que emplear limas de surcos cruzados con ángulo de ataque negativo. Deben utilizarse limas nuevas al contrario que con el acero.

**Sierras:** También aquí se emplean sierras de metal, o sea con gran número de dientes (aproximadamente 30). El ángulo de ataque puede valer 5°.

**¡Atención!** Los materiales prensados se astillan fácilmente, por lo que debe prestarse un cuidado especial al serrar.

**Brocas:** Debido a la disipación del calor se prefieren pequeños ángulos de punta (60°...90°). En agujeros planos se emplean pequeños ángulos de ataque lateral (10°...15°), y en agujeros profundos, mayores (35°...40°).

Para evitar que los bordes se rompan debería perforarse sobre madera (figura 15.92).

#### Ejercicios sobre 15.5

1. ¿Por qué diferenciamos entre resistencia de paso y resistencia superficial como características de los materiales aislantes?

2. ¿Cuáles son los materiales inorgánicos naturales que se emplean aún actualmente como aislantes?
3. ¿Qué propiedad especial presenta el vidrio cuando está incandescente?
4. Nombrar algunos aislantes orgánicos naturales.
5. ¿Qué inconveniente tienen el papel y los tejidos al utilizarlos como aislantes?
6. ¿Cuáles son los plásticos de celulosa más importantes en la electrotecnia?
7. ¿En qué se diferencian los plásticos de los demás materiales?
8. ¿Qué elemento se encuentra en todos los plásticos?
9. ¿En qué se diferencian los termoplásticos, los elastómeros y los plásticos duros unos de otros respecto a su estructura y propiedades?
10. Citar algunas propiedades típicas de los plásticos.
11. ¿Qué se entiende por temple de un plástico?

## 15.6. Materiales de unión

### 15.6.1. Técnicas de unión

El técnico electricista tiene que ocuparse sobre todo de **uniones** de piezas. Estas uniones se llaman también **junturas o ensamblados**.

Podemos distinguir los siguientes tipos de uniones:

- unión por contacto (por ejemplo en los conectores, fig. 15.93)
- relleno (por ejemplo, impregnado de un bobinado)
- unión por presión (por ejemplo, atornillamientos de hilos)
- conformado (por ejemplo, colado de enchufes para cables)
- transformado (por ejemplo, retorcimiento de hilos)
- unión por materia (por ejemplo, soldado de hilos)

En este apartado sólo trataremos algunos procedimientos importantes en la electrotecnia, en concreto:

- atornillamientos
- técnicas de unión de líneas
- técnicas de sujeción de líneas.

Los **atornillamientos** pertenecen al grupo de «uniones por presión». Este tipo de uniones se llaman también «por arrastre de fuerza» porque son las fuerzas de rozamiento sobre los filetes de la rosca las que se encargan de la consistencia de la unión.

Cuanto más largos sean los filetes, mayores serán las fuerzas de rozamiento. Por tanto, los tornillos con pequeños ángulos de rosca (paso de rosca pequeño) tendrán grandes fuerzas de agarre.

Los **tornillos** pueden clasificarse según diversos puntos de vista, por ejemplo

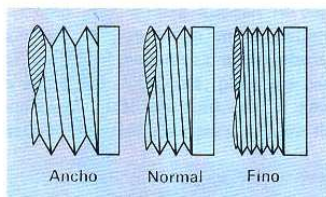


Fig. 15.94. Pasos de rosca.



Fig. 15.93a.



▽ Fig. 15.93b.

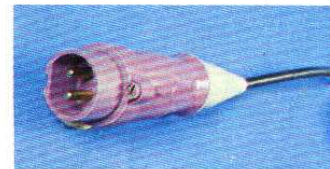


Fig. 15.93c.

▽ Fig. 15.93d.



Fig. 15.93e.

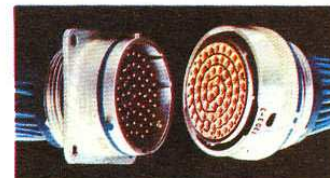


Fig. 15.93. Diferentes conectores:  
a) Enchufe con toma de tierra.  
b) Enchufe de polos no intercambiables.  
c) Enchufe CEE para tensión de alimentación de 24 V.  
d) Enchufe CEE para tensión de alimentación de 380 V.  
e) Conector utilizado en telecomunicación.

Unidad Operativa SENATI – Abancay

Prof. Efraín Gamarra Samanez  
JEFE (a)



Fig. 15.95. Vástagos de tornillos.



Fig. 15.96. Cabezas de tornillos.

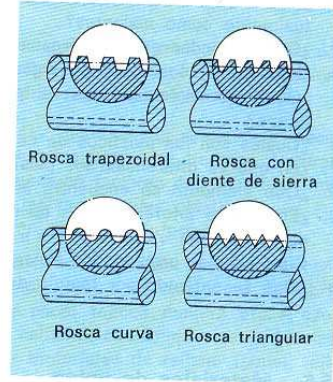


Fig. 15.97. Pasos de rosca. Formas del filete de rosca.

- según el paso de la rosca (fig. 15.97).
- según la forma del vástago (fig. 15.95)
- según la forma de la cabeza (fig. 15.96) y
- según la forma de la rosca (fig. 15.94)

Los nombres de los tornillos vienen determinados por una serie de normas. En electrotecnia la mayoría de los tornillos son de rosca métrica, que se abre via con «M».

A esta letra le sigue el diámetro nominal (diámetro exterior en los tornillos y diámetro máximo en las tuercas) en mm, por ejemplo M4.

Además de los tornillos son también elementos de unión las tuercas y las arandelas.

Las conexiones de cables e hilos eléctricos, además de por atornillamiento, pueden ser fijaciones por presión (fig. 15.98). Cuando se conecten cordones trenzados u otros conductores de varios hilos deberán soldarse los extremos o proveerlos de piezas terminales fijas (casquillos terminales o corchetes), que pueden apretarse, pensarse (extrusión) o también soldarse autógenamente o con soldadura.

Existen varios métodos usuales para realizar las uniones de conductores:

- ajuste o empalme de cabos (fig. 15.99)
- prensado por extrusión (fig. 15.100)
- wire-wrap (fig. 15.101)
- soldadura con material de aporte
- soldadura autógena.

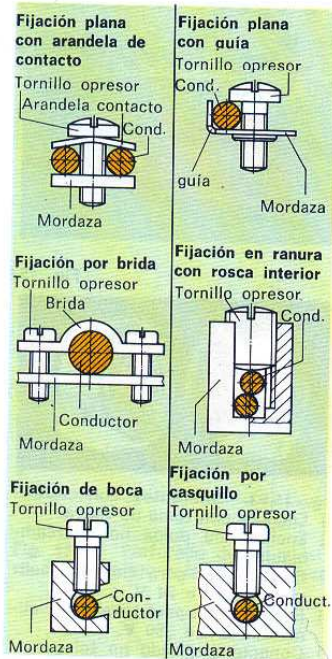


Fig. 15.98. Diferentes tipos de fijaciones por presión.

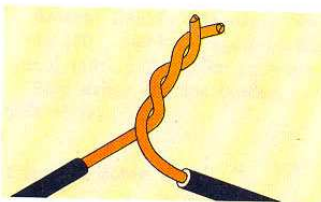


Fig. 15.99. Ajuste o empalme de cabos.



Fig. 15.100. Extrusión.

Al prensar por extrusión los conductores se deforman debido a las grandes presiones, dando lugar así a buenas uniones eléctricas.

La técnica del wire-wrap consiste en enrollar fuertemente un hilo alrededor de una espiga con aristas, con lo que se obtiene la unión. Para obtener las tensiones de tracción necesarias se suele utilizar una pistola eléctrica de enrollado.



Fig. 15.101. Wire-wrapping (aumentado aprox. 10 veces).

### 15.6.2. Soldaduras

La **soldadura de aporte** y la **soldadura autógena** constituyen dos técnicas de unión obtenidas por **unión mediante materia**. Se consideran uniones inseparables, pues para deshacer la unión hay que destrozar el agente aglutinante.

La **soldadura autógena** consiste en calentar las dos piezas a unir en el punto de soldadura hasta la temperatura de fusión a fin de conseguir que fluyan una en otra. Es frecuente añadir el mismo material en forma de barras de soldadura para reforzar la unión (fig. 15.102).

La diferencia básica entre la soldadura autógena y la **soldadura con metal de aporte** consiste en que esta última se calienta y funde la soldadura y no los materiales de las piezas. Se difunde aquél en las piezas, de modo que al solidificarse aparece una unión de cinco capas (fig. 15.103):



Fig. 15.102. Soldadura eléctrica.

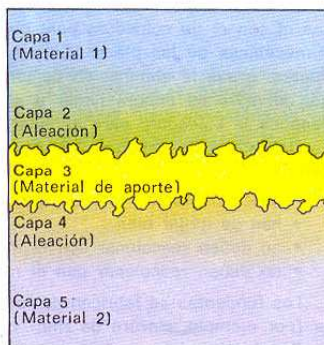


Fig. 15.103. Unión por soldadura de aporte.

- material 1
- aleación del material 1 y del metal de soldadura
- metal de soldadura (capa muy delgada)
- aleación del material 2 y del metal de soldadura
- material 2

Como los metales quedan revestidos por una capa de óxido debido al oxígeno del aire, antes de soldar deberá quitarse esta capa. Esto puede efectuarse por métodos mecánicos como abrasión, cepillado o limado. Sin embargo, esto no suele ser suficiente, pues las capas de óxidos son duras. Entonces deberán emplearse métodos químicos, o sea con ayuda de ácidos, bases o sales. Las sustancias empleadas para ello se llaman **fundentes** (fig. 15.104).

Los fundentes se utilizan antes de soldar para limpiar las superficies de los materiales.



Fig. 15.104.  
Fundentes y soldaduras.



Fig. 15.105. Tubo de soldadura con alma de fundente.

Los fundentes deben o bien reaccionar a temperatura ambiente o presentar un punto de fusión inferior al del metal de soldadura para que la verdadera soldadura no se vea dificultada por el fundente líquido. Para que no puedan formarse nuevas capas de óxidos metálicos los fundentes deben recubrir totalmente la superficie limpiada, o sea que deben mojar bien.

La nueva capa, por su parte, no debe reaccionar con los metales de las piezas ni con el de soldadura para que no empeoren las características eléctricas y mecánicas de las piezas. Este requisito por un lado y la misión de los fundentes, o sea la eliminación de los óxidos, por otro, son contradictorios, o sea que siempre se deberá llegar a un compromiso. Además es necesario limpiar después la soldadura para eliminar los posibles restos de fundente.

De todo esto resultan los siguientes requisitos que deben reunir los fundentes:

- punto de fusión inferior al del metal de soldadura
- han de mojar bien
- no deben reaccionar con el metal de soldadura
- no deben reaccionar con el material de las piezas.

Los fundentes se fabrican en forma de polvo (por ejemplo colofonia), de pasta (por ejemplo, cloruro de zinc) o de líquido (por ejemplo, ácido clorhídrico).

En electrotecnia es frecuente que los fundentes se encuentren dentro del metal de soldadura. Decimos entonces que tenemos un alma de fundente en un tubo de soldadura (fig. 15.105).

#### Denominaciones de los fundentes

Según la norma DIN 8511 todos los fundentes se caracterizan con la letra F. A continuación vienen otras dos letras que indican el tipo del que se trata. Existen los siguientes:

- fundentes para soldadura fuerte (amarilla) de metales pesados F-SH
- fundentes para soldadura blanda de metales pesados F-SW
- fundentes para soldadura fuerte (amarilla) de metales ligeros F-LH
- fundentes para soldadura blanda de metales ligeros F-LW

A estos grupos de letras les siguen cifras que tienen un significado diferente según el tipo.

En la tabla 15.6 se encuentran los fundentes más importantes utilizados en electrotecnia.

De todo lo dicho hasta ahora pueden deducirse los **cuatro pasos** a seguir durante el proceso de soldadura:



**Tabla 15.6: Fundentes empleados en electrotecnia**  
(según la norma DIN 8511)

Código	Descripción y características	Datos sobre su empleo
<b>F-SW 23</b>	Basada en ácidos orgánicos (p. ej., cítrico, oleico, esteárico, benzoico)	Plomo y aleaciones de plomo, objetos metálicos, soldaduras de precisión
<b>F-SW 24</b>	Basadas en aminas, diaminas y urea	Soldaduras de precisión en electrotecnia (sobre todo para soldaduras con soplete sin residuos)
<b>F-SW 25</b>	Basadas en compuestos halogenados orgánicos (p. ej., clorhidrato de anilina, bromuro de cetilpiridina, clorhidrato de hidracina)	Electrotecnia (sobre todo para soldaduras por inmersión y por inducción), objetos metálicos, soldaduras de precisión
<b>F-SW 26</b>	Basadas en resinas naturales (colofonia) o en resinas naturales modificadas con adición de activadores orgánicos halogenados (p. ej., clorhidrato de ácido glutamínico). Los restos de fundente no provocan corrosión después de la soldadura en metales no férricos; por tanto, pueden permanecer sobre el punto de soldadura	Electrotecnia, construcción de aparatos eléctricos, objetos metálicos (sobre todo para soldadura por inducción)
<b>F-SW 31</b>	Basadas en resinas naturales, modificadas o no, y sin aditivos. Los restos de fundente pueden permanecer sobre la soldadura	Electrotecnia, electrónica, revestimiento con baños de soldadura
<b>F-SW 32</b>	Basadas en resinas naturales, modificadas o no, con adición de activadores orgánicos sin halógenos (p. ej., ácido esteárico, salicílico o adípico)	Electrotecnia, electrónica, miniaturización, circuitos impresos

Como estos fundentes pueden ser corrosivos en determinadas condiciones, deberá comprobarse esto en cada caso



Fig. 15.106. Soldadura fuerte.



Fig. 15.107. Relleno de un empalme de cables con resina fundida.



Fig. 15.108. Enrollado con cinta aislante.

1. Obtención de superficies metálicas puras en las piezas.
2. Fundir el metal de soldadura.
3. Difundir el metal de soldadura en las piezas.
4. Limpiar el punto de soldadura.

Cuando la soldadura ha penetrado completamente en las piezas se obtienen costuras de gran resistencia mecánica. Para ello es necesario que el metal de soldadura sea muy fluido y que moje totalmente el punto a soldar.

De todo esto se deducen los **requisitos que deben cumplir los metales de aporte o soldadura**:

- deben ser fácilmente aleables con otros metales
- deben ser muy fluidos
- deben mojar bien para que no formen gotas, sino que cubran rápidamente el punto a soldar
- no deben reaccionar con los fundentes, sino que deben quitarlos
- los metales de soldadura empleados en electrotecnia deben presentar buenas propiedades eléctricas (por ejemplo, conductividad)
- según el esfuerzo al que deban quedar sometidas deberán tener además determinadas propiedades químicas, mecánicas o tecnológicas, por ejemplo impermeabilidad, resistencia a los ácidos, al calor, mecanizabilidad por arranque de virutas, determinada elasticidad y también resistencia mecánica.

La necesidad de una gran resistencia mecánica y resistencia al calor han llevado al empleo de las soldaduras fuertes o amarillas, que sólo pueden conformarse a altas temperaturas.

Las soldaduras con temperaturas de conformación por debajo de los 450° C se llaman **soldaduras blandas**.

Las soldaduras con temperaturas de conformación por encima de los 450° C se llaman **soldaduras fuertes o amarillas**.

- Las soldaduras deben tener un punto de fusión inferior al del material de las piezas.

Para conseguir esto se emplean aleaciones, pues sus puntos de fusión son siempre inferiores que los de los metales puros.

#### Denominación de las soldaduras

La denominación de las soldaduras blandas se encuentra normalizada en las normas DIN 1707, 8512 y 8516, la de las soldaduras fuertes, en las normas DIN 8512 y 8513.

Todos los metales (aleaciones) de soldadura se caracterizan con la letra L. A continuación le sigue un grupo de letras y cifras que se deducen de los símbolos de los componentes de la aleación y de sus porcentajes.

Ejemplos:

Soldadura blanda L-Sn60Pb: 60 % estaño, 40 % plomo.

Soldadura fuerte L-AISI12: 88 % aluminio, 12 % silicio.

Otra posibilidad consiste en utilizar el número normalizado del material, por ejemplo soldadura fuerte 3.2285 DIN 8512.

La tabla 15.7 contiene algunas soldaduras importante y sus campos de aplicación.

**Tabla 15.7: Metales de soldadura empleados en electrotecnia**  
(según las normas DIN 1707, 8512 y 8513)

Grupo		Código	Margen de fusión en °C	Datos sobre su empleo
Soldaduras blandas	Soldaduras blandas de plomo-estaño y estaño-plomo	Con anti-monio L-PbSn30Sb	186...250	Soldadura untuosa, soldaduras de plomo
		Con poco antimonio L-PbSn35(Sb) L-Sn60Pb(Sb)	183...245	Soldaduras de revestimientos de cables Estañado, soldadura de precisión, chapas de precisión calvanizadas, industria eléctrica
			183...190	
	Sin anti-monio L-Sn60Pb	183...190	Industria eléctrica, circuitos impresos, estañado, aceros nobles, industria electrónica, miniaturización	
	Construcción de aparatos eléctricos, electrónica, miniaturización, circuitos impresos	L-Sn50PbCu L-Sn60PbCu L-Sn60PbCu2	183...215 183...190 183...190	Construcción de aparatos eléctricos, electrónica, miniaturización, circuitos impresos
		L-Sn50PbAg L-Sn60PbAg	178...210 178...180	Construcción de aparatos eléctricos, electrónica, miniaturización, circuitos impresos
	Soldaduras blandas para aluminio	L-CdAg5	340...395	Para altas temper. de régimen
	Soldaduras blandas especiales	L-SnZn40	200...310 (350)	Principalmente para revestimientos de cables de aluminio y soldadura eléctrica con prensa Es la soldadura blanda para Al más resistente a la corrosión Principalmente para almas de cable de Al
		L-CdZn20	265...270 (280)	
		L-SnPbZn	180...220	
Soldaduras duras	Soldaduras de cobre	L-ZnCu42	835...845	Plata nueva (alpaca)
		L-CuP8	710...770	Cobre

### 15.6.3. Pegamentos

Con seguridad todos hemos pegado ya muchos objetos de los más variados materiales. Incluso en los metales los pegamentos han sustituido en algunos casos a la soldadura, ya sea autógena o con material de aporte, pues en ambas es necesario un calentamiento. En cambio, al pegar no se forman aleaciones, con lo que no suelen precisarse temperaturas mayores que la ambiente. Las piezas pegadas quedan adheridas como consecuencia de fuerzas adhesivas.

Las uniones con pegamentos son uniones por adhesión y no aleaciones.

Las uniones por pegamento también pertenecen al grupo de uniones mediante materia.



Fig. 15.109. Pegamento de dos componentes.



Fig. 15.110. Pegamento de masilla.

Existen multitud de pegamentos, pues se han desarrollado pegamentos especiales para los más variados materiales y exigencias. Su tratamiento varía mucho de unos a otros.

#### Datos sobre su tratamiento

Es imprescindible el seguir al pie de la letra las instrucciones del fabricante. En caso contrario podría ocurrir que los pegamentos no se endurezcan o que las piezas se suelten. Esto puede pasar sobre todo con los plásticos. Deberá tenerse en cuenta primordialmente si el pegamento es realmente adecuado para el plástico en cuestión.

Aún no ha sido completamente solucionado el problema de cómo debe ser la superficie de los materiales. Tanto con superficies lisas como rugosas se han obtenido buenos y malos resultados. Lo que sí es importante es que no existan partículas sueltas, como polvo, arena o virutas sobre las superficies. También deben suprimirse la humedad y las grasas.

**¡Precaución! Los pegamentos contienen a menudo disolventes venenosos o explosivos!** (¡Respetar las instrucciones para el uso!)

Por ello no deberán respirarse los vapores. En caso de preparar cantidades grandes deberá ventilarse suficientemente.

Evidentemente tampoco se deberá fumar ni encender llamas libres.

Se distinguen dos tipos de pegamentos: pegamentos de un componente y pegamentos de varios componentes (generalmente de dos componentes).

Los **pegamentos de un solo componente** se endurecen con el oxígeno del aire o mediante la humedad. Es frecuente el tener que emplearlos a presión o en caliente para conseguir una buena adhesión. Suele ser precisa o bien una presión grande y breve o una presión mediana pero duradera.

En los pegamentos de dos componentes, al verdadero pegamento (adhesivo) debe añadirse un endurecedor. Deben respetarse exactamente las proporciones indicadas para la mezcla (fig. 15.109).

Los pegamentos suelen ser plásticos del grupo de los elastómeros o de los termoestables. En electrotecnia se les emplea fundamentalmente como masilla para las abrazaderas de sujeción de líneas planas (fig. 15.110).

Los pegamentos metalizados (con una masa de relleno de hasta un 80 % de metal) se utilizan también como conductores eléctricos o térmicos («pasta conductora del calor»).

En un sentido amplio también deben incluirse en el grupo de los pegamentos las resinas fundibles. Son en realidad plásticos duros (termoestables, ver 15.5), por ejemplo poliésteres, epóxidos o poliuretanos no saturados.

#### Ejercicios sobre 15.6

1. Deben unirse varios conductores de varios hilos.  
¿Qué técnicas de unión de líneas emplearemos?  
Citar por lo menos dos posibilidades y razonar la decisión.
2. ¿Cuál es la diferencia básica entre la soldadura autógena y la soldadura con material de aporte?
3. ¿Cuál es la misión principal de los fundentes?
4. Citar las diferencias entre las soldaduras blandas y las duras.
5. ¿En qué fundentes debe comprobarse antes de su uso si son corrosivos?
6. Nombrar las propiedades principales que deben reunir los metales de soldadura empleados en electrotecnia.
7. ¿Qué diferencias existen entre pegar y soldar con material de aporte?

8. ¿Qué es un pegamento de dos componentes?  
 9. ¿Qué debe tenerse en cuenta al trabajar con pegamentos?

## 15.7. Materiales magnéticos

### 15.7.1. Propiedades de los materiales magnéticos

En la figura 15.111 podemos ver una serie de objetos de materiales ferromagnéticos, que deben reunir una serie de propiedades muy diversas.

- En los utillajes eléctricos de la primera fotografía el material del núcleo eléctrico debe reforzar el magnetismo de la bobina, y sólo debe existir durante el tiempo en el que circule una corriente por ella.
- Para los imanes se precisan en cambio materiales que presenten una gran inducción magnética después de desconectar. En ellos deberá «desaparecer» el mínimo magnetismo posible.

Todos los materiales mostrados se componen de los mismos materiales de partida: hierro, cobalto y níquel. A veces también se emplean aleaciones de otros metales. Por ejemplo aleaciones de cobre que contienen manganeso.

Un material **ferromagnético** muestra, bajo la influencia de un campo magnético exterior, una imanación reforzada en la dirección del campo.

Ejemplo: hierro puro  $\mu_r \cong 40\ 000$   
 níquel-hierro  $\mu_r \cong 300\ 000$

También existen materiales que forman pares de imanes elementales de sentidos opuestos (fig. 15.112). Estos materiales se denominan **antiferromagnéticos**, y son fundamentalmente los lantánidos, sus compuestos y el óxido de manganeso (MnO).

Cuando los imanes elementales antiparalelos son de diferentes valores existirá una imanación en una determinada dirección, imanación debida a la diferencia entre dos campos magnéticos (fig. 15.112c). Este tipo de materiales se denominan **ferrimagnéticos**.

Un material ferrimagnético, bajo la influencia de un campo magnético exterior, muestra una imanación reforzada en la dirección del campo. Es la diferencia de dos campos antiparalelos y, por tanto, más débil que en los materiales ferromagnéticos.

La mayoría de las ferritas pertenecen a este grupo.

También en los materiales magnéticos cuando se eleva la temperatura aumenta el movimiento térmico de sus moléculas. Entonces los imanes elementales perderán su ordenación. A partir de una determinada temperatura no existe ni ferromagnetismo ni ferrimagnetismo. Esta temperatura se denomina **temperatura de Curie**.<sup>1</sup>

Para el hierro, el punto de Curie se encuentra a 768°C (1041 K). Incluso cantidades mínimas de componentes de la aleación pueden modificar tanto la estructura cristalina que en algunos materiales la temperatura de Curie es próxima a la temperatura ambiente.

La imanación y desimanación se representan mediante la curva de histéresis (ver 12.1.9, experimento 12-4). Después de imanar hasta llegar a la saturación (orientación de todos los imanes elementales) se suprime el campo exterior; quedará una imanación residual. Para eliminarla deberá imanarse en sentido opuesto con la intensidad de campo coercitivo.

<sup>1</sup> Pierre Curie, físico francés, 1859-1906.

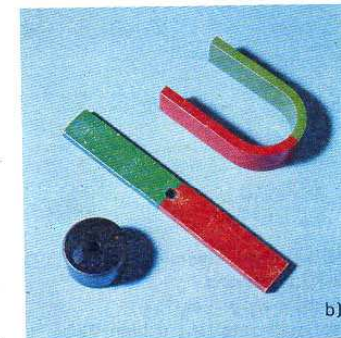
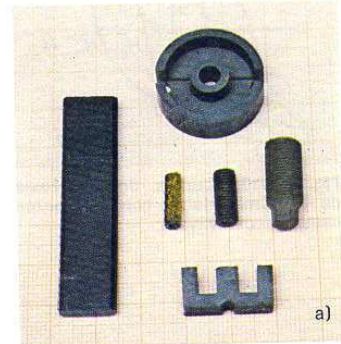


Fig. 15.111. Piezas de materiales magnéticos.

- a) Hierro dulce (temporal).  
 b) Hierro duro (permanente).

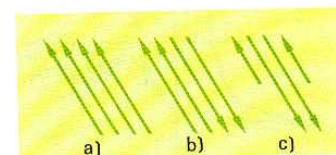


Fig. 15.112.  
 a) ferromagnetismo  
 b) antiferromagnetismo  
 c) ferrimagnetismo

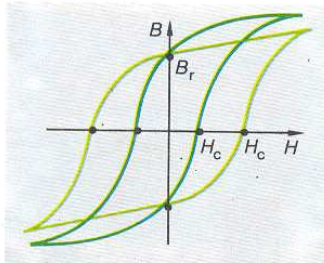


Fig. 15.113. Curvas de histéresis de dos materiales con diferentes campos coercitivos.

En la figura 15-113 hemos representado dos curvas con la misma inducción residual, pero con diferentes campos coercitivos. En el material de la curva más estrecha se precisa una intensidad de campo mucho menor para eliminar la imanación residual. Por tanto, en este material se podrá invertir el sentido de la imanación con más facilidad.

Un material **magnético dulce** permite fácilmente invertir el sentido de la imanación.

Un material **magnético duro** precisa un campo intenso para invertir el sentido de la imanación.

Ambos materiales se obtienen a partir de los mismos materiales. Modificando las aleaciones y elaboración pueden variarse las propiedades dentro de amplios márgenes.

Veamos una comparación de las intensidades de campo coercitivo:

$$\text{Material magnético dulce } H_c = 0,4 \frac{\text{A}}{\text{m}}$$

$$\text{Material magnético duro } H_c = 300\,000 \frac{\text{A}}{\text{m}}$$

Los valores importantes de la curva de histéresis son:

- máxima inducción magnética  $B_{\text{max}}$   
(inducción de saturación)
- inducción residual  $B_r$
- campo coercitivo  $H_c$
- campo magnético necesario para la saturación  $H_s$

Junto a estos valores y la temperatura de Curie es importante conocer el comportamiento de pérdidas del material. Como las pérdidas se producen debido a las variaciones del campo, se las llama **pérdidas por inversión de la imanación** o **pérdidas en el hierro**.

Las pérdidas en el hierro se componen de tres partes:

- pérdidas por histéresis
- pérdidas por corriente de Foucault
- pérdidas por retardo

Para explicar las **pérdidas por histéresis** vamos a observar nuevamente algunas curvas (fig. 15.114). Ambas curvas tienen los mismos datos de codo ( $B_{\text{max}}$ ,  $B_r$ ,  $H_c$ ) pero el material de la curva 2 precisa, para alcanzar la saturación, una intensidad de campo  $H_s$  mayor que el otro material. La superficie encerrada por la curva 2 es mayor. Esta superficie nos sirve para valorar las pérdidas en el material del núcleo porque, aunque se vuelve a alcanzar el estado inicial, para recorrer toda la curva es necesario realizar un trabajo.

Como la energía no puede desaparecer se habrá transformado en calor en el imán. Por tanto, **las curvas de histéresis deberán ser lo más estrechas posible**.

También las **pérdidas por corrientes de Foucault** generan calor. Ya sabemos que toda variación del campo magnético induce una tensión en los conductores; por tanto, en el núcleo también aparecerán tensiones inducidas que darán lugar a corrientes desordenadas formando remolinos: las corrientes de Foucault. El valor de dicha tensión depende fundamentalmente de la velocidad de variación del campo

#### Pérdidas por inversión de la imanación

Símbolo  $P_1$  o bien  $P_{1,5}$   
(antiguamente:  $V_{10}$  o bien  $V_{15}$ )<sup>1</sup>

$$[P] = \frac{\text{W}}{\text{kg}}$$

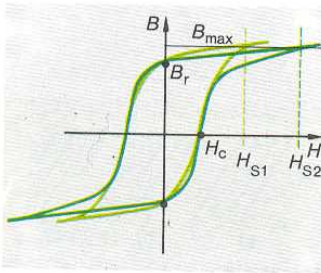


Fig. 15.114. Curvas de histéresis de dos materiales con pérdidas diferentes.

<sup>1</sup>  $P_1$  ( $V_{10}$ ) son las pérdidas para una inducción  $B = 1$  T.  
 $P_{1,5}$  ( $V_{15}$ ) son las pérdidas para una inducción  $B = 1,5$  T.

$$U = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

Por tanto estas pérdidas serán mayores a frecuencias elevadas. La potencia disipada, y por tanto también el trabajo transformado en calor, dependen del cuadrado de la tensión y del inverso de la resistencia.

$$P = \frac{U^2}{R}$$

Por ello la resistividad de los materiales magnéticos deberá ser lo mayor posible.

Las **pérdidas por retardo** se producen debido a unos determinados retardos en la orientación de los imanes elementales. Evidentemente el tiempo existente entre dos variaciones de la dirección será de suma importancia en estas pérdidas, que serán por tanto grandes para frecuencias elevadas. A frecuencias todavía más elevadas puede ocurrir no obstante lo contrario, o sea que a causa de fenómenos de resonancia se produzca una amplificación de potencia en lugar de una pérdida.

No podemos hacer afirmaciones generales sobre este tipo de pérdidas porque habría que comprobar en cada caso la combinación de las estructuras cristalinas y de la gama de frecuencias en que se vaya a trabajar.

Para fabricar materiales magnéticos deberemos, pues, tener en cuenta las siguientes propiedades:

- inducción magnética de saturación
- inducción residual
- campo coercitivo
- temperatura de Curie
- pérdidas en el hierro por inversión de la imanación

### 15.7.2. Materiales magnéticos dulces

Los materiales magnéticos dulces se emplean cuando se deba reforzar un campo magnético que varíe permanentemente. Por tanto, deberá poderse invertir la imanación con facilidad y en su totalidad. Además, al desconectar la corriente no debe quedar campo magnético alguno.

Necesitamos, pues, las siguientes características:

- pequeña inducción residual
- pequeño campo coercitivo
- gran inducción de saturación
- pequeñas pérdidas en el hierro

Por tanto, la curva de histéresis debería tener una forma como la de la figura 15.115.

Es posible realmente fabricar materiales con curvas de histéresis muy estrechas y pendientes. Este tipo de materiales alcanzan la inducción de saturación con campos magnéticos de pequeña intensidad. Por desgracia presentan una gran inducción residual que, sin embargo, desaparece para campos coercitivos muy pequeños.

Como los metales puros no presentan este tipo de comportamiento deberemos alearlos o sinterizarlos. Según cuales sean los materiales de partida distinguiremos materiales **metálicos** y materiales a base de **óxidos**.

Mediante métodos especiales de laminado y recocidos intermedios se con-

Unidad Operativa SENATI – Abancay

Prof. Efraín Gamorra Samanez

JEFE (a)

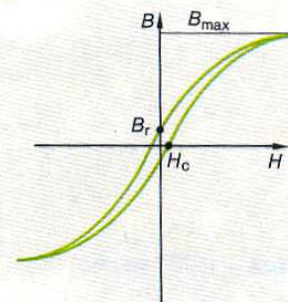


Fig. 15.115. Curva de histéresis de un material magnético dulce.

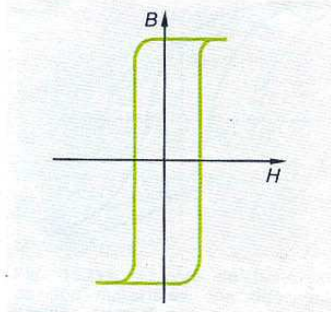


Fig. 15.116. Curva de histéresis de una chapa de textura.

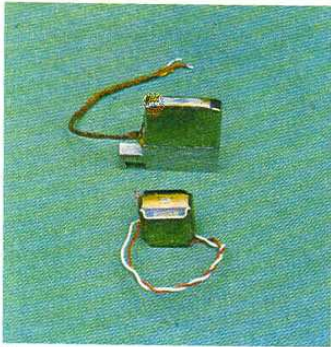


Fig. 15.117. Componentes de materiales magnéticos dulces (cabezales magnéticos).

sigue que la estructura cristalina, y por tanto también los imanes elementales, se orienten en determinadas direcciones. Este tipo de chapas se dice que son de granos orientados (chapas de textura).

De este modo se consigue que con intensidades de campo muy pequeñas se orienten los imanes elementales en las direcciones deseadas al imanar en uno y otro sentido. Los materiales presentarán, pues, curvas de histéresis casi rectangulares (fig. 15.116).

Este tipo de comportamiento se presenta particularmente en las **ferritas (materiales magnéticos dulces y a base de óxidos)**. Se sinterizan a partir de óxidos metálicos, por lo que son duras y frágiles. Sólo se las puede mecanizar por rectificación.

Su resistividad es muy grande en comparación con la de los metales puros (¡hasta  $10^{20}$  veces mayor!), pues no son materiales compactos sino sinterizados a partir de óxidos metálicos. Por ello sus pérdidas por corrientes de Foucault son muy pequeñas. Las ferritas podrán también emplearse a frecuencias muy elevadas. Su principal campo de aplicaciones se encuentra en la telecomunicación, por ejemplo en las bobinas de los circuitos oscilantes, en los transformadores de señales, en los cabezales de escritura y borrado de los magnetófonos, en las memorias de cinta de las instalaciones de proceso de datos.

Los materiales magnéticos a base de óxidos tienen el inconveniente de que sus permeabilidades e inducciones de saturación son relativamente pequeñas, hecho que por otro lado no presenta una importancia especial en telecomunicación.

Los **materiales magnéticos dulces y metálicos** más empleados son, entre otros:

- Hierro no aleado (con  $< 0,05\%$  C) para relés y blindajes de no muy alta calidad.
- Aleaciones de hierro con silicio para contactores y relés de alta calidad, amplificadores magnéticos, transformadores de medida.
- Aleaciones de hierro y níquel, como las de Fe-Si, pero para frecuencias mayores.
- Aleaciones de hierro y cobalto cuando se deseen inducciones magnéticas grandes ( $\approx 2,5$  T).

Sus **nombres comerciales** son, entre otros: chapa magnética, hyperm, trafo-perm, megaperm, mumetal, permenorm, permalloy, perminvar.

Los **materiales magnéticos dulces a base de óxidos** son ferritas constituidos por óxidos de los siguientes metales:

Manganeso y zinc	Manganeso y magnesio
Níquel y zinc	Níquel y cobalto
Litio y níquel	Cobre y manganeso

El metal nombrado en cada caso en primer lugar es el componente predominante.

### 15.7.3. Materiales magnéticos duros

Los componentes de materiales magnéticos duros deben poseer una inducción residual lo mayor posible, pues se emplean principalmente como imanes permanentes. Por tanto, la inducción residual deberá ser sólo ligeramente inferior a la inducción de saturación.

Para que el magnetismo residual no quede suprimido por otros campos deberá ser también muy grande el campo coercitivo.

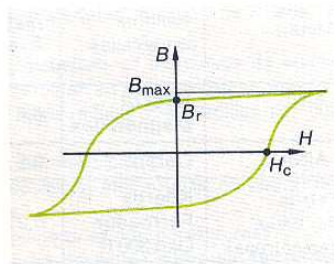


**Tabla 15.8: Propiedades y aplicaciones de algunos materiales magnéticos y metálicos dulces**

Material	Permeabilidad relativa $\mu_r$ (max)	Permeabilidad inicial para $0,4 \frac{A}{m}$	Campo coercitivo $H_c$ en $\frac{A}{m}$	Ejemplos de aplicaciones
Hierro puro	30000...40000	1500...2000	$\geq 6,4$	Blindajes, piezas polares, piezas de relés, yugos magnéticos
Aleaciones de Fe-Si laminados en caliente o en frío con granos orientados, laminado en frío	6000 9000 60000	— — 3000	48 16 8	Máquinas eléctricas Transformadores Transformadores
Aleaciones de Ni-Fe	8000...20000  60000  90000  120000  300000	2000...3000  6000  45000  45000  130000	20...50  5  1,5  1,5  0,5	Transformadores de señales, bobinas reactivas, filtros Piezas para relés, dispositivos de medida, blindajes, transformadores para corriente  Transformadores de medida y de señales; con ciclo rectangular; amplificadores magnéticos, núcleos de memoria y de contadores  Transformadores de señales, amplificadores magnéticos, blindajes, piezas para relés y dispositivos de medida Con ciclo rectangular: núcleos para memorias y conmutación

Por tanto, estos materiales deberán presentar una curva de histéresis ancha y alta (fig. 15-118).

La superficie encerrada por la curva representa el trabajo almacenado, o sea la energía del imán en cuestión. Por ello el producto de la inducción residual  $B_r$  por el campo coercitivo  $H_c$  se utiliza para valorar la calidad de un imán permanente.



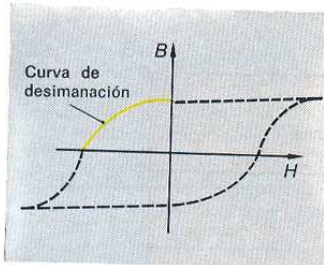


Fig. 15.119. Curva de desimanación.

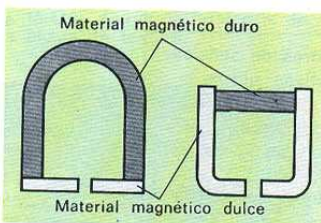


Fig. 15.120. Estructura frecuente en los imanes permanentes.

El tramo de la curva de histéresis que discurre por el segundo cuadrante es de suma importancia; se denomina **curva de desimanación** (fig. 15.119).

- Una curva muy larga (fig. 15.121) significa que se precisará un campo muy intenso para suprimir el magnetismo residual.
- Una curva casi horizontal con un codo muy pendiente significa que casi todos los imanes elementales varían su orientación al mismo tiempo. Este hecho se presenta sobre todo en los materiales de granos orientados.

Los materiales magnéticos duros se fabrican básicamente de la misma manera que los blandos.

Antes de poderlos utilizar como imanes permanentes se los deberá imanar, lo que se realiza con campos magnéticos aproximadamente cinco veces mayores que el campo coercitivo.

Los imanes permanentes que se encuentran en el mercado sólo poseen una pequeña parte de material magnético duro. La parte restante es de un material magnético blando (fig. 15.120) a causa de la gran permeabilidad que estos materiales presentan.

Se emplean entre otros los siguientes **materiales magnéticos metálicos duros**:

Aluminio-níquel-hierro (AlNi), aluminio-níquel-cobalto (AlNiCo), hierro-cobalto-vanadio.

Sus **nombres comerciales** son, por ejemplo: koerzit, thermoperm, oerstit.

Los **materiales magnéticos duros a base de óxidos** (ferritas) se fabrican de forma similar a las ferritas blandas. Es frecuente alojarlos en plástico o goma, con lo que se simplifica notablemente su ulterior mecanizado, aumentando así considerablemente sus posibles aplicaciones.

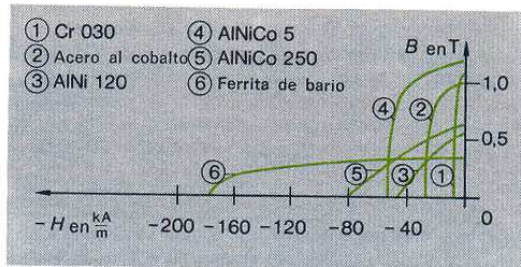


Fig. 15.121. Curvas de desimanación de algunos materiales.

Tabla 15.9: Propiedades de algunos materiales magnéticos duros

Material	Nombres comerciales	Inducción residual $B_r$ , en T	Campo coercitivo $H_c$ , en $\frac{kA}{m}$
AlNi	Koerzit Magnetoflex	0,6...0,8	25...70
AlNiCo	Oerstit	0,5...1,2	35...95
Ferrita de bario (anisótropa)	Koerox Ferroxdur Oxit300R	0,2...0,4	200...350

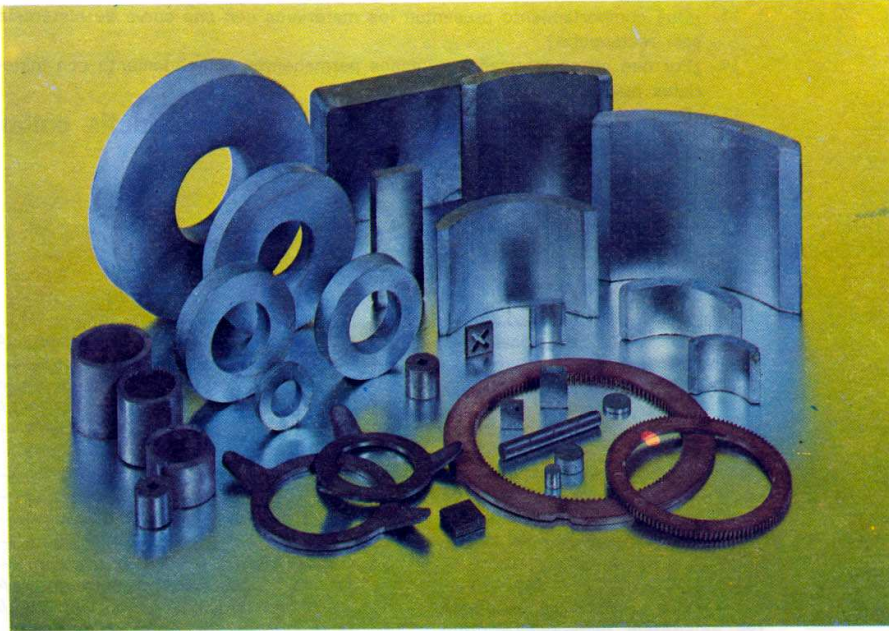


Fig. 15.122. Imanes permanentes.

Materiales importantes de este grupo son:

Ferritas de bario, óxido de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$  con estructura cristalina especial) para magnetófonos, ferritas de cobalto, ferritas de bario y estroncio.

**Nombres comerciales** son, entre otros: koerox, ferroxdure, maniperm, magnetoflex, prac, gumox.

#### Ejercicios sobre 15.7

1. ¿Cuáles son los órdenes de magnitud de las permeabilidades de los materiales ferromagnéticos?
2. ¿Qué propiedad poseen los materiales ferrimagnéticos?
3. ¿Qué se entiende por temperatura de Curie?
4. ¿Qué diferencias existen entre los materiales magnéticos duros y los dulces?
5. Explicar las diferencias (ejercicio 4) basándose en las curvas de histéresis.
6. ¿Cuáles son los componentes de las pérdidas en el hierro de un imán?
7. ¿Qué puede hacerse con un material para reducir sus pérdidas por corrientes de Foucault?
8. ¿Qué inconveniente tiene la solución del ejercicio 7?
9. ¿Qué material sugeriría para el núcleo de un electroimán de una grúa?
10. ¿Cuál es la estructura de las ferritas?
11. ¿Qué materiales se emplean en los núcleos de los contactores?
12. ¿Qué tramo de la curva de histéresis se denomina curva de desimanciación?

13. ¿Qué comportamiento presentan los materiales con una curva de histéresis casi rectangular?
14. ¿Por qué no se fabrican los imanes permanentes completamente con materiales magnéticos duros?
15. ¿Con qué material se revisten las cintas magnetofónicas?

# ELECTROTECNIA

## Curso elemental

[WWW.AUTOAPRENDIZAJE.INFO](http://WWW.AUTOAPRENDIZAJE.INFO)

