
ELECTRICIDAD Y ELECTRÓNICA

Lic. Agustín Rela



Colección: LAS CIENCIAS NATURALES Y LA MATEMÁTICA

Colección: LAS CIENCIAS NATURALES Y LA MATEMÁTICA

ELECTRICIDAD Y ELECTRÓNICA

Lic. Agustín Rela

ADVERTENCIA

La habilitación de las direcciones electrónicas y dominios de la web asociados, citados en este libro, debe ser considerada vigente para su acceso, a la fecha de edición de la presente publicación. Los eventuales cambios, en razón de la caducidad, transferencia de dominio, modificaciones y/o alteraciones de contenidos y su uso para otros propósitos, queda fuera de las previsiones de la presente edición -Por lo tanto, las direcciones electrónicas mencionadas en este libro, deben ser descartadas o consideradas, en este contexto-.

Distribución de carácter gratuito.

a u t o r i d a d e s

PRESIDENTE DE LA NACIÓN

Dra. Cristina Fernández de Kirchner

MINISTRO DE EDUCACIÓN

Dr. Alberto E. Sileoni

SECRETARIA DE EDUCACIÓN

Prof. María Inés Abrile de Vollmer

DIRECTORA EJECUTIVA DEL INSTITUTO NACIONAL DE
EDUCACIÓN TECNOLÓGICA

Lic. María Rosa Almandoz

DIRECTOR NACIONAL DEL CENTRO NACIONAL DE
EDUCACIÓN TECNOLÓGICA

Lic. Juan Manuel Kirschenbaum

DIRECTOR NACIONAL DE EDUCACIÓN TÉCNICO PROFESIONAL Y
OCUPACIONAL

Ing. Roberto Díaz

Ministerio de Educación.
Instituto Nacional de Educación Tecnológica.
Saavedra 789. C1229ACE.
Ciudad Autónoma de Buenos Aires.
República Argentina.
2010

ELECTRICIDAD Y ELECTRÓNICA

Lic. Agustín Rela



Colección: LAS CIENCIAS NATURALES Y LA MATEMÁTICA

Colección “Las Ciencias Naturales y la Matemática”.
Director de la Colección: Juan Manuel Kirschenbaum
Coordinadora general de la Colección: Haydeé Noceti.

Queda hecho el depósito que previene la ley N° 11.723. © Todos los derechos reservados por el Ministerio de Educación - Instituto Nacional de Educación Tecnológica.

La reproducción total o parcial, en forma idéntica o modificada por cualquier medio mecánico o electrónico incluyendo fotocopia, grabación o cualquier sistema de almacenamiento y recuperación de información no autorizada en forma expresa por el editor, viola derechos reservados.

Industria Argentina

ISBN 978-950-00-0751-1

Director de la Colección:
Lic. Juan Manuel Kirschenbaum
Coordinadora general y académica de la Colección:
Prof. Ing. Haydeé Noceti
Diseño didáctico y corrección de estilo:
Lic. María Inés Narvaja
Ing. Alejandra Santos
Coordinación y producción gráfica:
Tomás Ahumada
Diseño gráfico:
María Victoria Bardini
Ilustraciones:
Diego Gonzalo Ferreyro
Federico Timerman
Retoques fotográficos:
Roberto Sobrado
Diseño de tapa:
Tomás Ahumada
Administración:
Cristina Caratozzolo
Néstor Hergenrether
Colaboración:
Téc. Op. en Psic. Soc. Cecilia L. Vazquez
Dra. Stella Maris Quiroga
Nuestro agradecimiento al personal del Centro Nacional de Educación Tecnológica por su colaboración.

Rela, Agustín
Electricidad y electrónica / Agustín Rela; dirigido por Juan Manuel Kirschenbaum.
- 1a ed. - Buenos Aires: Ministerio de Educación de la Nación. Instituto Nacional de Educación Tecnológica, 2010.
285 p.: il.; 24x19 cm. (Las ciencias naturales y la matemática / Juan Manuel Kirschenbaum.)

ISBN 978-950-00-0751-1

1. Electricidad.
 2. Electrónica.
 3. Enseñanza Secundaria.
- I. Título

CDD 621.307 12

Fecha de catalogación: 19/01/2010

Impreso en Anselmo L. Morvillo S. A., Av. Francisco Pienovi 317 (B1868DRG), Avellaneda, Pcia. de Buenos Aires, Argentina.



Tirada de esta edición: 100.000 ejemplares



Lic. Agustín Rela

El Autor

Agustín Rela es electrotécnico y Licenciado en Física. Se desempeñó como docente en escuelas secundarias. Es autor de libros para estudiantes y docentes. Ha publicado numerosos artículos en revistas especializadas y ha presentado ponencias en congresos sobre temas referidos a la tecnología y a su enseñanza. Se desempeñó durante más de veinte años como profesor de física de la Universidad de Buenos Aires. Actualmente se desempeña como docente en el Instituto Municipal de Educación Superior de Formación Docente. Es asesor en el área de investigación y desarrollo en establecimientos industriales en temas referidos a aisladores de alta tensión. Codirige la revista Q, e. d. de divulgación de la física y la matemática para el Ciclo Básico Común de la Universidad de Buenos Aires.



Electricidad

Capítulo 1	
Fundamentos de la electrostática	9
Capítulo 2	
Aplicaciones electrostáticas	21
Capítulo 3	
Inconvenientes de las cargas estáticas	31
Capítulo 4	
Fundamentos de electrodinámica	41
Capítulo 5	
Aplicaciones de la corriente eléctrica	53
Capítulo 6	
Materiales eléctricos	63
Capítulo 7	
Magnetostática	75
Capítulo 8	
Inducción electromagnética	87
Capítulo 9	
Aplicaciones científicas, industriales y domésticas del magnetismo	99
Capítulo 10	
Electricidad y medio ambiente	111

Electrónica

Capítulo 11	
Historia de la electrónica	125
Capítulo 12	
Diodos semiconductores	137
Capítulo 13	
Transconductancia	151
Capítulo 14	
Componentes	163
Capítulo 15	
Amplificadores operacionales	177
Capítulo 16	
Herramientas de experimentación	191
Capítulo 17	
Introducción a las técnicas digitales	203
Capítulo 18	
Nuevos materiales y sus aplicaciones	217
Capítulo 19	
Sistemas microelectromecánicos (MEMS)	229
Capítulo 20	
Electrónica y medio ambiente	243
<i>Respuestas a las Propuestas de Estudio</i>	256
<i>Glosario General</i>	266
<i>Apéndices</i>	274

Fundamentos de la electrostática



● **PINTADO ELECTROSTÁTICO.** Las gotitas de pintura, cargadas eléctricamente por una pistola conectada a diez mil volt, se adhieren al objeto por delante y por atrás, sin que se dispersen en el ambiente. Los filtros de carbón activado protegen la respiración del pintor de los solventes volátiles.

Fundamentos de la electrostática (cargas en reposo)

■ Historia, cargas, polaridad

Electra es un personaje de antiguas obras famosas de teatro que tratan sobre el adulterio y terribles casos de asesinato y venganza. Ese nombre de mujer, en griego, significa rubia, ambarina o del color del ámbar. El ámbar es resina de pinos u otras plantas fosilizada y endurecida durante milenios, que se usaba en perfumería y para fabricar peines y adornos. El propio ámbar, en griego, se llama *electrón*; y las palabras “elegido” y “selecto” se relacionan, en ese idioma, con lo notable y brillante.

Desde muy antiguo, quizá, desde antes de la escritura, se notó que cuando se frota con un paño o contra el cabello un objeto de ámbar, saltan chispas que se ven en la oscuridad y se oyen; y el objeto levanta plumas, pelusas y otros cuerpos livianos. Se observó también que en algunos casos los objetos frotados se atraen y en otros se rechazan. Esos efectos se llamaron ambarinos, o eléctricos.

Si un cuerpo atrae a otros dos, estos se repelen. Si rechaza a otros dos, estos también se repelen. Y si un cuerpo atrae a otro y rechaza un tercero, estos dos últimos cuerpos se atraen.

De eso se dedujo que hay dos clases de electricidad, primitivamente llamadas *ambarina* y *vítrea*, la del ámbar y la del vidrio. Después se las llamó polaridades negativa y positiva, respectivamente.

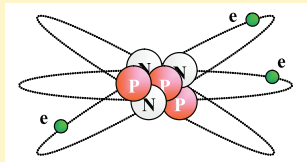
Hoy, 24 siglos después, explicamos esos efectos por la estructura atómica de la materia que sabemos compuesta por átomos, a su vez, formados por protones positivos, electrones negativos y neutrones neutros.



● Eurípides (480-406 a.C.), autor de una de las tragedias de *Electra*.



● Fisionito, personaje de *Los Simpson*. El átomo de litio es el que más aparece en las caricaturas.



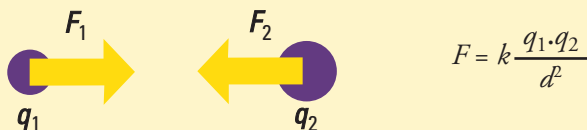
● El átomo de litio tiene tres protones, tres neutrones y tres electrones.

Normalmente la cantidad de protones iguala la de electrones, por eso, la materia es neutra de ordinario. Sin embargo, cuando se ponen en contacto dos cuerpos y después se los separa, algunos de los electrones que pertenecían a un cuerpo pueden quedar en el otro, y así, el primero resulta con un exceso de protones (y de carga positiva), mientras el otro queda cargado negativamente.

■ Fuerzas eléctricas, ley de Coulomb

Las cargas eléctricas se miden, o se expresan, en *coulomb*. Un coulomb equivale a 6,24 trillones¹ de electrones.

Las cargas eléctricas del mismo signo se repelen, y las de signo opuesto se atraen. De acuerdo con el principio de acción y reacción, esas fuerzas son de igual intensidad o módulo. Su valor está dado por la *ley de Coulomb*:


$$F = k \frac{q_1 \cdot q_2}{d^2}$$

Las letras q_1 y q_2 representan dos cargas eléctricas, en coulomb d es la distancia entre las cargas, en metros. F es la fuerza con la que se atraen o se repelen las cargas, según su polaridad, y se obtiene en newton. La *constante electrostática* k vale aproximadamente² $9 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{C}^{-2}$, donde N es newton, m metro y C coulomb (metro a la menos dos es lo mismo que uno sobre metro al cuadrado.)

Recordemos que un newton es la fuerza que, aplicada a un cuerpo de un kilogramo de masa, en cada segundo que transcurre, le hace cambiar su velocidad en un metro por segundo.

Ejemplo. ¿Con qué fuerza se repelen dos gotas de niebla separadas una millonésima de metro, y cargadas cada una con una carga de un billonésimo de coulomb?³

Respuesta: $F = 9 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{C}^2 \times 10^{-12} \text{ C} \times 10^{-12} \text{ C} / (10^{-6} \text{ m})^2$; $F = 8,99 \times 10^{-3} \text{ N}$, casi la centésima parte de un newton, o aproximadamente un gramo. (Esa fuerza parece pequeña, pero es mucho mayor que el peso de una gota de niebla.)

Hay otras unidades de carga además del coulomb; por ejemplo el *faraday*, equivalente a un mol de electrones, o sea $6,02 \times 10^{23}$ de esas cargas elementales. Otra es la *ues*, la unidad electrostática de carga, también llamada *statcoulomb* (*statC*) o *franklin* (*Fr*). La equivalencia es $1 \text{ C} = 2.997.924.580 \text{ statC}$.

Cuando una carga de un coulomb pasa de un sitio a otro en un tiempo de un segundo, se dice que circula una corriente de un ampere. Por eso al coulomb se lo llama también *ampere segundo*.



- La carga que acumula alguien cuando se levanta de un asiento de plástico es del orden de un millonésimo de coulomb, suficiente para ocasionar molestias cuando se descarga bruscamente al tocar tierra, o un objeto grande. En la foto, llavero semiconductor, para descargarse suavemente y sin molestia.



- Se supone que el incendio del dirigible Hindenburg, lleno de hidrógeno combustible, obedeció a una descarga electrostática en el momento de tocar tierra, en 1937.

¹ En la Argentina y demás países de habla española un trillón es un millón de millones de millones, o sea 10^{18} unidades. Lo mismo vale para el Reino Unido de Gran Bretaña e Irlanda del Norte. Pero en los Estados Unidos de América un trillón es apenas 10^{12} , lo que aquí llamamos un billón. Eso es fuente de errores de traducción y de confusiones en algunos casos.

² El físico escocés James Clerk Maxwell determinó en 1864 que el valor exacto de esa constante es $c^2/10^7 \text{ N} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{C}^2$, donde c es la velocidad de la luz en el vacío, hoy supuesta exactamente 299.792.458 metros por segundo.

³ La millonésima parte de un metro se llama *micrón*, *micrómetro* o *micra*. La billonésima parte de un coulomb es un *picocoulomb*.

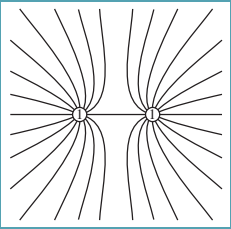
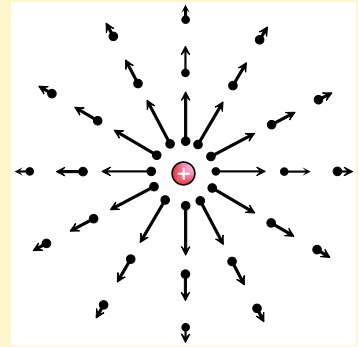
■ Campo eléctrico; representación mediante líneas

Michael Faraday (1791–1867), hijo de herrero, tuvo sólo estudios básicos y trabajó desde niño en una imprenta. Un día fue a una conferencia de Humphry Davy, un físico famoso; tomó notas, las encuadernó en la imprenta y se las obsesó al sabio. Éste, impresionado, lo contrató como ayudante de laboratorio. Ahí inventó el motor y el transformador. Su idea más brillante, que sirvió a Maxwell para entender la electricidad y el magnetismo, fue la de *líneas de fuerza*, hoy llamadas líneas de campo. Mucho después, cuando le preguntaron a Davy cuál había sido su mayor descubrimiento, respondió sin dudar: “*Faraday*”.

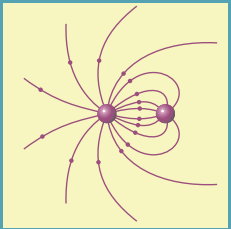
Para trazar las líneas de campo correspondientes a un conjunto de cargas, imaginemos una carga adicional positiva, llamada carga de prueba, y veamos qué fuerzas de atracción y de repulsión recibe en cada posición del espacio. La dirección de la fuerza resultante o conjunta, es la de la línea de campo; y el cociente entre esa fuerza y la carga de prueba es la *intensidad de campo* en ese lugar.

Por ejemplo, las líneas de campo correspondientes a una única carga positiva son líneas rectas radiales. Los puntos negros indican diferentes posiciones de la carga de prueba, que recibe fuerzas de repulsión, más débiles cuando está lejos.

Las líneas de campo de más de una carga se obtienen al considerar todas las fuerzas que actúan sobre la carga de prueba.



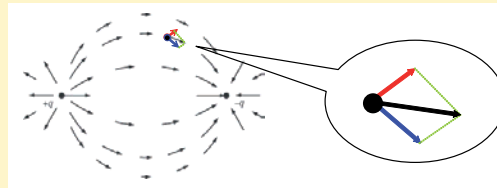
- Líneas de campo de dos cargas del mismo valor y de la misma polaridad.



- Líneas de campo correspondientes a dos cargas desiguales y de polaridades opuestas.



- En ciencias la palabra “*por*” tiene dos significados: uno es el de multiplicar, como cuando decimos que cinco por ocho es igual a cuarenta. Otro significado es el de dividir, como en *metros por cada segundo*, que escribimos *m/s*; o newton por coulomb, *N/C*.



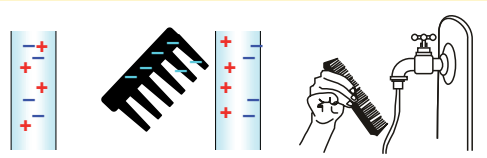
- Líneas de campo de dos cargas del mismo valor y de polaridad opuesta. En rojo, la fuerza de repulsión de la carga positiva. En azul, la atracción de la negativa. En negro, la fuerza resultante. (Derecha, detalle ampliado.)

La intensidad del campo eléctrico se expresa en N/C , newton por cada coulomb, Se verá más adelante que eso es lo mismo que V/m , volt por cada metro. Se designa con la letra E .

■ Polarización

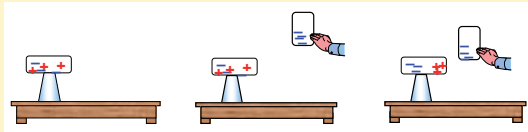
La *polarización* es la separación de las cargas eléctricas en positivas por un lado

y negativas por otro. Por ejemplo, si frotamos un peine, posiblemente, se cargue negativamente. Al acercarlo a un delgado chorro de agua, el peine atrae las cargas positivas y rechaza las negativas. Como las positivas están, ahora, más cerca del peine, la fuerza de atracción es mayor que la de repulsión que actúa sobre las cargas negativas, más alejadas. Predomina, entonces, la atracción, y el chorro se desvía. Éste es un caso de polarización.

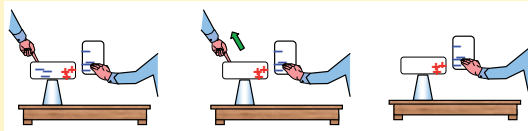


■ Carga por inducción electrostática

Es posible, a partir de un cuerpo cargado negativamente, obtener otro cargado positivamente.



● **Cuerpo neutro.** Se le acerca un cuerpo *inductor*, cargado negativamente. El cuerpo neutro se polariza.



● **Sin retirar el inductor, tocamos el cuerpo polarizado.** Las cargas negativas, rechazadas por el inductor, escapan a tierra.



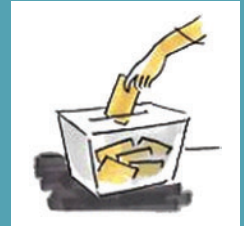
● **El cuerpo que era neutro quedó cargado positivamente.** Eso fue un ejemplo de *carga por inducción*.

■ Distribución de cargas, efecto de puntas

En los cuerpos que conducen bien la electricidad, las cargas de la misma polaridad, al rechazarse, se ubican en los contornos, y especialmente, en las puntas. Eso es útil para proteger los edificios de descargas atmosféricas violentas. Las cargas se acumulan en las puntas del pararrayos y escapan casi silenciosamente al aire; o, si son muchas, lo hacen de modo explosivo, pero sin daños, porque la corriente circula por un cable grueso conectado a tierra.



A veces, en la oscuridad, se ven fulgores en los mástiles de las embarcaciones, y hasta en personas subidas a sitios elevados. Quizás el fulgor con el que se representa a santos y profetas se haya visto alguna vez realmente, como efecto electrostático.



● Cuando las opiniones políticas se dividen en dos categorías opuestas y casi balanceadas, se dice, también, que se polarizan.



● Un buscapolos electrónico de pilas enciende cuando se le acerca un cuerpo cargado negativamente, o cuando se le aleja uno cargado positivamente; sirve así para determinar la polaridad de las cargas.

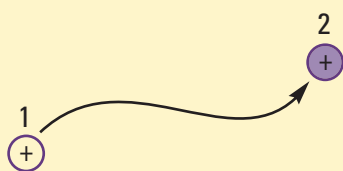


● La santa aureola, gloria de Jehová, o fulgor divino, es parte de la tradición iconográfica.

■ Potencial eléctrico y diferencia de potencial

Para llevar una carga de un sitio a otro no habría que hacer ningún trabajo, si esa carga estuviera muy alejada de otras que pudieran atraerla o rechazarla. Pero si actúan fuerzas de interacción con otras cargas, en general, será necesario realizar trabajo —o recibirlo— para trasladar una carga desde un punto a otro. La *diferencia de potencial* entre esos dos puntos es el cociente entre ese trabajo⁴ y el valor de la carga trasladada.

Por ejemplo, si por la acción de otras cargas (que no hemos dibujado), para trasladar una carga de dos coulomb desde el punto 1 hasta el punto 2 hay que hacer un trabajo de diez joule, entonces la diferencia de potencial, entre esos puntos, es de cinco joule por cada coulomb, ó 5 J/C. La unidad J/C se llama *volt*, y se simboliza con la V mayúscula.



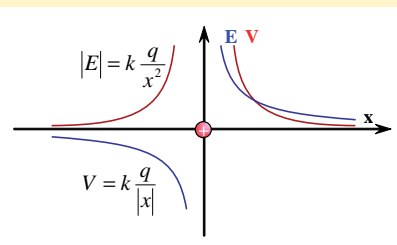
$$V_1 - V_2 = \frac{10J}{2C} \quad V_2 - V_1 = 5 \frac{J}{C} \quad V_2 - V_1 = 5V \quad \Delta V = 5V$$

El símbolo triangular es la letra griega delta mayúscula, y significa diferencia. Otro nombre para la diferencia de potencial es el de *tensión* eléctrica.

Si se elige un punto convencional o arbitrario de potencial nulo, por ejemplo el infinito, o tierra, entonces se puede hablar del *potencial* eléctrico en un punto.

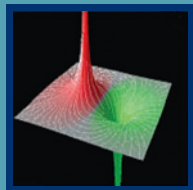
■ Campo y potencial generado por una carga

La línea azul representa la intensidad del campo eléctrico, que disminuye con la distancia. La carga de prueba es empujada hacia la derecha en la parte positiva del eje x , y en el sentido opuesto del otro lado; por eso el campo invierte su signo. La línea roja representa el potencial, proporcional al trabajo necesario para traer una carga de prueba desde el infinito hasta determinada distancia de la carga central. Las barras verticales indican el módulo de la magnitud. La fór-



La línea azul representa la intensidad del campo eléctrico, que disminuye con la distancia. La carga de prueba es empujada hacia la derecha en la parte positiva del eje x , y en el sentido opuesto del otro lado; por eso el campo invierte su signo. La línea roja representa el potencial, proporcional al trabajo necesario para traer una carga de prueba desde el infinito hasta determinada distancia de la carga central. Las barras verticales indican el módulo de la magnitud. La fór-

⁴ Recordemos que el trabajo se expresa en joule. Un joule es el trabajo de una fuerza de un newton que se desplaza un metro hacia adelante.



- Potencial de dos cargas opuestas: en rojo la positiva y en verde la negativa. En blanco, las líneas de campo. Llevar una carga en el campo producido por otras es semejante, en lo que al trabajo respecta, a caminar entre colinas y valles.

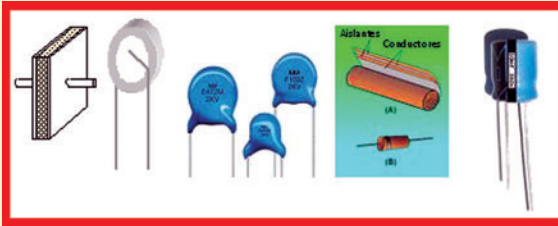


- Los pájaros no se dañan cuando tocan puntos de igual potencial. Por desdicha, a veces unen puntos bajo tensión.

mula de E se obtuvo de dividir por una de las cargas la expresión de la fuerza de la ley de Coulomb. La de V resulta del cálculo integral, que no se explica aquí.

■ Capacitancia y capacitores

Un capacitor, o condensador, es un objeto construido especialmente para almacenar cargas eléctricas. Se usan mucho en los circuitos electrónicos para retardar señales o para separar las de diferente frecuencia. La forma más difundida es el *capacitor plano*, formado por dos placas conductoras paralelas, separadas por un *dieléctrico*, o materia aislante.



Hay capacitores de muchas formas constructivas. La más simple es un disco aislante metalizado en ambas caras, con dos alambres soldados y recubierto de plástico para mejor aislación. Se hacen también de papel y aluminio, o de plástico aluminizado, y se enrollan para que ocupen menos sitio. Los más pequeños (como el de la derecha) se llaman *electrolíticos polarizados*, y sólo sirven para una polaridad; la opuesta los daña.

La *capacitancia* o *capacidad* de un capacitor es el cociente entre la carga y la tensión eléctrica entre sus placas. Se mide en coulomb por cada volt, C/V , y esa unidad es el *farad*, cuyo símbolo es F. Son más usuales los submúltiplos microfarad (μF), nanofarad (nF) y picofarad (pF). La capacitancia de un capacitor plano se obtiene con esta fórmula:

$$C = \epsilon_r \epsilon_0 \frac{A}{d_0}$$

C es la capacitancia, en farad (F). No se debe confundir con la C de coulomb. Épsilon sub-erre es la permitividad relativa del material aislante (por ejemplo, la de algunos materiales cerámicos vale 60; la del plástico, 3; la del vacío, 1, y la del aire, aproximadamente 1; no tiene unidades). Épsilon sub-cero vale $8,854 \times 10^{-12}$ F/m. A es el área de una de las placas, en metros cuadrados; y d es la separación, en metros, entre las placas.

En realidad la constante ϵ_0 se puede obtener de la constante electrostática k , mediante la igualdad $\epsilon_0 = 1/(4 \cdot \pi \cdot k)$, donde π es el famoso número pi, aproximadamente igual a 3,1416. Por eso, en muchos libros, en vez de k ponen $1/(4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0)$.

Ejemplo ¿Qué capacitancia tiene un capacitor de placas de un metro cuadrado



- En España castellanizan los nombres de todas las unidades (neutonio, culombio, hercio), pero en nuestro país la costumbre es hacerlo sólo con algunas, entre ellas el faradio. Aquí es común oír watt y vatio; volt y voltio; pero es raro que digan amperio; muchos prefieren la palabra ampere, pronunciada a la francesa, *ampère*, aguda y sin la e final, aunque con la ere local. Conviene hablar bien, pero también respetar las costumbres.



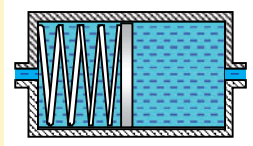
- La capacitancia entre un pie y tierra es de unos 10 pF para el calzado elevado, y de 40 pF para el bajo.

cada una, separadas por una lámina de polietileno de 20 micrones de espesor, como el de una bolsa de residuos? La permitividad relativa de este material vale 2,5.

Respuesta $C = 2,5 \times 8,854 \times 10^{-12} \text{ F/m} \times 1 \text{ m}^2 / 20 \times 10^{-6} \text{ m}$

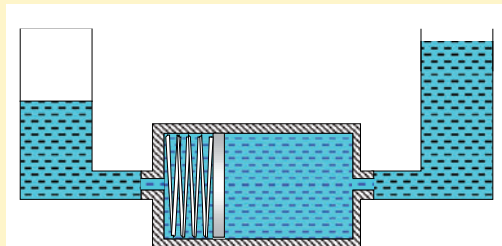
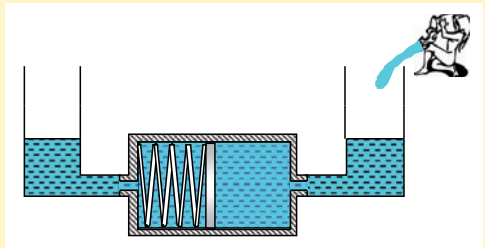
$C = 1,107 \times 10^{-6} \text{ F}$, aproximadamente un microfarad.

■ Modelo mecánico de un capacitor



Un modelo es una comparación con algo conocido, que sirve para entender mejor un fenómeno.⁵ Comparemos un capacitor eléctrico con un cilindro en el que desliza un pistón. La diferencia entre el volumen de líquido almacenado a la derecha del pistón y el volumen de la izquierda, representa la carga eléctrica del capacitor, ahora nula porque el resorte está flojo. La diferencia de presión entre los compartimientos se compara con la diferencia de potencial, o tensión; y el caudal en metros cúbicos por segundo equivale a la corriente en amperes. Un resorte duro en un tanque chico representa un capacitor de poca capacitancia; un resorte blando en un tanque amplio, uno de capacitancia mayor. En la figura, el resorte está en su posición natural, sin deformación de compresión ni de tracción. La carga y la tensión valen cero, y la presión en los dos compartimientos es la misma.

Si en tales condiciones se inyecta agua por la derecha, el líquido circulará, al inicio, como si no hubiera resorte ni pistón, sino un caño directo, puesto que el resorte inicialmente está flojo. Pero a medida que el resorte se comprime, ejercerá una fuerza resistente.



Finalmente, el resorte queda comprimido y en equilibrio con la diferencia de nivel. Eso equivale a un capacitor cargado por el que no circula corriente. Hay tensión, o diferencia de potencial, y hay carga.

⁵ Se critica, a veces con justicia, el uso de modelos en el estudio, porque sólo son comparaciones simbólicas que aunque orienten el conocimiento, no reemplazan la realidad. Pero lo mismo se podría decir de cualquier idea que nos formemos de los hechos, como lo hizo el filósofo Platón hace 24 siglos.

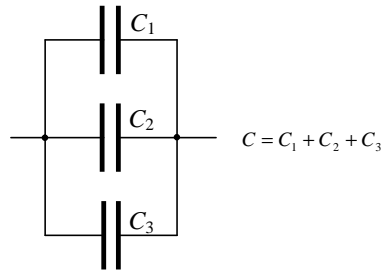


- Grandes capacitores de 20.000 V y 1 μF . En las líneas de distribución de energía eléctrica disminuyen el exceso de corriente demandada por motores. Esa operación se llama corrección del factor de potencia.

■ Asociación de capacitores; elastancia

Si conectamos varios capacitores en la conexión llamada *en paralelo* (izquierda), la capacitancia del conjunto es igual a la suma de las capacitancias parciales. Si, en cambio, están en serie (derecha), la capacitancia conjunta o equivalente está dada por una fórmula más complicada.

Pero, si llamamos *elastancia* a la inversa de la capacitancia, $1/C$, y la designamos con la letra S , el cálculo se simplifica, porque la elastancia de varios capacitores conectados en serie, es igual a la suma de las elastancias individuales: $S = S_1 + S_2 + S_3$.



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

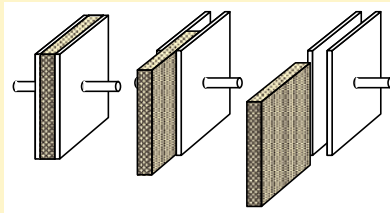
■ Energía almacenada en un capacitor

La energía que acumula un capacitor se puede calcular con cualquiera de las siguientes fórmulas.⁶

$$E_e = \frac{1}{2} CV^2 \qquad E_e = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C} \qquad E_e = \frac{1}{2} QV$$

E_e es la energía electrostática⁷ acumulada, en joule; C es la capacitancia, en farad; Q la carga, en coulomb, y V la tensión, en volt.

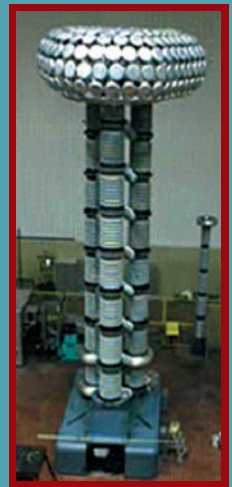
Ejemplo. Un capacitor de un microfarad cuyo dieléctrico tiene una permitividad relativa igual a cuatro, se conecta a una fuente de tensión de mil volt. (a) ¿Cuánto vale la energía electrostática acumulada? (b) ¿Cuánto vale la carga? (c) Y si después, ya desconectado de la fuente, se le retira el dieléctrico y queda sólo el aire ¿cuánto vale la nueva tensión? (d) ¿Y la nueva energía?



Respuestas. (a) $E_C = \frac{1}{2} 10^{-6} \text{ F} \cdot (1.000 \text{ V})^2$, $E_C = 500.000 \text{ J}$. (b) $Q = C \cdot V$; $Q = 10^{-6} \text{ F} \cdot 1.000 \text{ V}$; $Q = 0,001 \text{ C}$. (c) Al retirarle el dieléctrico de permitividad

⁶ Los cursos detallados ofrecen la demostración de todas las fórmulas, y eso contribuye a su empleo comprensivo. En esta reseña se omiten, en favor de otras informaciones. Pero se recomienda consultar demostraciones, y también intentarlas por medios propios.

⁷ Esa energía es una forma de energía potencial, o energía de posición, puesto que depende de la ubicación de las cargas electrostáticas en las placas o armaduras del capacitor.



- Generador de impulsos de tensión de un millón de volt, para comprobar la aislación de instalaciones transmisoras de energía eléctrica. Los 24 capacitores acumulan una energía de diez mil joule. La cabeza redonda evita las puntas y las descargas al aire.

relativa 4, la capacidad disminuye cuatro veces, y ahora es de $0,25 \mu\text{F}$. La carga, como está desconectado de la fuente, se mantiene; entonces la nueva tensión vale $V_2 = Q/V_2$; $V_2 = 0,001 \text{ C} / 0,25 \cdot 10^{-6} \text{ F}$; $V_2 = 4.000 \text{ V}$. (d) $E_{C2} = \frac{1}{2} 10^{-6} \text{ F} \cdot (4.000 \text{ V})^2$; $E_{C2} = 2.000.000 \text{ J}$.

La tensión se cuadruplicó al quitar el dieléctrico, y lo mismo habría ocurrido si se hubieran distanciado suficientemente las placas del capacitor para que su capacidad disminuyese. Justamente, aparecen tensiones altas cuando nos levantamos de una silla aislante, cuando nos quitamos ropa de fibra sintética y cuando separamos un peine del pelo; no cuando nos sentamos o nos vestimos.

El hecho de que el capacitor tenga al final una mayor energía electrostática acumulada, muestra que para retirar el dieléctrico es necesario efectuar un trabajo del mismo monto.

● Propuestas de estudio



- La llamada colita ruttera es útil en los transportes de combustible, porque evita chispas en el momento de la carga. La leyenda de que evita dolores de cabeza carece de fundamento.



- Los pelos del experimentador, conectado a 50.000 V y aislado de tierra, demuestran que las cargas de la misma polaridad se repelen.

1.1. En este capítulo se mencionaron los prefijos *micro*, *nano* y *pico*, que significan millonésimo, milmillonésimo y billonésimo, respectivamente, útiles para referirse a cantidades muy pequeñas. Averigüen los significados de los siguientes prefijos de submúltiplos y múltiplos, que van desde el cuatrillonésimo hasta el cuatrillón: yocto, zepto, atto, femto, pico, nano, micro, mili, centi, deci, deca, hecto, kilo, mega, giga, tera, peta, exa, zetta y yotta. Den también sus símbolos; por ejemplo, el de giga es G. Encuentren también una manera de interpretar los nombres de modo que ayuden a recordar el significado. Por ejemplo, zepto se parece a séptimo, y $3 \times 7 = 21$, por tanto $1 \text{ z} = 10^{-21}$; exa se parece a hexágono, y $3 \times 6 = 18$, por tanto $1 \text{ E} = 10^{18}$.



1.2. Demuestran que un newton por cada coulomb es lo mismo que un volt por cada metro, a partir de que $1 \text{ V} = 1 \text{ J/C}$ y que $1 \text{ J} = 1 \text{ N.m}$.

1.3. Adhieran con cinta un rectángulo de papel de aluminio (sirve el de la envoltura de un alfajor) a la pantalla de un televisor antiguo.⁸ Apaguen el televisor. Después no toquen con la mano directamente el papel, porque recibirán una buena sacudida. Pero acerquen una llave o cuchara, que pueden tener en la

⁸ Se necesita un televisor de tubo de rayos catódicos; no sirve, para esta prueba, uno chato de plasma o de cristal líquido.

mano con confianza, o conectarlas a tierra para mayor tranquilidad. Estimen o midan la longitud de la chispa que saltará entre el papel metálico y ese objeto. A partir del dato de que el aire resiste aproximadamente un campo eléctrico de tres mil volt por milímetro,⁹ estimen qué tensión había entre ambos cuerpos antes de que saltara la chispa y se produjese la descarga. Conviene no poner un papel metálico demasiado grande, porque la chispa sería demasiado enérgica y podría dañar a personas y bienes.

● Otras fuentes de estudio

En Internet hay cursos gratuitos de todos los niveles, desde los apropiados para niños pequeños que aún no saben leer, hasta temas especializados de investigación. Se sugieren como palabras de búsqueda *electrostática, capacitores, recreativa, Perelman*.

⁹ En lugares de gran altitud el aire es menos aislante. Resiste un trece por ciento menos de campo eléctrico, por cada mil metros que se ascienda sobre el nivel del mar.

Aplicaciones de la electrostática



- Frederick Gardner Cottrell (el más alto) experimenta en 1916 con un aparato electrostático para capturar en las chimeneas la niebla y el hollín y evitar que contaminen el ambiente.
- Arriba, el humo sale libremente por la chimenea sin tensión eléctrica.
- Abajo, unos alambres metálicos a 30.000 volt capturan las partículas.

Aplicaciones electrostáticas

- Electrostática en la industria

Las cargas estáticas (inmóviles o, que apenas se mueven) fueron una curiosidad recreativa y filosófica hasta el siglo XVII. Pero la Revolución Industrial les halló aplicaciones útiles, entre ellas la de eliminar el humo de las chimeneas, que en las grandes ciudades ensuciaba tanto el aire que a la gente enfermaba; además de que se ensuciaba la ropa que ponían a secar.¹



- Precipitación de humos y nieblas

El humo es una mezcla heterogénea de gases de combustión y partículas sólidas de carbón, y líquidas de grasa y de agua. Esas partículas son muy pequeñas, tardan mucho en caer y permanecen en suspensión en el aire. La niebla se compone de gotas muy pequeñas de agua líquida, también en suspensión. El esmog (de *smog*, contracción de *smoke* y *fog*, humo y niebla en inglés) es humo y niebla combinados, que aparece en las ciudades industriales, o en el campo cuando hay incendios.



Para atrapar las partículas, se las carga con alambres alimentados con algunas decenas de miles de volt, y se las atrae con placas o rejas cargadas con la polaridad opuesta. Cuando el filtro se llena, se lo sacude para que el hollín y la grasa se desprendan y caigan en una bolsa, y se desechan sin tanto daño para el ambiente

¹ Recordemos que el trabajo se expresa en joule. Un joule es el trabajo de una fuerza de un newton que se desplaza un metro hacia adelante.

- Captura de niebla en una taza de café. A veces se forma una capa de niebla en la superficie, que desaparece cuando se acerca un bolígrafo electrizado por frotamiento.



- Ío, la viajera, convertida en vaca por Zeus para esconderla de los celos de Hera. (Jarrón del año 750 a.C.)

como el que representaría tirarlos a la atmósfera. Una partícula cargada de electricidad se llama *ion*,² y el acto de cargarla, *ionización*. Los iones se mueven en los campos eléctricos.



- Para capturar el humo en una chimenea se cargan las partículas con alambres de una polaridad, y después se las atrae con placas cargadas con la polaridad opuesta.

El filtro electrostático o precipitador de Cottrell, inventado en 1916, no sólo sirve para limpiar los gases de las chimeneas, o el aire que ingresa a un edificio.³ Se utiliza también para condensar nieblas producidas artificialmente con fines industriales.

Por ejemplo, una sustancia de gran aplicación en la fabricación de detergentes y champúes es el ácido sulfónico, que se obtiene a partir de la quema de azufre en un ambiente humedecido con pulverizadores de agua. El ácido aparece en forma de niebla muy fina que tarda mucho en caer. Para acelerar su recolección, se la captura con precipitadores electrostáticos, formados por cientos de alambres verticales conectados a decenas de miles de volt. Las gotitas de niebla ácida se adhieren a los alambres, y gotean sobre un recipiente donde se recoge el producto.



- Algunos filtros de humo para cocinas se basan en la captura electrostática de la niebla de grasa, que se quema a baja temperatura por la acción de rayos ultravioletas.

● Erosión de superficies para adherencia de pinturas

Es difícil pintar rótulos en bolsas de plástico, y que la pintura quede bien adherida y no se salga con la manipulación. Puesto que la adherencia de la pintura a una base es un fenómeno eléctrico, antes de imprimir las leyendas y marcas sobre las superficies plásticas, se las hace pasar por generadores de alta tensión que dejan la superficie, momentáneamente, cargada; entonces, la pintura se adhiere bien. El campo eléctrico es tan intenso que se desprenden algunas partículas microscópicas del plástico y, gracias a eso, la tinta se adhiere más.



- Los frescos de la Capilla Sixtina en el Vaticano, pintados por Miguel Ángel Buonarroti entre 1508 y 1512, debieron limpiarse varias veces del humo de las velas de las ceremonias y del tránsito de automóviles. Ahora hay filtros de aire, algunos de ellos electrostáticos.

² Ion, en griego, significa: *el que va*, y se relaciona con la diosa Ío, que viajó por el mundo para huir de los celos de Hera, esposa de Zeus, padre de los dioses en la mitología griega.

³ El aire verdaderamente acondicionado debe estar libre de microbios y tener una humedad controlada. Para eso, y aunque sea verano, se lo calienta para esterilizarlo, se lo enfría para que se condense la humedad excesiva (que gotea afuera), se lo vuelve a calentar para darle una temperatura agradable, y se lo humecta con agua estéril si es necesario. Pero muchos llaman aire acondicionado simplemente al aire frío en verano, o caliente en invierno, filtrado apenas con una esponja.

● Xerografía

Xerox significa, en griego, a la vez *seco* y *cera*. Para obtener una fotocopia con ese método se carga eléctricamente un cilindro aislante con la ayuda de un alambre que se mantiene cerca de su superficie, y conectado a una tensión de unos diez mil volt.

Una vez cargado el cilindro, se proyecta sobre él una imagen luminosa intensa del original. La luz está compuesta por partículas llamadas *fotones*, que cuando inciden sobre la superficie cargada, le arrancan electrones, o sea que descargan localmente el material previamente cargado.

A continuación se espolvorea el cilindro con polvo negro ceroso, el tóner, el cual se adhiere sólo donde no dio la luz, o sea, en las partes cargadas que corresponden al negro del original.

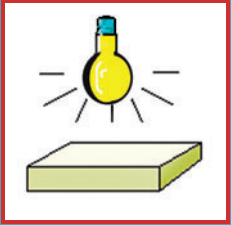
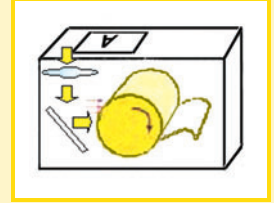
Después, se aprieta un papel contra el cilindro, para transferirle el tóner. Se calienta el papel; la cera se funde, y la imagen queda fija. A veces, cuando el papel se atasca y lo retiran antes de este último proceso de fusión, la copia se borra con los dedos.

La xerografía es una muy útil aplicación de la electrostática, que influyó mucho en el flujo de la información impresa, quizá tanto como la popularización de la imprenta en el siglo XV.⁴

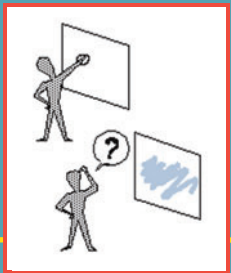
Originalmente los cilindros xerográficos eran de selenio, cuyo óxido superficial es aislante de la electricidad. Hoy se usan diversos plásticos más efectivos y baratos.

Las impresoras láser son fotocopadoras en las que la imagen luminosa, en vez de provenir de un original fuertemente iluminado, se graba directamente con un rayo láser en la superficie de un cilindro previamente cargado eléctricamente.

Una ventaja de las impresoras láser, en comparación con las de tinta líquida, es que las impresiones resisten las salpicaduras de agua sin que se corra la tinta.



- La humedad de Buenos Aires, junto a uno de los ríos más grandes del mundo, impide que las cargas eléctricas se mantengan en su sitio. Por eso, en muchos centros de copiado almacenan el papel en vitrinas con una lámpara encendida, para mantenerlo más caliente que el ambiente y evitar la condensación de agua, que humedece el cilindro y lo descarga.



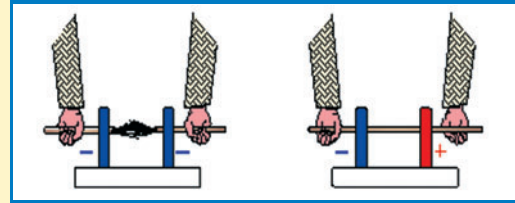
- Es difícil mantener limpia una ventana de plástico de interiores, porque al pasarle un trapo se carga eléctricamente y captura el polvo. En cambio a la intemperie la luz del día la descarga.

● Empalme de hilos

En las hilanderías se evitan los nudos en los hilos, porque dificultarían el trabajo del telar, aparecerían en el tejido y disminuirían su calidad. Para empalmar dos

⁴ En 1950 tardaban media hora en hacer una fotocopia de las llamadas *en el acto*, y la entregaban húmeda. Por ser lentas y caras, no se usaban en las escuelas; los alumnos calcaban los mapas, o los maestros reproducían originales trazados con lápices de tinta, cuyo pigmento se impregnaba en una gelatina húmeda que se usaba después como un sello para imprimir hasta cincuenta copias. Ese rudimentario aparato se llamaba *gelatógrafo*, y lo construía el propio docente en una lata rectangular de dulce de batata, o lo compraba en librerías. En comparación con los estudiantes de hace medio siglo, los actuales tienen posibilidades de estudio mil veces mayores.

hilos les aplican tensión, entonces sus fibras se separan por la repulsión de las cargas de la misma polaridad. En esas condiciones aproximan los extremos, y las fibras se entrecruzan. Cuando les dan a los hilos polaridades opuestas, las fibras se unen y el hilo queda entero, sin nudo, como si nunca hubiera sido cortado.⁵



● Transferencia de hojas de papel en impresoras

Las impresoras más comunes, de uso hogareño y de oficina, hacen correr las hojas de papel con piezas móviles de goma. Pero, a veces, pasan varias hojas a la vez, o ninguna, porque la adherencia entre las hojas es mayor que con la goma gastada o sucia, y el papel se atasca. En impresoras industriales las hojas se toman con ventosas y no por arrastre; pero hace falta una pequeña bomba de vacío. Una solución más silenciosa, compacta y hoy muy barata, es atraer las hojas electrostáticamente, con un pequeño generador de unos miles de volt.



- Si se apoya una hoja de papel o una radiografía contra la pantalla de un monitor de rayos catódicos, se adhiere, atraída por las cargas eléctricas de la pantalla.



- Generador de ozono para baños. El límite higiénico es de 0,1 ppm (partes por millón), o sea, como máximo, una molécula de O_3 cada diez millones de las otras moléculas de O_2 y N_2 del aire. Elimina microbios, y da un olor particular al aire, como el que se percibe después de una tormenta eléctrica, y que muchos llaman olor a tierra mojada.

● Ozonizadores

El ozono, u O_3 , es un gas cuyas moléculas están formadas por tres átomos de oxígeno cada una. Normalmente, ese gas sólo existe en la alta atmósfera, adonde llega la radiación ultravioleta del Sol. Esos rayos desarmen las moléculas de O_2 y se forma O_1 , O_2 y O_3 .⁶

Para desinfectar y desodorizar baños públicos se instalan ozonizadores, que son aparatos que producen ozono en una concentración tolerable durante media hora, o una. Para generar ese gas hay que desarmar las moléculas del oxígeno diatómico ordinario del aire; eso se consigue con un generador de unos seis mil volt.⁷

● Pantallas de cristal líquido

Una pantalla de cristal líquido, en inglés *liquid crystal display*, o LCD, está formada por dos vidrios paralelos entre los que se aloja una capa de gel compuesto

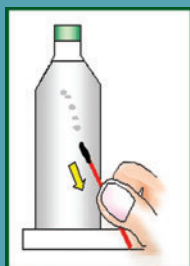
⁵ Actualmente se usan más los empalmes de aire comprimido.

⁶ El ozono en la alta atmósfera es útil para filtrar la radiación ultravioleta del Sol. Se cree que ciertos gases industriales, los fluorocarbonos que se usan en refrigeración y en envases de aerosol, destruyen esa capa protectora. Inversamente, la quema de combustibles genera ozono, cuyo exceso al nivel del suelo es tóxico para animales y plantas.

⁷ También se obtiene un efecto similar, aunque menos efectivo, con una lámpara de rayos ultravioleta protegida para que no dañe la vista. Este aparato, más pequeño, barato y de menor consumo que las antiguas autoclaves de vapor, se usa para esterilizar tijeras y navajas en las peluquerías.



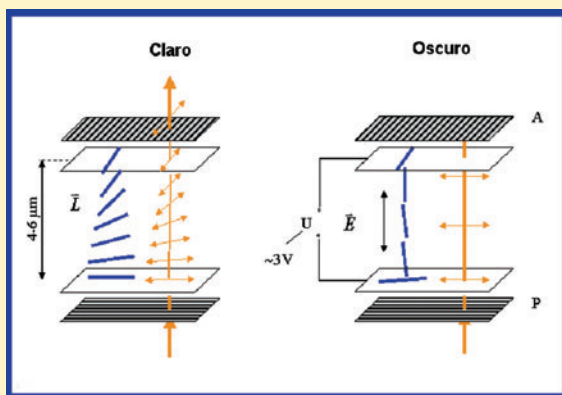
- Pantalla de un reloj en desuso, excitada directamente con una pila o batería.



- Una botella de plástico con pintura de aluminio diluida registra la tensión alterna de 220 V de un cable aislado. El campo eléctrico orienta las escamas metálicas.

por partículas alargadas que se orientan en un campo eléctrico. Los vidrios tienen contactos de oro, tan delgados que son transparentes; y sólo se ven bajo ciertos ángulos. Esas pantallas se popularizaron en 1970. Como su funcionamiento es electrostático, no hay corrientes eléctricas permanentes (más que las de carga y descarga), entonces consumen muy poca energía, y se las puede usar en aparatos de pila.

Cuando se aplica tensión a los electrodos, las partículas se orientan y producen el efecto de Schadt–Helfrich en la luz, que consiste en un giro del plano en el que vibran las ondas luminosas, llamado plano de polarización. Si se observa el gel entre dos filtros polaroides, que dejan pasar sólo la luz que está polarizada en determinado ángulo, entonces cuando las partículas se orientan aparece el trazo del número o signo, y cuando se interrumpe la tensión y las partículas del gel se desorientan (se orientan cada una al azar), el trazo desaparece.



- Efecto Schadt-Helfrich

Se puede improvisar un LCD con medios rudimentarios. En una botella de plástico transparente se pone diluyente de pintura y una pequeña cantidad de pintura de aluminio. Cuando se frota la botella con un paño, el plástico se carga y las partículas de aluminio se orientan; eso se nota como un cambio en el brillo de la pintura dentro de la botella.

● Tubos de rayos catódicos

En electricidad, el ánodo es el polo positivo, y el cátodo, el negativo (de *ana*, hacia arriba, y *cata*, hacia abajo, en latín). El nombre genérico para referirse tanto al cátodo como al ánodo es *electrodo*. El científico británico William Crookes⁸



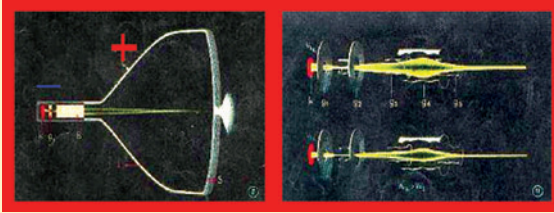
- Los LCD son tan sensibles, que se los puede excitar con la electricidad estática generada al frotar los pies contra el piso.



- Réplicas de tubos de Crookes. Se conecta el polo positivo al lateral, y el negativo al extremo. En el frente, pintado con pintura fluorescente, aparece un fulgor. La pequeña cruz de Malta rebatible hace sombra.

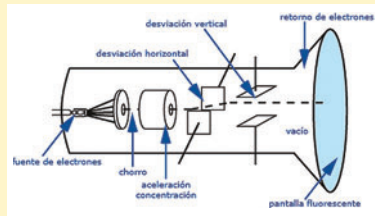
⁸ En sus últimos años Crookes se hizo espiritista, y por eso perdió prestigio en círculos científicos. Pero en su juventud y madurez fue un investigador brillante, autor de numerosos descubrimientos, por los que obtuvo el título de Sir.

(1832–1919) estudió las corrientes eléctricas que atraviesan el aire encerrado en un tubo a diferentes presiones, y cuando hizo el vacío notó que algo salía en línea recta del polo negativo hacia el positivo, que hacía brillar materiales fluorescentes. Llamó a ese efecto *rayos catódicos*. Hoy sabemos que son electrones que salen del cátodo y viajan hacia el ánodo a través del espacio vacío.



- **Tubo de rayos catódicos de TV o PC. Un filamento caliente emite electrones, y los atrae la envoltura lateral pintada con grafito conductor. Para que el haz no se disperse, se lo hace pasar por un tubo de potencial positivo, el anillo de enfoque.**

Donde incide el haz de electrones, la pantalla brilla. Unas bobinas alrededor del cuello del tubo, llamadas el yugo, generan campos magnéticos variables que desvían el haz para que trace la imagen. Lo mismo se puede hacer con placas laterales, dos verticales y dos horizontales, sometidas a tensiones alternas.



- **Placas de deflexión horizontal y vertical en el tubo de rayos catódicos de un osciloscopio.**

● Tubos fluorescentes, de neón y pantallas de plasma

Los campos eléctricos, si son bastante intensos, pueden ionizar los átomos, o sea, arrancarles electrones y convertirlos en iones positivos (partículas cargadas positivamente) mientras que los electrones arrancados de los átomos son iones negativos. Esos iones se mueven cada uno hacia el polo de la polaridad opuesta, y en el camino chocan con átomos y les hacen aumentar su energía; los *excitan*. Cuando los átomos excitados vuelven a su estado normal, emiten la energía sobrante, a veces en forma de luz visible. Ése es el principio en el que se basan los tubos fluorescentes, las lámparas de neón y las pantallas de plasma. Se llama plasma a un gas que tiene ionizada casi la totalidad de sus átomos. Hay plasma dentro de un tubo fluorescente encendido, en una llama, en la superficie del Sol, en una chispa eléctrica, química o mecánica, y en las pantallas de plasma que usan muchos aparatos, y que funcionan como una gran cantidad de tubos fluorescentes diminutos.

Para construir una pantalla de plasma se hace el vacío entre dos vidrios paralelos



- Junto con las copias xerográficas, el tubo de TV ha sido quizás una de las aplicaciones más útiles de la electrostática en la comunicación de información.

- Cuando los electrones chocan contra el pigmento de una pantalla, sufren una frenada brusca, y eso hace que emitan rayos X. Su dosis es limitada y no daña la salud. Sin embargo, se recomienda a las embarazadas que no pasen muchas horas frente a un monitor de computadora o televisor muy cercano. El efecto se conoce como *Bremsstrahlung*, en alemán, radiación de frenado, y se descubrió en 1896.

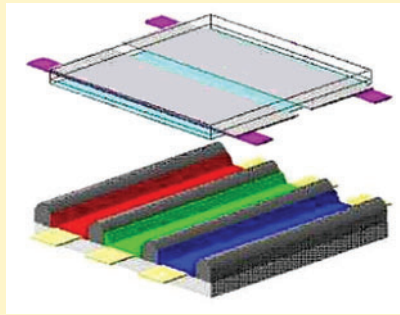


- Los cuatro elementos según la antigua alquimia, tierra, agua, aire y fuego, se podrían identificar con los cuatro estados de agregación de la materia: sólido, líquido, gas y plasma.



- **Aurora polar.** Las partículas cargadas que emite el Sol se desvían en el campo magnético terrestre, excepto en los polos, donde ese campo es vertical y no impide que las partículas solares bajen y exciten los átomos de los gases del aire. Cuando los átomos vuelven a su estado normal, emiten luz.

cercanos, se llena ese espacio con gases a baja presión, y unos electrodos muy pequeños, uno por cada punto de la imagen, o símbolo, hacen que cuando se los conecta a una fuente de tensión eléctrica, ionicen el gas y atraigan los iones, que cuando chocan contra átomos, sin ionizar, los excitan; y estos átomos devuelven esa energía en forma de radiación ultravioleta, que incide contra una pintura fluorescente y hace que fulgure.



- **Rojo, verde y azul: pigmento fluorescente.** Negro: separadores aislantes. Amarillo: electrodos verticales; magenta, horizontales. El espectador ve desde arriba un punto luminoso donde se cruzan dos electrodos, en el instante en que estén bajo tensión.

Las pantallas de plasma, o PDP (*plasma display panel*) son muy delgadas en comparación con los tubos de rayos catódicos, y consumen menos energía eléctrica que ellos.⁹

● Memorias electrostáticas



- Una curiosa derivación del microscopio de efecto túnel fue el descubrimiento de que, además de electrones, se pueden arrancar átomos, y cambiarlos de sitio. La figura muestra la sigla IBM (International Bureau Machines, Máquinas de Oficina Internacional), compuesta con átomos de xenón depositados sobre una superficie de níquel. El efecto es útil para construir memorias muy pequeñas para computadoras.

Las primeras computadoras de principios del siglo XX usaban válvulas de vacío, una especie de lámparas de filamento con electrodos adicionales, capaces de amplificar una corriente eléctrica y cumplir funciones lógicas como la de almacenar la información. En 1950, para la misma aplicación, se empezaron a usar transistores, mucho más pequeños y de menor consumo. En 1971 Dov Frohman inventó la EPROM, *Erasable Programmable Read-Only Memory* (memoria de lectura exclusiva programable y posible de borrar), conocidos como chips de memoria fija para las computadoras. Se los puede grabar mediante el procedimiento de aplicarles en un cierto orden tensión a sus patas; con eso quedan cargas eléctricas almacenadas permanentemente en millones de cristales internos. La presencia o ausencia de esas cargas se puede detectar desde las patas del chip, y en eso consiste su memoria.

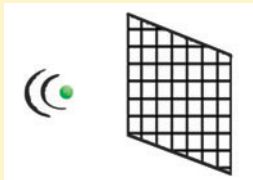
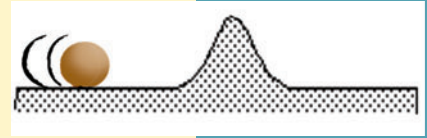
El invento de Frohman, que recuerda el principio de funcionamiento de las

⁹ En una época se consideraba, como índice de desarrollo de una comunidad, la cantidad de energía eléctrica que consumía cada habitante por año. Hoy ese mismo indicador tiene un significado a veces opuesto, porque una sociedad realmente avanzada aprovecha la energía, de la que consume escasa cantidad.

copias xerográficas, consistió en eliminar las cargas, cuando hace falta, con la exposición del chip a una fuente intensa de luz o de radiación ultravioleta, entonces la EPROM se puede programar o escribir otra vez.

● Microscopio de efecto túnel

Imaginemos una bolita que se desplaza libremente hacia una loma. Si su velocidad es suficiente, la superará; y si es menor, volverá de regreso. Lo mismo pasa con un electrón disparado contra una reja negativa. Si el electrón tiene velocidad suficiente, la atravesará, y en el caso opuesto rebotará, rechazado por la reja de la misma polaridad. Sin embargo, a principios del siglo XX se notó que, unos pocos electrones de energía, que parecía insuficiente, atravesaban esa barrera.



En broma, y pensando en la bolita y la loma, alguien preguntó: *¿Es que pasan, acaso, por un túnel?* Y así quedó ese nombre para designar un efecto que parece extraño, pero que la física cuántica explica a partir de las propiedades ondulatorias de toda la materia, y que se nota más en las partículas pequeñas.

El microscopio de efecto túnel explora una superficie con una aguja muy delgada, conectada a un potencial eléctrico que sólo arranque del material electrones por efecto túnel. Un circuito detecta cada vez que ocurre ese fenómeno, entonces se sabe que la aguja estaba pasando cerca de un átomo y le quitó un electrón. Con ese aparato se ven –indirectamente– átomos individuales.



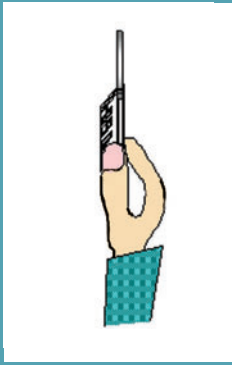
- Según fabricantes, vendedores y algunos usuarios, los filtros de pantallas hacen más cómodo el trabajo con monitores de rayos catódicos, y protegen la salud. Lo cierto es que la conexión a tierra del vidrio conductor evita las chispas.

PROPUESTAS DE ESTUDIO

2.1. Con la ayuda de fuentes de información ajenas a este capítulo (libros, Internet, consultas a gente que sepa) determinen si es correcta la designación “*relojes de cuarzo líquido*” que usan algunas personas para referirse a los relojes de pantalla de cristal líquido, o LCD. Las pantallas de cristal líquido ¿contienen cuarzo? El cuarzo ¿es líquido a la temperatura ambiente? ¿En qué interviene el cuarzo en esos relojes, y otros de agujas móviles?

2.2. Hace veinte años los teléfonos públicos callejeros que contaban con iluminación de 220 V, tenían un cartel que decían PELIGRO, ALTA TENSIÓN. Hoy en cambio dicen PELIGRO, HAY TENSIÓN, puesto que la frase *alta tensión* tiene un significado específico en el ambiente industrial. Averigüen a qué tensiones se las llama muy baja, baja, media, alta y muy alta tensión.





- Si se adhiere una mina de lápiz o un alambre a los contactos de una pantalla de cristal líquido, sirve como detectora de campos eléctricos; indica si hay o no tensión alterna en un cable, sin necesidad de pelarlo.

2.3. Estudien una aplicación industrial del tema de este capítulo, que no se haya tratado en él, por ejemplo, los altoparlantes electrostáticos, o ESL (*electrostatic loudspeakers*), el Gran colisionador de hadrones, el microscopio de ion de campo, los músculos artificiales, los relés o relevadores electrostáticos y la separación de granos de cereales y de moliendas.

2.4. Algunas personas se alarman por las chispas que saltan a veces entre la mano y la pantalla de un monitor de computadora, y en la creencia de que puedan dañar la salud interponen pantallas de vidrio conductor y algo oscuro que evitan ese efecto, y, supuestamente, interceptan radiaciones dañinas, como podrían serlo los rayos X. Investiguen el tema. Si esos filtros son útiles ¿por qué no los incorporan de fábrica? ¿Hay en el mercado propuestas similares –justificadas o no– para pantallas de plasma y de cristal líquido?

2.5. ¿Por qué las pantallas de los monitores de tubo de rayos catódicos se ensucian tan rápidamente, y más que los vidrios de las ventanas?

2.6. Construyan un detector electrostático como el de la figura ubicada en el margen izquierdo, y comprueben con él si los filtros de pantalla eliminan el campo eléctrico en las cercanías. (Conviene acercar y alejar el detector, para que indique.)

● Otras fuentes de estudio

A pesar de que sus datos carecen de respaldo académico, hay sitios en la web que constituyen fuentes útiles de información, y buenas orientaciones de búsqueda. Sin embargo, se propone una fuente de mayor seriedad académica es *Interacciones a Distancia*, de A. Maiztegui, R. Ádám, S. Queiro, A. Rela y J. Strajman, Prociencia, Conicet, 1994, en la Biblioteca del Maestro y en <http://www.inet.edu.ar>, Capacitación, Materiales, Ciencias para la educación tecnológica.

Inconvenientes de las cargas estáticas



- El hidrógeno del dirigible Hindenburg se incendia cuando la nave aterriza en Nueva Jersey, Estados Unidos, el 6 de mayo de 1937. Murieron 35 de sus 97 ocupantes, más una persona en tierra. El desastre lo habrían causado una fuga de gas y una chispa eléctrica, pese a que la tripulación realizó las maniobras de descarga correctas antes de echar amarras. Se especula también en un posible atentado contra ese símbolo del poderío tecnológico de la Alemania nazi, dos años antes de que estallara la Segunda Guerra Mundial.

Inconvenientes de las cargas estáticas

- Sacudidas al tocar un coche o un mueble



- La gran área de contacto del choque de palmas disminuye los microamperes por centímetro cuadrado de una descarga, y la consiguiente molestia. ¿Será ése el origen del difundido saludo?



- El reparador conecta su muñeca a tierra para evitar chispas que puedan dañar los circuitos electrónicos. El cordón es poco conductor, para limitar la corriente si tomara contacto accidental con la fuente.



Todos experimentamos alguna vez una sacudida molesta al tocar algo después de bajar de un coche, levantarnos de una silla de plástico o caminar unos metros sobre una alfombra de plástico, o muy seca. Cuando se separan dos cuerpos en contacto, muchos electrones exteriores de los átomos de un cuerpo pasan a los del otro, y así los dos cuerpos quedan cargados con polaridades opuestas.

Este efecto ocurre especialmente en lugares y días secos; es muy molesto, y la sorpresa puede causar movimientos bruscos, la caída de objetos que se tenían en las manos, y hasta incendios en depósitos de inflamables y estaciones de servicio, con daños personales y materiales.

Para evitar ese efecto hay varias soluciones. Una es aplicar un líquido antiestático a las alfombras y tapizados, por ejemplo glicerina. Esta sustancia es muy higroscópica, absorbe la humedad del ambiente y hace que la tela conduzca un poco la electricidad; con eso la persona se descarga a tierra a la vez que se levanta del asiento.¹

Hay alfombras que ya son conductoras, por sí mismas sin el agregado de productos, porque en su hilado se incorporan fibras de carbono, que además de darles robustez, las vuelven conductoras de la electricidad.

Un truco para evitar la carga es el de tomarnos de un cuerpo metálico grande durante todo el tiempo que tardamos en levantarnos de un asiento aislante.

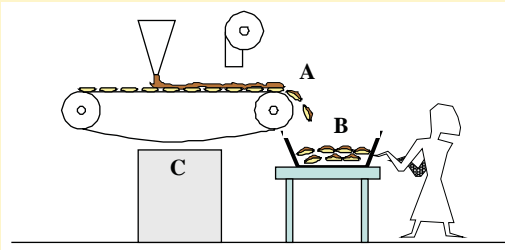
Por ejemplo, si salimos de un coche, nos podemos tomar a la vez de la manija de la puerta; si nos levantamos de una silla, hagámoslo con una mano apoyada en un mueble conductor, o en una pata metálica de la misma silla. De esa manera derivamos a tierra las cargas en el mismo instante en el que se producen, sin dejar que se acumulen.

¹ Las mujeres suelen sufrir más que los varones esa clase de descargas de electricidad estática acumulada, posiblemente por una mayor sensibilidad neurológica, una piel más delgada, o una mayor área de contacto con el asiento.

Quizá por el clima húmedo de muchas regiones de la Argentina, aquí no tenemos muy desarrollados los medios de protección contra las incomodidades de la acumulación de cargas estáticas. En cambio, en hoteles de otros países se ven a veces cuadros semiconductores con un símbolo eléctrico junto a las puertas de las habitaciones, para que los pasajeros los toquen antes de accionar las manijas. La pintura semiconductora del cuadro facilita una descarga lenta, silenciosa e indolora.

Las hilanderías e industrias con cintas transportadoras aislantes registraban frecuentes casos de molestias y percances ocasionados por la generación de cargas eléctricas, y hoy toman precauciones.

Un ejemplo, en la figura: las galletitas avanzan sobre una cinta de teflón,² a la



● **Acumulación indeseada de cargas**

otra máquina. La carga opuesta que adquiere la cinta va pasando a tierra a través de la pequeña distancia que la separa del armario metálico **C**. El problema se resolvió, al inicio, con el cambio del recipiente metálico **B** por uno de plástico, y después con el reemplazo de la mesa aislante por otra conductora.³

● **Descargas atmosféricas, pararrayos, descargadores**

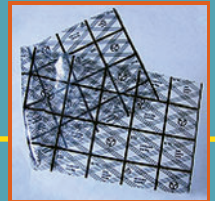
Desde muy antiguo, y aún hoy, el rayo es la descarga electrostática más dañina para las personas y bienes materiales. Cuando su ocurrencia era imprevisible se le atribuía carácter divino. Tanto en las representaciones del dios romano Júpiter, como en las de su equivalente griego Zeus (de cuyo nombre derivan Deus y Dios) empuñan rayos que representan el merecido castigo del Cielo. Hace un par de siglos la colocación de pararrayos despertaba reservas religiosas en algunas personas muy conservadoras, que ridiculizaron a su inventor, Benjamín Franklin

² El teflón es una marca registrada de Dupont para el *politetrafluoretileno*. Ese plástico es aislante, impermeable, inerte y se puede usar entre -270 y 300 °C.

³ Un supervisor aprendió que si ponía más tensa la cinta (con eso aumentaba su distancia al armario) desaparecían las quejas del personal. Pero como ignoraba los detalles electrostáticos, decía: “*Cuando pongo más tirante la cinta, aquella máquinas dejan de dar corriente.*”, y señalaba instalaciones alejadas, contra las que se descargaban los operarios en sus tareas, y que estaban provistas de robustas puestas a tierra, resultado de los reiterados reclamos.

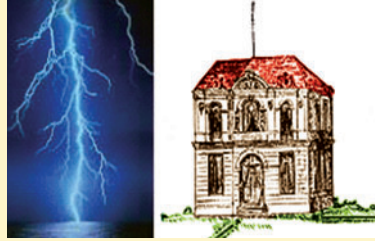


- Los productos antiestáticos evitan que la ropa se adhiera al cuerpo, y hacen que cuelgue con la elegancia de una antigua túnica de lino.



- Bolsa antiestática para guardar plaquetas de computadoras y otros circuitos sensibles a las descargas estáticas. Las líneas de pintura conductora impresas hacen que todos los puntos del contenido se encuentren al mismo potencial eléctrico, sin tensión o diferencias de potencial (es el principio de la llamada jaula de Faraday).

(1706–1790). La Iglesia, sin embargo, jamás objetó la invención, como algunos creen.⁴



- Izquierda, un rayo en el mar. Derecha, casa alta de madera protegida con un pararrayos.

El pararrayos más sencillo es la *punta de Franklin*, una simple barra metálica conectada a tierra con un cable grueso, y puesta encima de un edificio. Cuando se produce la ruidosa descarga, la corriente pasa directamente a tierra por un camino directo, sin que se genere una gran cantidad de calor. En cambio si la descarga ocurre a través de los materiales del edificio, que no son muy conductores, se genera mucho calor. Por ejemplo el agua del tronco de un árbol hierve, y el vapor lo hace estallar.⁵

Durante los siglos XIX y XX se perfeccionó la punta de Franklin, al descubrirse que se podía usar no sólo para disminuir los efectos destructivos de un rayo, sino incluso para evitar su ocurrencia.

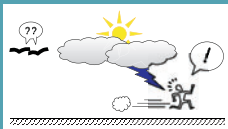
Las puntas de los pararrayos, donde se acumulan las cargas y el campo eléctrico es más intenso, facilitan descargas suaves y casi silenciosas, que evitan muchas veces el rayo. En 1925 se empezó a colocarles materiales radiactivos (americio 241, o radio 226) para mejorar la ionización del aire cercano. Pero en 1985 se juzgó que esa ventaja no compensa el riesgo de daño radiológico.

Si bien el pararrayos, en sí, está muy alejado de la gente, y a medio metro de distancia su radiación es insignificante, las personas que comercialicen materiales de demolición se podrían contaminar si manipularan el material sin conocerlo; por eso hoy se desalienta el empleo de pararrayos radiactivos.

Hay pararrayos más complejos, cuyo diseño procura siempre ionizar el aire cercano para facilitar la descarga suave si es posible, o al menos, si fuera violenta, aumentar la probabilidad de que ocurra en ese sitio, y no en edificios cercanos sin protección. Algunos tienen gene-



- En un rayo, el camino de la corriente puede ser ascendente, descendente u oscilante. Sin embargo se dice que caen, porque se los suponía enviados por los dioses de las alturas. En el antiguo vaso griego, Zeus empuña el rayo con el que castiga a los mortales.



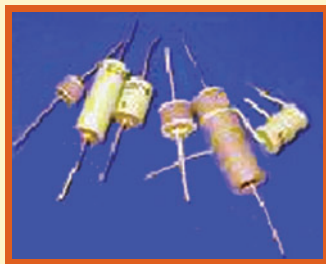
- *Fulminar* es matar o quemar el rayo. Fulminante es el detonador o explosivo sensible a los golpes o a las chispas, cuyo estallido hace que explote el explosivo principal. *Fulminita* es un mineral formado por la fusión de la roca por un rayo. En el lenguaje figurado, fulminante significa súbito.

⁴ Franklin, en realidad, no sufrió censura de los conservadores sólo por su pararrayos que eludía supuestos castigos de Dios; sino principalmente por ser contrario a la esclavitud y por contribuir a la independencia de la colonia inglesa de la que surgieron los Estados Unidos de América.

⁵ Es correcta la expresión "¡Y a mí, que me parta un rayo!", porque los rayos parten verdaderamente los troncos a lo largo, en la dirección de la veta de la madera. Partir es dividir a lo largo; cortar, a lo ancho. (El dicho se usa para quejarse del desprecio inmerecido.)

radores de alta tensión como los chisperos que encienden las cocinas, pero cuando hay tormentas a veces se corta el suministro eléctrico, y esos pararrayos no funcionan justo cuando más se los necesita. Otros aprovechan como energía eléctrica la de la propia descarga en ciernes, y se llaman pararrayos de cebado.

Aun bajo la protección de un pararrayos, cada vez que se produce una descarga atmosférica hay inconvenientes. Además del estampido, que a veces rompe vidrios, aparecen diferencias de potencial entre las partes del edificio que pueden alcanzar valores importantes: a veces se sienten en el cuerpo, o dañan equipos electrónicos. Los aparatos más expuestos son los teléfonos y los módems conectados a las líneas telefónicas. Para reducir esos efectos se colocan en los aparatos electrónicos sensibles unos dispositivos de protección, los *descargadores*, o supresores de picos de tensión. Generalmente se ponen dos, uno entre los cables de alimentación, y otro entre uno de ellos y masa, o sea la carcasa metálica del aparato, si la tuviera. Cuando por efecto de una descarga atmosférica la tensión crece muy por encima de los 220 volt normales, el descargador que, normalmente es aislante, se torna conductor súbitamente, y con eso protege el equipo, aunque a veces haga que se fundan sus fusibles y se los deba reemplazar; eso suele ser más barato que un aparato nuevo.



- Descargadores para aparatos de 220 V. En los de tres patas se conecta el centro a masa, y los extremos a la línea de alimentación.

Un descargador puede consistir solamente en dos piezas metálicas separadas por una muy pequeña distancia en aire, o una algo mayor en gas a baja presión. Un arrancador de tubo fluorescente, o una lámpara de neón, sirven en algunos casos como descargadores improvisados para proteger aparatos electrónicos contra tensiones excesivas, por ejemplo cuando la alimentación es de 110 V, y el arrancador o la lámpara son de 220 V.

● Protección de materias inflamables contra descargas de electricidad estática acumulada

La gran cantidad de automotores en circulación hace que existan todavía incendios accidentales originados en chispas eléctricas, a pesar de las precauciones avanzadas que imponen las leyes y reglamentos. Un accidente muy común ocurre



- En las líneas aéreas que transportan energía eléctrica, el cable más alto es el de tierra, que protege los otros de las descargas atmosféricas.



- Descargador para línea aérea de energía eléctrica. En inglés los llaman *surge arresters*, y en portugués, *pararrayos*.



- Supresores de sobretensión sólidos, llamados *varistores* (de *variable*) y *capacitor*. Son usuales y baratos.

en estaciones de autoservicio, cuando el conductor está llenando el tanque del coche y baja el acompañante para relevarlo en la tarea. Cuando toca el pico de carga o la boca del tanque, salta a veces una chispa que enciende la mezcla de aire y vapores de nafta. Si el pico funciona bien, cortará enseguida el chorro cuando lo suelten; y si el tanque está en buenas condiciones soportará la explosión y sólo dará un soplido; pero esa salida brusca de gas puede dispersar líquido encendido, y causar quemaduras importantes.

Los camiones que transportan combustible están especialmente protegidos; antes con una cadena de descarga a tierra que colgaba del paragolpes trasero y se arrastraba por el suelo pero, ahora, con neumáticos de goma conductora que impiden que el camión se cargue.



- El uso inexperto de extintores o matafuegos de gas CO₂ a veces agrava un incendio, al dispersar el líquido inflamado sin apagarlo. Un efecto menos conocido es que si la persona usa calzado aislante, con la salida del gas adquiere cargas estáticas, que producen chispas y sacudidas cuando después se toca algo que esté a tierra.



- Copia positiva de una descarga estática registrada directamente en un negativo fotográfico.

● Descargas de electricidad estática en fotografía

Las chispas de las descargas de electricidad estática pueden velar negativos y positivos fotográficos. Actualmente ese percance es poco frecuente, porque las cámaras digitales y las máquinas automáticas de revelado hicieron del laboratorio artesanal una rareza. Sin embargo, algunos, aún lo utilizan por libertad artística, o por gusto. Para evitar el velado por chispas, conviene usar calzado conductor, o pintar el aislante con agua y glicerina. Las casas de artículos fotográficos venden paños, pinzas, guantes y cepillos antiestáticos, o sea hechos de material no totalmente aislante.



Algunos experimentadores producen a propósito esos efectos, con fines artísticos, y los llaman *electrografías*. Una variante que dio lugar a muchos comentarios es la fotografía inventada por el electricista ruso *Semyon Davidovitch Kirlian* a principios del siglo XX, primero con electricidad estática y tensión continua y, después, con tensiones alternas de gran frecuencia, del orden de los cien megahertz.⁶ Todavía hay quienes aseguran que el efecto Kirlian revelaría el alma de los seres vivos, a la que llaman *aura*. Por ejemplo, quitan un pedazo a una hoja de planta y ven que la imagen Kirlian completa el contorno, y cuando la hoja muere, se ve el verdadero contorno. Pero en rigor ese efecto se debe sólo a la humedad

de la hoja, y se puede reproducir con un papel común húmedo y seco.

⁶ Por un efecto conocido como *pelicular* (*skin effect*), cuando la frecuencia es muy alta, la corriente circula por la superficie del cuerpo y no por la masa muscular; entonces no causa molestia.

● Trabajos con líneas vivas

Para poder usar cables no demasiado gruesos, y por eso caros y pesados, desde los lugares de generación hasta los de consumo la energía eléctrica se transmite con tensiones muy altas, por ejemplo 500.000 volt.⁷ Por esas líneas circulan corrientes de hasta 2.500 ampere, y la potencia que transmiten es, en algunos casos, de dos gigavolt, o lo que es equivalente, de unos dos mil millones de kilovolt hora en cada hora transcurrida. El kilovolt hora se vende a unos quince centavos. Entonces, sólo una hora de parada para



mantenimiento costaría ¡trescientos millones de pesos!, ocho pesos por habitante.

El viento hamaca esos cables, y los deshila; por eso hay que examinarlos regularmente para cambiar los tramos dañados. Pero el costo de una parada es enorme, entonces, esos trabajos hay que hacerlos en vivo, con los operarios trepados a los cables a un potencial de medio millón de volts con respecto a tierra, y a treinta metros de altura, la de un edificio de diez pisos, adonde los llevan en helicóptero. Y aquí aparecen inconvenientes electrostáticos.



En el momento en que la persona montada en el helicóptero toca la línea, recibiría una descarga formidable, y no una sola vez, sino cien veces por segundo.

Eso es porque en la Argentina, España y otros países, la polaridad de las líneas cambia cien veces por segundo,⁸ y en el mismo intervalo de tiempo, 120 veces en el Brasil, en los Estados Unidos y en otros lugares. Esas descargas producen no sólo sacudidas molestas, sino también riesgos de salud y de vida, y quemaduras.

El procedimiento de rutina que aplican es el de conectar, antes que nada, el helicóptero a la línea de alta tensión, con un cable flexible que termina en una mordaza. Ahora el cable y la nave están al mismo potencial, y la persona puede treparse a la línea.

⁷ El ritmo con el que se transfiere la energía es la potencia. La potencia eléctrica, en watt, o joule por cada segundo, es igual al producto de la tensión, en volt, por la corriente, en ampere. Para la misma potencia, cuanto más elevada es la tensión, más pequeña resulta la corriente, y por eso más fácil de conducir por cables que no sean demasiado gruesos.

⁸ En la Argentina usamos cincuenta hertz, o ciclos por segundo, y cada ciclo completo incluye un cambio de la polaridad de positiva a negativa, y el opuesto de negativa a positiva.



- Al personal de mantenimiento lo depositan sobre las líneas vivas con la ayuda de helicópteros. Se elige un día de tiempo calmo.

$$U_{\text{máx}} = \sqrt{3} U_{\text{fase-tierra}}$$

$$U_{\text{máx}} = \sqrt{2} U_{\text{eficaz}}$$

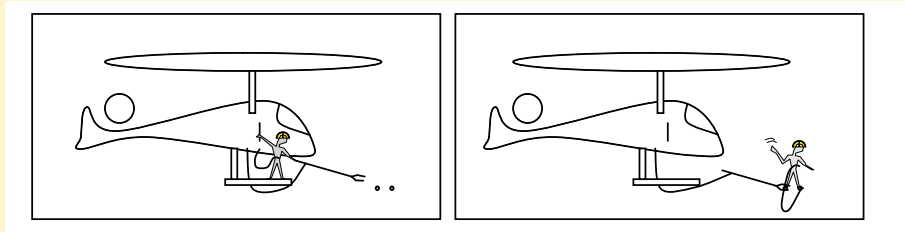
- Cuando se dice que una línea es de 500 kV, ése es el valor *eficaz* de la tensión entre dos grupos de cables, o fases. Entre cada fase y tierra hay 289 kV eficaces. Pero el valor *máximo* instantáneo de la tensión entre fases es de 700 kV, y de 408 kV entre fase y tierra, positivos o negativos en cada medio ciclo. (Los capítulos 4 y 5 explican estos conceptos.)



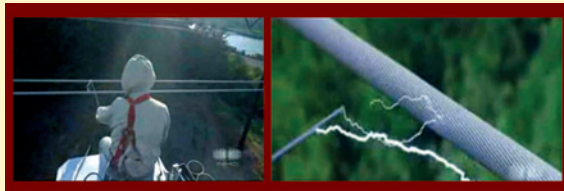
- Cable con arena incrustada por el viento. El movimiento flexible hace que cada grano produzca la corrosión del metal.



- Los lugares donde más se dañan los cables es en la llamada morsetería, o sea en los agarres y empalmes, donde se ponen unas piezas de goma, los amortiguadores, que ayudan a disipar la energía de las oscilaciones inducidas por el viento, y evitan flexiones localizadas muy pronunciadas. Son sin puntas y redondeados, para evitar la ionización del aire, causante de interferencias de radio.



Una vez en ella, pide que se vaya el helicóptero; con ello se desconecta la pinza. En el momento de la conexión y la desconexión se produce un chisporroteo impresionante.



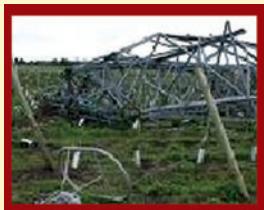
- Cómo treparse a una línea de medio millón de volt sin interrumpir el servicio.

- La persona viste un traje de tejido conductor conectado al helicóptero que la lleva. Toca la línea con una vara conductora; conecta la nave a la línea con un cable y clips; engancha su arnés de seguridad en la línea, se trepa a ella y desconecta el helicóptero para que se pueda ir. Sin esa maniobra, sufriría quemaduras y sacudidas por las descargas estáticas.

La tarea es arriesgada, pero brinda, como otras, importantes beneficios a la comunidad. Hace unos años las personas a cargo de esas tareas vestían ropa de aluminio, para que en caso de error de maniobra las chispas no las quemasen. Hoy se usan otros materiales conductores más cómodos, y además porosos para facilitar la transpiración; los tejen con fibras de carbono.

- Efectos en la salud humana (reales y míticos) de la proximidad de cables de alta tensión

En 1996, unos vecinos enardecidos de Ezeiza, en la provincia de Buenos Aires, destruyeron una torre de alta tensión, con la creencia de que su campo produce cáncer.⁹ Aún se discute, y en alto nivel, la supuesta influencia de las líneas de alta tensión en la salud de las personas y, quizá nunca se llegue a un despacho indiscutible, por los intereses económicos en juego. Es que esas líneas imponen límites a la altura de las construcciones, con la consiguiente desvalorización del terreno.



- Torre de alta tensión derribada por habitantes del barrio.

⁹ "Un violento operativo de represión fue desplegado ayer por la Gendarmería Nacional en el partido bonaerense de Ezeiza cuando numerosos vecinos se opusieron a la instalación de torres de alta tensión eléctrica en la zona. Siete personas resultaron heridas y otras cinco arrestadas. (...) Edesur afirmó anoche que: «...no existe antecedente alguno sobre problemas de salud vinculados con redes de transmisión de electricidad»". (La Nación, Buenos Aires, 6 de marzo de 1996.)

La comunidad científica no halló hasta hoy relación entre enfermedades y esos campos, cuya intensidad es miles de veces menor que cuando nos sacamos una camisa, hablamos por teléfono, usamos un tubo fluorescente o nos secamos el pelo; y más débil que el campo magnético terrestre¹⁰ con el que convivimos desde hace dos millones de años.

A veces se exhiben mapas y estadísticas que muestran una aparente coincidencia entre el trazado de las líneas y casos de cáncer. Pero las líneas eléctricas abundan, justamente, en los lugares poblados, donde hay más cáncer, porque hay más gente.

Es cierto, sin embargo, que los cables afean el paisaje, y que hay países en los que casi no se ven, porque la mayoría son subterráneos. Y cuando las líneas de alta tensión son defectuosas o están faltas de limpieza y mantenimiento, pueden producir interferencias en las comunicaciones, por ejemplo nieve en la TV de aire, o zumbidos en la radio.

La Organización Mundial de la Salud recomienda que la población no se exponga a intensidades de campo eléctrico de más de cinco kilovolt por metro, o diez si es por pocas horas diarias. Y a los portadores de marcapasos les pide que no se expongan nunca a más de cinco kilovolt por metro.

PROPUESTAS DE ESTUDIO

3.1. La República Argentina utiliza una potencia¹¹ eléctrica de unos quince gigawatt, o quince mil millones de watt, de los cuales dos gigawatt corresponden a la Ciudad Autónoma de Buenos Aires. La energía de un rayo es de unos 500 megajoule. ¿Cuánto tiempo nos duraría la energía de un rayo, si se la pudiera aprovechar para satisfacer la demanda nacional? (a) Menos de un segundo; (b) entre uno y diez segundos; (c) entre diez segundos y un minuto; (d) entre un minuto y una hora; (e) más de una hora.

3.2. Las primeras bombas atómicas disiparon una energía de unos 15 kilotones. Un kilotón equivale al estallido de mil toneladas, o un millón de kilogramos, de explosivo químico trinitrotolueno (TNT). Cada kilogramo de este explosivo libera una energía de mil calorías, o 4,2 millones de joule. En una tormenta se producen unos cuarenta mil rayos de 500 megajoule de energía cada uno. ¿Cuál energía es mayor, la de una antigua bomba atómica, o la de una tormenta eléctrica? (a) La tormenta equivale a diez bombas; (b) la tormenta equivale a tres bombas; (c) la tormenta y la bomba son de energías similares; (d) la bomba disipa tres veces más energía que la tormenta; (e) la bomba equivale a diez tormentas.

¹⁰Los campos magnéticos y electromagnéticos se tratan con más detalle en los capítulos 7, 8 y 9.

¹¹La potencia media, en watt, se calcula como el cociente entre la energía transferida, en joule, y el tiempo en el que ocurre esa transferencia, en segundos.



- Bola de plasma, que se usa como juguete o adorno, cuyo campo eléctrico en el público excede centenares de veces el de las líneas de alta tensión.



- La Organización Mundial de la Salud es parte de la Organización de las Naciones Unidas, y tuvo su primera reunión en Ginebra, Suiza, en 1948. La comunidad internacional suele respetar sus recomendaciones.



3.3. Comenten la presunta eficacia del paraguas con pararrayos incorporado, que algunos usaron a fines del siglo XIX.

3.4. Aunque la fórmula exacta para un cable recto está fuera del alcance de este libro, una aproximación gruesa para calcular la intensidad de su campo eléctrico es dividir la tensión por la distancia. La intensidad del campo eléctrico al que está sometida una persona que viva seis metros por abajo de una línea de 13,2 kV ¿excede el límite recomendado por la Organización Mundial de la Salud?

● Otras fuentes de estudio

Sugerimos buscar en la Red con las palabras electrostática, inconvenientes, cargas estáticas, rayo, descargadores, *fulmini*, *static*, *surge arresters* y *lightning*.

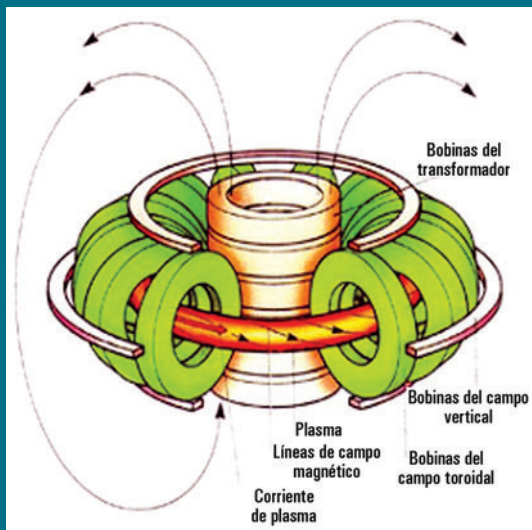
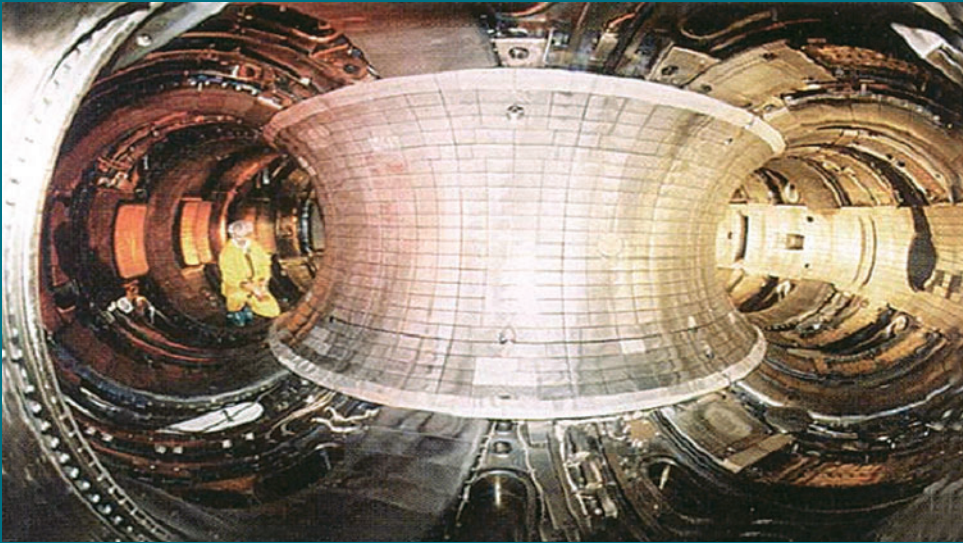
El siguiente enlace contiene muchos datos expuestos por seis especialistas argentinos reunidos en un seminario sobre estructuras de comunicaciones en municipios, realizado en el año 2000 en el Centro Argentino de Ingenieros.

<http://www.cnc.gov.ar/cit/pdf/segmunicipios.pdf>



- Cañones iónicos para limpieza industrial y neutralización de cargas de superficie. El aire que sopla, cuyos gases han sido ionizados, despega el polvo. Los iones se neutralizan con las cargas opuestas de la superficie contra la que se dirige el chorro de aire comprimido, que hay que proveerle al de arriba, que funciona con 220 volt, pero internamente genera 6.000. El otro anda sin alimentación eléctrica; usa un fuelle mecánico, y genera algunos miles de volt con cristales piezoeléctricos como los de los encendedores.

Fundamentos de electrodinámica



- Reactor experimental de fusión en la China, destinado a la obtención de energía eléctrica a partir de una reacción nuclear que transforma hidrógeno en helio. Para mantener en su sitio el chorro de plasma de hidrógeno a cien millones de grados, en rojo en el esquema, por las bobinas circularon doscientos mil amperes durante los tres segundos que duró la primera prueba, en 2006. Esa clase de reacción nuclear, semejante a la que ocurre en el Sol, no deja residuos peligrosos.

Fundamentos de electrodinámica

● Corriente eléctrica

La electrodinámica es el estudio de las corrientes eléctricas, o sea el del movimiento de las cargas.

Una corriente es el desplazamiento de cargas de cualquier clase; por ejemplo electrones en un conductor, en un líquido, en un gas o en el vacío, o bien protones en los mismos medios. También son corrientes los movimientos de cualesquiera iones¹ positivos o negativos.

La corriente eléctrica se mide y expresa en *ampere*. Un ampere es la corriente en la que se transfiere un coulomb por cada segundo que transcurre. Si designamos la carga transferida (en coulomb) con la letra Q , el intervalo de tiempo (en segundos) con Δt , y la corriente (en ampere) con I , tenemos:

$$I = \frac{Q}{\Delta t} \quad 1A = \frac{1C}{1s}$$

Para la corriente se usa I , porque esa magnitud se llama también *intensidad* de corriente, o intensidad a secas. La letra A es el símbolo de la unidad de corriente, el ampere, la C lo es de la unidad coulomb de carga,² y la letra s simboliza el segundo de tiempo. El triángulo o delta mayúscula griega equivale a nuestra D , y significa diferencia, variación o intervalo. Un ampere es un coulomb por segundo,³ y un coulomb, un ampere segundo.

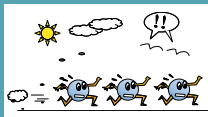
● Historia de la corriente

El hombre está familiarizado con las corrientes eléctricas desde la antigüedad más remota, a través de las descargas de electricidad estática acumulada, entre ellas el rayo. Pero los primeros experimentos con corrientes eléctricas estables los hicieron Giuseppe Galvani (1737–1798) y Alessandro Volta (1745–1820).

¹ Recordemos que un ion es cualquier partícula con carga eléctrica.

² La C de coulomb no se debe confundir con la C de capacitancia, tratada en el capítulo 1. Puesto que hay más magnitudes y unidades físicas que letras de todos los alfabetos de lenguas vivas y muertas, es inevitable usar la misma letra para cosas diferentes. El contexto permite distinguir los significados sin incurrir en errores.

³ La palabra *por*, en este caso, significa *por cada*. Algunos, para evitar confusiones, dicen *coulomb* sobre segundo; pero nadie dice, por ejemplo, que paga por un servicio cien pesos sobre mes, o que visita a sus padres una vez sobre semana.



- Una corriente de un ampere equivale al pasaje de 6,24150975 trillones de electrones (o bien protones) por segundo.

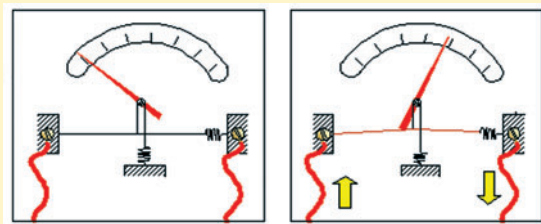


● ALGUNAS CORRIENTES, EN AMPERE

Rayo	30.000
Central	20.000
Cables de torre	1.000
Barrio	3.000
Edificio	400
Tostadora	5
Lámpara	0,5
Mosquitero	0,1
Peligrosa	0,03
Dolorosa	0,001
Molesta	0,0001
Nervio	0,000002

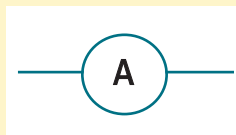
● Medición de corrientes

Los instrumentos o aparatos destinados a medir la corriente eléctrica, o sea los que indican cuántos amperes (o fracciones de amperes) circulan por un conductor, se llaman *amperímetros*. También se usan los nombres miliamperímetro, microamperímetro, nanoamperímetro o kiloamperímetro, según la escala o rango de uso de cada uno. Estos aparatos aprovechan algún efecto de la corriente eléctrica, por ejemplo el de hacerle fuerza a un imán,⁴ el de calentar el alambre por el que circula, o el de generar una diferencia de potencial, o tensión (en este caso llamada *caída de tensión*), en el conductor por el que circula la corriente; entonces la medición de corriente se realiza en este caso indirectamente, a través de una medición de tensión.



- **Amperímetro térmico.** Cuando circula corriente por el alambre horizontal, se calienta, se dilata (aumenta su longitud), se afloja y permite que gire la aguja, fija a una rueda pequeña rodeada por un hilo tenso.

Se desea que el acto de medir altere muy poco la magnitud que se mide. Así pues, un amperímetro debería ser muy parecido a un simple trozo de buen conductor. Para tener presente ese concepto, el símbolo que se emplea para representar un amperímetro es una **A** encerrada en un círculo, del que salen dos conductores gruesos diametralmente opuestos.

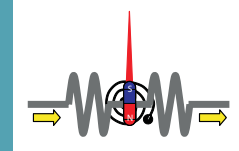


Si por alguna razón se quitase un amperímetro de su sitio, habría que conectar entre sí los cables que había en sus tornillos de conexión, o bornes, para que la corriente pueda seguir circulando con la misma facilidad con que lo hacía a través del instrumento, o mayor. Un buen amperímetro no se debe oponer al paso de la corriente; la resistencia⁵ que le opone debe ser mínima.

El cero de un amperímetro puede estar a la izquierda de la escala, o en otro sitio, si se lo usa para medir corrientes de sentidos opuestos.



- Amperímetro que indica la carga y descarga de una batería de coche. Tiene una bobina de pocas vueltas de alambre muy grueso de cobre, un imán y un resorte. Según el sentido de la corriente, el imán se inclina hacia un lado o hacia el opuesto. (abajo, el esquema).

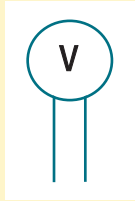


- *Shunt* para medir corrientes de centenares de amperes, que pasan por los terminales grandes. Entre los pequeños se produce una caída de algunos milivolt, fáciles de medir.

⁴ Los efectos magnéticos de las corrientes se estudian en los capítulos 8 y 9; aquí anticipamos una referencia a ese fenómeno.

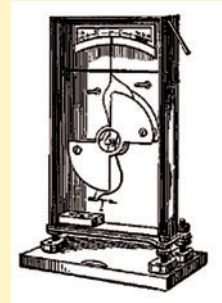
⁵ Enseguida hablaremos con mayor precisión de la resistencia eléctrica.

y antiguos, que todavía se usan, se parecen a los amperímetros, pero en vez de equivaler a un alambre grueso que deja pasar la corriente sin ninguna dificultad, ofrecen, al contrario, mucha resistencia, por lo que las corrientes que los atraviesan son débiles (idealmente nulas), y por eso no alteran mayormente las condiciones de los circuitos o aparatos a los que se conectan. Para reforzar esa idea, se los representa con una **V** encerrada en un círculo, del que salen dos conductores delgados por abajo.



Si por alguna razón se retirase un voltímetro de donde está conectado, simplemente se lo saca, no hay que hacer ninguna conexión como cuando se quita un amperímetro.

Hay voltímetros que realmente no toman ninguna corriente eléctrica, con lo que su presencia no altera en absoluto lo que se mide. Algunos necesitan de pilas, o una alimentación auxiliar. Otros, que hoy son aparatos de museo, no requieren energía extra, por ejemplo el de la figura. Dos piezas conductoras fijas en forma de ocho se conectan a un punto de medición, otra aislada de ellas y de la misma forma es móvil, y resulta atraída por las otras, de acuerdo con la tensión entre ambas.⁶ El retorno a la posición neutra se consigue por gravedad.



Los voltímetros actuales más comunes, aun los muy baratos, miden tensiones con métodos que se tratarán más adelante en los capítulos de electrónica. En términos sencillos, lo que hacen es cargar un capacitor con una carga estándar determinada. Un circuito compara la tensión que alcanzó el capacitor, con la que se está midiendo. Si es inferior, se agrega automáticamente al capacitor otra carga igual, con lo que su tensión se duplica. Si ese duplo sigue siendo inferior a la tensión medida, se repite el procedimiento, hasta que se alcanza la igualdad. Un contador registra la cantidad de veces que hubo que agregar carga, y ese número, quizá corregido con factores de escala, es la tensión medida, que indica una pantalla digital.

Un *circuito* es cualquier conjunto de elementos, conectados entre sí, y por los que circula corriente eléctrica.

● Conexión en serie

La conexión de la figura se llama *circuito serie*. Por todos los cuerpos pasa la misma corriente. Es la conexión que se usa, por ejemplo, en las guirnaldas de luces

⁶ Si hay una tensión, o diferencia de potencial, entre las placas fijas y la móvil, significa que costaría cierto trabajo desplazar una carga de prueba desde una a las otras. Por tanto, entre ellas tiene que existir un campo eléctrico de cierta intensidad. Entonces las cargas de las placas fijas tienen polaridad opuesta a las cargas de la placa móvil. Por lo tanto, se atraen.



- Económico *multímetro* digital, que sirve como amperímetro y voltímetro, entre otras funciones. Necesita pilas.

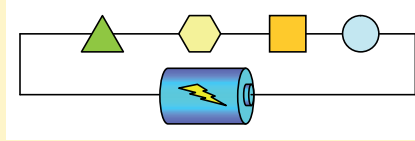


- Multímetro de aguja, o analógico. Cuando se usa como voltímetro o amperímetro, no requiere pilas. Su costo es semejante al de uno digital.

de adorno. Si se quema una lámpara de una guirnalda, se apagan todas.⁷

En una conexión en serie la corriente en cada elemento es en cada instante la

misma. Las tensiones pueden ser diferentes, pero la suma de las tensiones de todos los elementos conectados en serie a una pila, iguala la tensión de la pila.



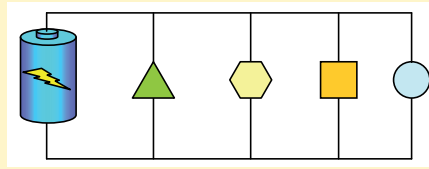
● Conexión en paralelo

La figura ilustra un *circuito paralelo*. Es el que se usa en las casas para enchufar los artefactos. Si se apaga uno, los demás siguen funcionando.

En una conexión en paralelo, la tensión en cada elemento es la misma. Las corrientes pueden ser diferentes, pero la suma de las corrientes de todos los elementos conectados en paralelo a una pila, iguala la corriente que suministra la pila.

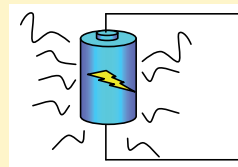
La conexión en paralelo también se llama *shunt*, derivación, y *baipás* (o *bypass*).

Los circuitos que combinan conexiones en serie y en paralelo se llaman circuitos *serie-paralelo*.



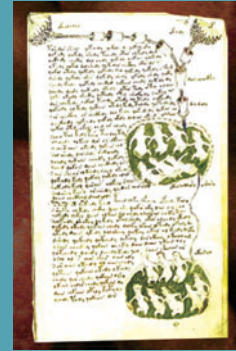
● Cortocircuito

Un cortocircuito es la conexión directa del positivo con el negativo de una pila, o entre los contactos de un enchufe.⁸ *Cortocircuitar* es poner algo en cortocircuito, y también unir entre sí los bornes de cualquier aparato, aunque no sea una fuente de energía. Por ejemplo, antes de tocar un capacitor conviene cortocircuitarlo, para que se descargue y no nos dé una sacudida.



⁷ A algunas guirnaldas les ponen, en paralelo con cada lámpara, un *termistor*, componente que se calienta cuando se quema una; con eso disminuye la resistencia que ofrecía al paso de la corriente, y permite que siga circulando, para mantener encendidas las otras lámparas.

⁸ Los cortocircuitos son, en general, indeseables. En ellos las pilas se calientan, y a veces se rompen y dejan salir líquidos corrosivos. En los enchufes y en las baterías de coches pueden haber chispas, fusión de cables e incendio de las vainas aislantes. Para reducir ese riesgo en las instalaciones, en caso de cortocircuito la alimentación se desconecta automáticamente.



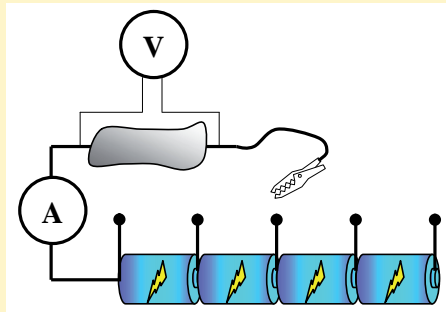
- En el palacio de Salomón (siglo X a.C.) el agua se recogía de los tejados, pasaba por filtros y después por piletas en serie. La que no se usaba había que dejarla correr, para provecho de los demás. Por costumbre hoy seguimos llamando *agua corriente* la que se sirve en paralelo; el agua que no se usa queda encerrada, y no hay que dejarla correr.



- *Baipás quirúrgico*, o *paso paralelo*, en una arteria parcialmente obstruida.

● Ley de Ohm

La *ley de Ohm*, llamada así en homenaje a Georg Simon Ohm (1789-1854), establece que para un cuerpo dado, la corriente y la tensión son directamente proporcionales, o sea que si la tensión en volt aumenta al doble, la corriente en amperes también se duplica.



● Cada pila tiene una tensión de 1,5 V. Según la posición de la pinza cocodrilo, al cuerpo gris se le aplican 0; 1,5; 3; 4,5 y 6 volt. Si ese cuerpo cumple la ley de Ohm, las corrientes estarán en la misma proporción.

La representación gráfica de la tensión en función de la corriente, o de ésta en función de aquélla, para un cuerpo que satisface la ley de Ohm, es entonces una recta que pasa por el origen. La pendiente de esa recta, o sea la constante de proporcionalidad entre la tensión y la corriente, se llama *resistencia eléctrica*; se designa con R y se expresa en ohm, cuyo símbolo es la omega griega mayúscula. Tenemos entonces:

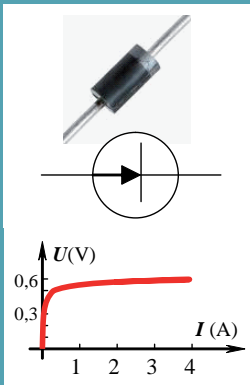
$$R = \frac{U}{I} \qquad 1\Omega = \frac{1V}{1A}$$

R es la resistencia en ohm; U , la tensión en volt; e I , la corriente en amperes. En el ejemplo del gráfico, cuyos valores están inventados, la resistencia del cuerpo vale 15 ohm.

La ley de Ohm no es una ley de la naturaleza, en el sentido que tiene esa palabra en física. Las leyes se cumplen siempre; en cambio hay cuerpos que no cumplen la ley de Ohm. Se la llama ley por costumbre en el ámbito eléctrico.

La resistencia se puede medir directamente con un óhmímetro, o con un multímetro que incluya esa función. Los medidores destinados a medir valores muy altos de resistencia, por ejemplo la de las instalaciones con respecto a tierra, se llaman megóhmetros, gigóhmetros y teróhmetros.⁹

⁹ Los prefijos mega, giga y tera significan, respectivamente, millón, mil millones y billón.



● Los diodos de silicio, muy usados en electrónica, cuya foto, símbolo y curva de tensión versus corriente muestra la figura, no cumplen la ley de Ohm.



● Megóhmetro para comprobar la aislación de instalaciones. La manivela acciona un generador que provee 500, 1.000 ó 1.500 V, a elección.

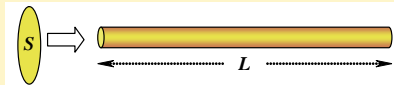
● Resistencia, conductancia, resistividad y conductividad

La inversa de la resistencia se llama conductancia; se designa con la letra **G**, y se expresa en siemens,¹⁰ en homenaje a Werner von Siemens (1816–1892), investigador eléctrico y fundador de la empresa Siemens & Halske en Alemania.

$$G = \frac{1}{R} \qquad G = \frac{I}{U} \qquad 1S = \frac{1A}{1V}$$

Mientras que la resistencia eléctrica es una propiedad de un *cuerpo*, la resistividad es una propiedad de un *material*. Es como ocurre con el peso y el peso específico; por eso a la resistividad se la llama también resistencia específica.¹¹ Por ejemplo, se puede hablar de la *resistencia* del cuerpo humano entre las manos y los pies, la de un alambre de cobre de cierto diámetro y longitud; la de un amperímetro; la de un voltímetro, y la de una línea eléctrica. En cambio, hablamos de la *resistividad* del cobre, la del aluminio, la del tejido muscular humano, la de la tierra seca, y la húmeda. La relación entre la resistencia y la resistividad para un alambre de cierto material, es la siguiente:

$$R = \rho \frac{L}{S}$$



R es la resistencia, en ohm, del alambre; **L** su longitud en metros; la letra griega **ρ**, que corresponde a la **r** de nuestro alfabeto latino, representa la resistividad del material, y se expresa en Ω.m, también en Ω.cm, o por comodidad en algunos casos, en Ω.mm².m⁻¹, que se lee: ohm milímetro cuadrado sobre metro. **S** es la sección transversal del alambre, en metros cuadrados.

En el ambiente electromecánico, la conductividad del cobre y otros metales se suele expresar en IACS. Cien IACS equivalen a 58 millones de siemens/metro, y es la conductividad de un cobre de buena calidad eléctrica. La sigla significa *international annealed copper standard*, norma internacional de cobre recocido. Por ejemplo, un alambre trafileado¹² de buen cobre de un metro de longitud y un milímetro cuadrado de sección, tiene una conductividad de cien IACS, ó 58×10⁶ S/m, una resistividad de 0,01724 Ω. mm².m⁻¹, una resistencia de 0,017241 Ω y una conductancia de 58×10⁶ S.

¹⁰ Escribimos el nombre de la unidad siemens con minúscula, porque es un sustantivo común; en cambio su símbolo es la S mayúscula, como el de todas las unidades cuyos nombres provienen del de personas. Así, los símbolos de metro, segundo y kilogramo son m, s y kg; en cambio los de volt, ampere, ohm y siemens son V, A, Ω y S.

¹¹ *Específico* significa concerniente o relativo a la especie.

¹² *Trafilear*, (de *a través e hilo*) es pasar un material por un agujero para hacer una barra o un alambre, como cuando se hacen churros de masa.



- Antiguamente, la unidad de conductancia, en vez del siemens, era el *mho*, ohm al revés, y se la representaba con una omega griega mayúscula invertida. Los tipógrafos pusieron, con toda razón, el grito en el cielo, y se cambió mho por siemens.



● ALGUNAS RESISTIVIDADES, EN OHM METRO.

Plata	1,59.10 ⁻⁸
Cobre	1,72.10 ⁻⁸
Aluminio	2,65.10 ⁻⁸
Hierro	9,71.10 ⁻⁸
Estaño	1,20.10 ⁻⁷
Agua de mar	0,2
Carbón	50
Agua potable	200
Agua pura	100.000
Baqelita	10 ¹⁰
Madera seca	10 ⁻¹¹
Mica	10 ⁻¹³
Aire	3.10 ¹³
Vidrio	10 ¹⁴
Polietileno	10 ¹⁴

● Tensión, corriente, resistencia y potencia

De la mecánica recordamos seguramente el concepto de *potencia*, magnitud física dada por el cociente entre la energía transferida en un cierto lapso, y el valor de ese tiempo. Por ejemplo, si se entregan 3.600 joule de energía en un tiempo de una hora, la potencia vale 3.600 J/h, o bien, si convertimos la hora en segundos, (3.600 J) / (3.600 s), o sea un J/s, un watt.

En el capítulo 1 interpretamos la tensión, o diferencia de potencial eléctrico, U , como cociente entre energía y carga, en J/C, o volt. Por otra parte, la corriente I es el cociente entre la carga y el tiempo, en C/s, o ampere.¹³ Entonces, del producto o multiplicación de la tensión por la corriente, resulta la *potencia eléctrica*:

$$U = \frac{\text{Energía}}{Q} \quad I = \frac{Q}{\Delta t} \quad UI = \frac{\text{Energía}Q}{Q\Delta t}$$

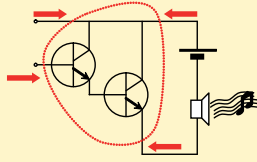
$$UI = \frac{\text{Energía}}{\Delta t} \quad \boxed{P = UI} \quad 1 \text{ W} = 1 \text{ V } 1 \text{ A}$$

Por ejemplo, si por una lámpara conectada a la red eléctrica domiciliar de 220 V circula una corriente de 0,182 A, la potencia desarrollada es de 40 W, puesto que $40 \text{ W} = 0,182 \text{ A} \times 220 \text{ V}$.

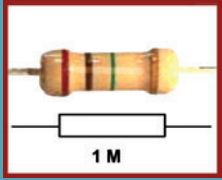
Si aparte de lo dicho tenemos en cuenta que la tensión y la corriente se relacionan con la resistencia mediante la ley de Ohm, $R = U/I$, podemos expresar la potencia no sólo como el producto de la tensión por la corriente, sino también en función de la resistencia eléctrica. Resulta $P = U^2/R$, o bien $P = I^2 \cdot R$.

● Primera ley de Kirchhoff

Esta ley, llamada así en honor del científico prusiano Gustav Kirchhoff (1824–1887), establece que en cualquier parte de un circuito, la suma de las corrientes que entran es igual a la suma de las corrientes que salen; o lo que es lo mismo, y si consideramos positivas las corrientes entrantes y negativas las salientes, la *suma algebraica de las corrientes es nula*. Por ejemplo, y sin necesidad de entender cómo funciona



¹³ J simboliza la unidad joule de energía; C, la unidad coulomb de carga; s, la unidad segundo de tiempo, y W es el símbolo de la unidad watt de potencia.



- Un elemento cuya única función es la de oponer resistencia al paso de la corriente se llama *resistor* (también se los llama *resistencias*). En la figura, uno de un megohm, y su símbolo. La línea marrón representa la primera cifra, un uno; la negra la segunda, un cero; y la verde, un factor de diez a la quinta. La línea dorada significa un cinco por ciento de tolerancia.

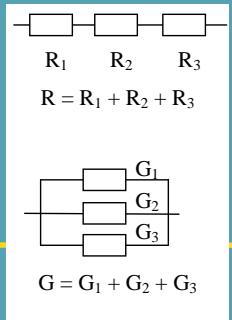
● CÓDIGO DE COLORES PARA RESISTORES.

Negro	0	
Marrón	1	
Rojo	2	
Anaranjado	3	
Amarillo	4	
Verde	5	
Azul	6	
Violeta	7	
Gris	8	
Blanco	9	
Dorado	± 5%	
Plateado	± 10%	
Sin banda	± 20%	

La precisiones mejores que el cinco por ciento, se indican con números impresos.

el circuito de la figura, las corrientes de los cuatro cables que entran a la zona punteada, suman cero. En particular, la línea punteada podría rodear sólo un punto de conexiones sin componentes; dicho punto es un *nodo* del circuito.

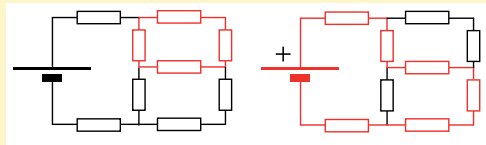
En el esquema, al menos una de las cuatro flechas tiene el sentido errado, puesto que si todas las corrientes fueran entrantes como se muestra, no podrían sumar cero.



- Los resistores en serie equivalen a un solo resistor cuya resistencia sea igual a la suma de las resistencias individuales. En los conectados en paralelo, las que se suman son las conductancias, o sea las inversas de las resistencias.

● Segunda ley de Kirchhoff

La segunda ley de Kirchhoff dice que la suma algebraica de todas las tensiones de una *mall*a siempre suman cero. Se llama mall



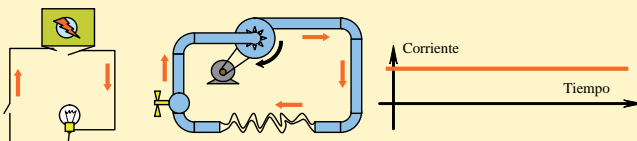
que parta de un punto, pase por conductores y componentes, y vuelva al mismo punto. Por ejemplo, en el circuito de la figura, que representa una pila conectada a un conjunto de nueve resistores en serie - paralelo, se indican en color dos de las seis mallas imaginables. En cualquiera de ellas la suma de tensiones vale cero.¹⁴

que parta de un punto, pase por conductores y componentes, y vuelva al mismo punto. Por ejemplo, en el circuito de la figura, que representa una pila conectada a un conjunto de nueve resistores en serie - paralelo, se indican en color dos de las seis mallas imaginables. En cualquiera de ellas la suma de tensiones vale cero.¹⁴

● Corriente continua y alterna

Las pilas proveen una tensión aproximadamente constante, y siempre de la misma polaridad; son de *tensión continua*, y la corriente con la que la pila alimenta los circuitos es también continua. En cambio la red domiciliaria de energía eléctrica provee *tensión alterna*, o alternada.¹⁵

Para comprender la diferencia entre la corriente continua y la alterna, recurrimos a un *modelo hidráulico*, en el que la corriente eléctrica se compara con la circulación de agua, y la tensión, con una diferencia de presión del líquido.



La corriente continua de una pila se asemeja a la circulación de agua en sentido constante, impulsada por una turbina rotativa. La alterna de la red es como agua

¹⁴Cuando al recorrer la mall

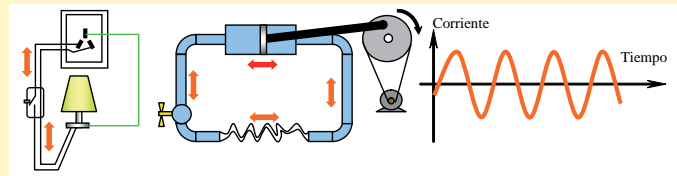
¹⁵En el capítulo siguiente se explican las ventajas de la corriente alterna, con respecto a la continua que se usó hasta mediados del siglo pasado.



- En la mayoría de los coches, el polo negativo de la batería se conecta al chasis, o masa. En la red eléctrica domiciliaria va a tierra uno de los dos cables de alimentación, que se llama el *neutro*, porque su tensión con respecto a tierra es nula o muy pequeña. El otro es el *vivo*.

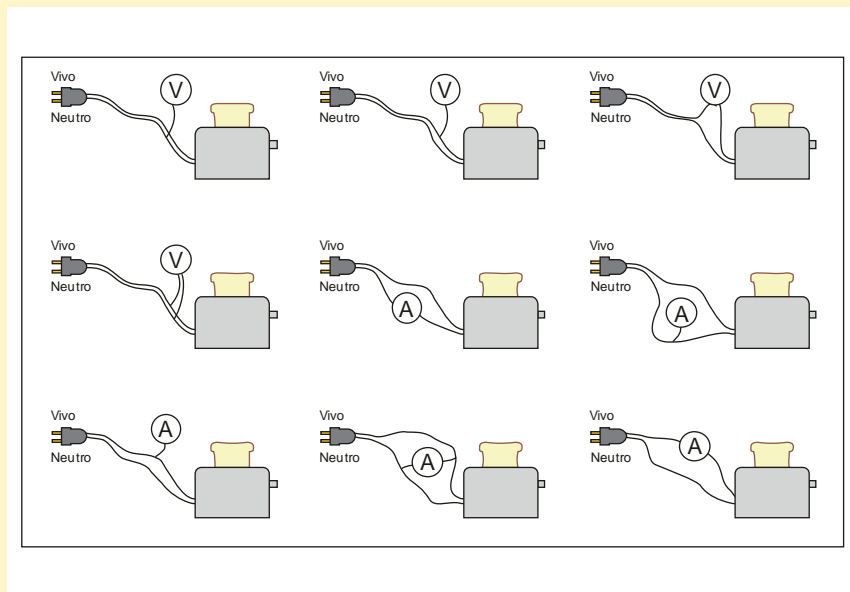
que circula en sentido cambiante, impulsada por una bomba alternativa.

Naturalmente, y como en todas las comparaciones, ésta tiene sus límites; por ejemplo dos corrientes de agua no se atraen, como sí lo hacen dos corrientes eléctricas.



PROPUESTAS DE ESTUDIO

4.1. ¿Cuáles de las siguientes conexiones sirven para medir la tensión aplicada a una tostadora, cuáles para medir la corriente que toma de la línea de alimentación, y cuál produce un cortocircuito?



4.2. ¿Qué potencia se desarrollaría en una persona que, por accidente, tomase contacto entre el vivo de la línea de alimentación de 220 V y tierra? ¿Y si el contacto accidental fuera con una línea de 7.620 V? (la resistencia del cuerpo es cercana a los 50.000 ohm).

4.3. ¿Qué resistencia tiene un calefón eléctrico de 3 kW y 220 V? ¿Cuánto vale la corriente?

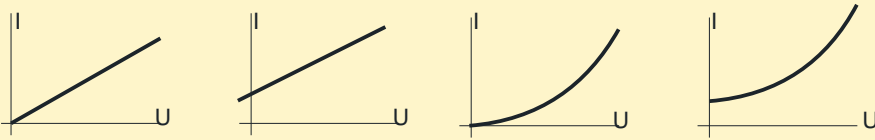


- Supuestos beneficios de las corrientes eléctricas, según creencias del siglo XIX. A la dama le aplican algunas decenas de voltios entre el cuello y los pies.



- El sitio <http://blog.makazine.com/archive/2006/04/5.html> describe cómo construir una poderosa batería eléctrica con cinco kilogramos de papas y algunos clavos.

4.4. ¿Cuál de estos gráficos representa mejor la ley de Ohm?



4.5. Se suele oír de periodistas, y hasta de funcionarios, frases como: “*Los que consuman menos de 400 kilowatt por bimestre no sufrirán aumentos de tarifas*”, o “*Se están consumiendo más kilowatt por hora*”. Analicen el acierto o error de semejantes expresiones.

● Otras fuentes

Sugerimos buscar en la Red con las palabras electrodinámica, electricidad y Tokamak.¹⁶ En <http://www.sapiens.itgo.com/documents/doc12.htm> muestran distintos tipos de voltímetros y amperímetros, y sus principios de funcionamiento.

¹⁶La palabra Tokamak es un acrónimo de **тороидальная камера с магнитными катушками**, *toroidal'naya kamera s magnitnymi katushkami*, en ruso cámara toroidal con bobinas magnéticas. Toroidal significa con forma de toro, cuerpo geométrico semejante a una cámara inflada, cuyo nombre proviene de una variante mexicana del juego del sapo de nuestro campo, que consistía en arrojar unas rosquillas de tela para ensartarlas en los cuernos de una cabeza de toro embalsamada.

Aplicaciones de la corriente eléctrica

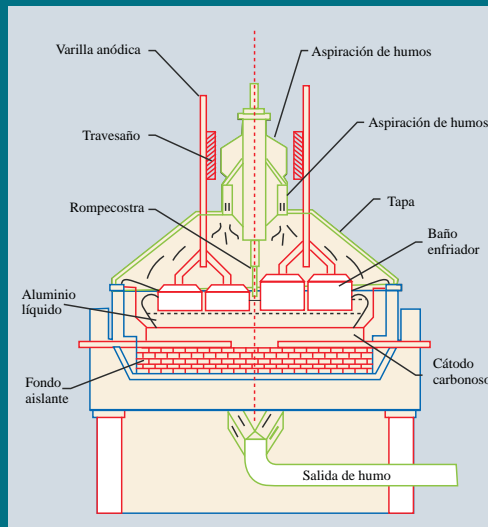
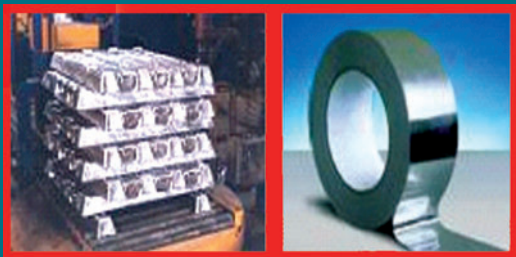


- Aunque todavía decimos *la luz* cuando nos referimos a la energía eléctrica, hoy se usa más para producir calor, frío, energía mecánica y transformaciones químicas.
- Horno para fundir metales. Sus tres barras de grafito, alimentadas con electricidad trifásica, tocan inicialmente el mineral. En cuanto establecen contacto, se separan un poco para mantener la chispa, igual que cuando se suelda con electrodos, pero con una potencia treinta mil veces mayor.



- Aluar (Aluminio Argentino) fabrica el metal con energía eléctrica de la central hídrica Futaleufú, a 650 kilómetros de distancia, que le llega por una línea de alta tensión provista casi especialmente para esa industria.

Futaleufú desarrolla casi medio gigawatt de punta, y entrega a Aluar 2.500 gigawatt hora por año, que la fábrica usa para descomponer el mineral aluminita con el paso de corriente eléctrica.



Aplicaciones de la corriente eléctrica

Hace un siglo el uso de la energía eléctrica era casi inexistente; en cambio hoy dependemos por completo de ella. Su interrupción causa grandes trastornos: quedamos a oscuras o encerrados en el ascensor, se paralizan las industrias, los subtes se detienen en los túneles, los trenes quedan varados y la gente debe descolgarse de los estribos, el tránsito sin semáforos resulta un caos, los cines cancelan sus funciones y devuelven el importe de las entradas, y las cintas de las líneas de hornos se detienen llenas de galletitas que se tuestan hasta incendiarse.



● Cuatro hechos centrales en la historia de la humanidad, cada uno de los cuales permitió un gran aumento de la población.



● Compadrito de 1900, junto a un farol de arco voltaico.

Pero casi todos aceptamos muy conformes esa dependencia, igual que la del agua potable, las vacunas y los teléfonos, porque nos brindan más libertad y una mejor calidad de vida

En nuestro país la energía eléctrica se comenzó a distribuir a fines del siglo XIX; hace más de un siglo, y se usaba casi exclusivamente para la iluminación. Los primeros faroles eléctricos, los *arcos voltaicos* instalados en la Plaza de Mayo y algunas avenidas de Buenos Aires tenían electrodos de carbón entre los que se mantenían chispas encendidas, facilitadas por la tensión continua con la que se alimentaban; como en las máquinas de soldadura de arco de hoy.

Había entonces un solo generador eléctrico, ubicado en el Puerto, impulsado por una máquina de vapor que quemaba carbón.



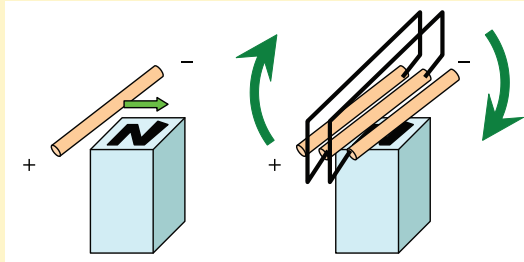
● Iluminación de emergencia con celulares.



● Arco voltaico. El camino de la chispa se curva por el ascenso de los gases calientes, menos densos que el aire que los rodea. De ahí proviene la palabra *arco* para designar una chispa eléctrica.

• Generación de energía eléctrica

Lo que llamamos generación es, en realidad, una transformación, porque se genera energía eléctrica a partir de otra forma de energía, como la nuclear, la hídrica, la térmica,¹ la solar y la mareomotriz, entre muchas otras. Nuestro país usa la térmica y la hídrica, y también aprovecha la energía nuclear.



Si se mueve un conductor eléctrico (por ejemplo un alambre de cobre) frente a un imán, entre los extremos del conductor aparece una tensión eléctrica. Si en vez de un solo conductor se ponen varios en serie, los efectos se suman (esos alambres dispuestos en serie forman una bobina).

Lo mismo sucede si se deja el conductor quieto y se desplaza el imán. En esto consiste el principio de funcionamiento de la mayoría de los generadores eléctricos.

Actualmente hay sólo una forma de generación de energía eléctrica de importancia práctica, que es la de hacer girar una máquina que hace pasar imanes (o electroimanes) frente a bobinas fijas arrolladas alrededor de grandes trozos de hierro.

Muchas centrales de energía (hídricas, térmicas y nucleares, entre otras) generan electricidad con esas máquinas rotativas, llamadas generadores, y muy parecidas a los motores; de hecho podrían funcionar como tales; pero en vez de recibir energía eléctrica y entregar energía mecánica como los motores, reciben energía mecánica y suministran electricidad.

Los generadores de las centrales se parecen a un alternador de coche, que impulsa el motor del vehículo para cargar las baterías. Pero en el caso de la generación industrial no hay baterías grandes que se puedan cargar; la energía producida se debe consumir en el instante en que se produce. Sería grandioso poder almacenar la energía cuando hay mucha y sobra; pero eso aún no se consiguió a gran escala.

En nuestro país la tensión domiciliar es de 220 volt y 50 hertz, o ciclos por segundo.



- La mano impulsa una rueda de imanes que pasan frente a una bobina, y generan en ella una tensión eléctrica que enciende las lámparas de la linterna, o carga sus pilas. Otras linternas de esa clase se agitan, para que se mueva un imán dentro de una bobina, y se genere también energía eléctrica.

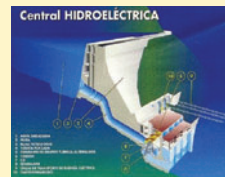


- Parte fija, o *estator*, del generador de una central. Aún no colocaron el rotor.

¹ La denominación *térmica* no es del todo clara, porque también la energía nuclear genera vapor, y la solar calienta agua y produce vapor en ciertos casos en los que la conversión es indirecta. Todas esas formas de generación eléctrica son, en definitiva, también térmicas. Pero por costumbre, esta palabra se usa sólo para la energía proveniente de la quema de combustibles.

● Origen de la energía eléctrica

Hoy las fuentes de energía eléctrica se clasifican, quizá de manera no muy clara, en *convencionales*² y *alternativas*. Se consideran convencionales la térmica, la hídrica y la nuclear. Y alternativas, la solar, fotovoltaica, eólica, mareomotriz, geotérmica y tidal,



HÍDRICAS. Estas centrales aprovechan las diferencias de nivel del terreno por donde pasan ríos. Se embalsa el agua, y se la deja caer a través de turbinas, que hacen girar alternadores de cuarenta metros de diámetro. Son muy limpias, requieren poco mantenimiento y no hay gastos de combustibles. Pero a veces alteran mucho el paisaje, y hasta el clima local, y cuando escasean las lluvias, también falta la energía.

TÉRMICAS. En estas centrales de generación se queman combustibles, y con el calor de combustión se hace hervir agua, cuyo vapor impulsa turbinas y alternadores. Son muy útiles en países que tienen mucho combustible, como los Estados Unidos de América, donde prácticamente viven sobre un gigantesco yacimiento de carbón que les durará siglos. Pero producen gases que recalientan la atmósfera. En los últimos dos siglos esos gases aumentaron al triple del valor normal, y se temen cambios climáticos desfavorables en todo el mundo.³

NUCLEARES. Son las centrales más baratas y limpias; no generan gases, y sus insumos (llamados combustibles aunque no se quemen) son abundantes. Por desgracia, los residuos requieren almacenamiento especial, y sirven para fabricar armas. El 70 % de la energía que usa Francia proviene de centrales nucleares; nosotros usamos sólo un 15 % de ese origen.

GEOTÉRMICAS. Aprovechan el calor interno de la Tierra. Tienen la ventaja de que no liberan gases, pero no hay muchas fuentes termales útiles; se aprovechan las pocas que existen.

EÓLICAS. Usan la energía del viento para impulsar generadores. Son útiles en regiones de pocos habitantes y donde hay mucho viento. Un solo molino puede alimentar un pequeño poblado; pero para una gran ciudad harían falta miles de molinos, y no habría dónde ponerlos.

SOLARES TÉRMICAS. Concentran los rayos del Sol con espejos para hervir agua en calderas, cuyo vapor impulsa turbinas, las que a su vez hacen girar alternadores.

SOLARES FOTOVOLTAICAS. Estas centrales convierten directamente la radiación

² Lo que en un momento histórico se considera alternativo, con el avance tecnológico puede pasar a ser algo convencional.

³ En la Argentina también la generación de energía eléctrica se basa principalmente en la quema de combustibles, en nuestro caso el gas natural nacional, y el importado de Bolivia.



- La chimenea mayor no echa casi humo porque quema bien; pero despidе gases que recalientan la atmósfera. Las torres bajas son enfriadoras y sólo despiden vapor de agua. Sin embargo en el cine y la TV a veces las presentan, injustamente, como símbolos de la contaminación.



- Hermoso parque de generación eólica en Copenhague, Dinamarca. En el mar abierto hay viento más intenso y uniforme que en tierra. Sus veinte generadores desarrollan 40 MW en conjunto. (Diez veces menos que la central argentina de Futaleufú, o la de A-tucha.)

solar en electricidad. Podemos ver esos paneles en las autopistas, donde cargan las baterías de los teléfonos de emergencia⁴ para que funcionen aunque se interrumpa el servicio eléctrico. Los paneles tienen bajo rendimiento, y ocupan mucho lugar, pero son muy limpios.

TIDALES, O DE MAREAS. Son centrales hidroeléctricas que aprovechan los desniveles producidos por las mareas. Sólo sirven en lugares costeros donde ese efecto sea importante; además la geografía debe ser apropiada para embalsar el agua cuando sube, para usarla después.

● Transmisión, o transporte, de la energía eléctrica

Por razones de aislación eléctrica en el espacio disponible, los alternadores de las centrales generan energía eléctrica de una tensión cercana a los 20 kilovolt, con los que se alimenta un transformador que eleva la tensión a 500 kilovolt. Con esa tensión, y a medida que se la va generando, la energía se *transmite*, o *transporta*, a lugares distantes, a veces a países vecinos. Se usa una tensión muy alta para que, a igual potencia, la corriente sea pequeña⁵; entonces los conductores pueden ser delgados, livianos y baratos, aunque los aisladores deban tener una mayor longitud. La posibilidad de generar energía en un sitio y consumirla en otro hace que se aprovechen mejor los recursos; por ejemplo se puede vender energía cuando sobra, y comprarla cuando falta. Cuando los horarios pico de consumo no son simultáneos entre regiones apartadas en longitud geográfica, entonces la transmisión permite aprovechar una central para abastecer dos zonas en diferentes horarios.



permite aprovechar una central para abastecer dos zonas en diferentes horarios.

- **Torres de 500.000 volt que soportan seis cables (dos líneas trifásicas). A unos metros del suelo a veces ponen garfios para que los niños no trepen y sufran daños.**

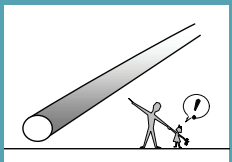
La etapa siguiente a la generación y transmisión es la *distribución* de la energía eléctrica, que se hace a través de transformadores que reducen la tensión de 500 kV a una más baja de 13,2 ó 33 kV, con la que se recorren barrios y suburbios. Sigue por último el *consumo*. En cada manzana o edificio importante, o en cada barrio suburbano pequeño, un transformador reduce aún más la tensión, a los 220 V y 380 V de las viviendas e industrias.

⁴ La utilidad de esas líneas disminuyó con el auge de la telefonía celular.

⁵ Recordemos que la potencia eléctrica, en watt, es igual al producto de la tensión, en volt, por la corriente, en ampere.



- Estación repetidora de señales de satélite, ubicada en un descampado carente de líneas eléctricas. El sistema funciona con la electricidad generada por dos paneles solares fotovoltaicos.

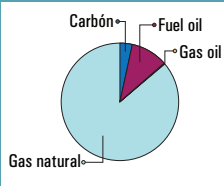


- Si pretendiéramos transmitir la energía con una tensión de sólo 220 V, la corriente sería tan alta, que para construir las líneas eléctricas no alcanzaría todo el cobre del mundo.

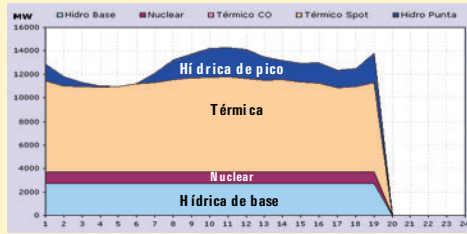
● Administración de la energía eléctrica

Hay un organismo⁶ que decide, bajo la autoridad política, cómo se reparte la energía; a quiénes privan de ella cuando no alcanza porque llueve poco; cuánta se compra o se vende; si el agua embalsada se guarda más tiempo o en cambio se la hace pasar de inmediato por las turbinas; qué se hace cuando sobra energía que nadie compra; qué máquinas se detienen en ese caso, o en qué embalse se deja escapar el agua sin turbinarla.

La información se publica en internet, donde se puede consultar cuánta potencia genera cada central, cuáles fueron sus desperfectos si los hubo, y cuánto vale la energía hora a hora.



- Nuestro país usa el gas natural como principal combustible para la generación térmica. En menor medida, quema también carbón, y combustibles líquidos derivados del petróleo.



- **Generación del primero de agosto de 2007, informada hasta las 19.** La potencia de origen térmico, parte de la hídrica (en celeste, llamada de base) y la nuclear son casi constantes a lo largo del día; en cambio la hídrica de punta es variable y responde a las demandas diferentes en cada horario. A las cuatro de la mañana el consumo es mínimo.

● Ventajas de la corriente alterna

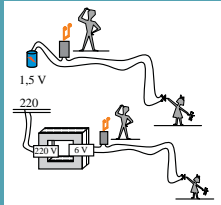
Hasta 1940 la energía eléctrica se distribuía con tensión continua, lo que facilitaba el funcionamiento del alumbrado público con arcos voltaicos. Pero por la misma razón por la que se mantenían los arcos luminosos, en los cortocircuitos accidentales también se mantenían las chispas; que caminaban por los cables y causaban incendios. En cambio la tensión alterna, que se distribuyó al principio junto con la continua, se interrumpe cien veces por segundo⁷ en nuestro país, y 120 en algunos otros; así, en cada interrupción se apagan los posibles arcos. Otra ventaja de la tensión alterna es que se la puede elevar y reducir con transformadores, que no funcionan con tensión continua.

● Sistema trifásico de distribución industrial y domiciliaria

Con el doble fin de ahorrar cobre y de facilitar el funcionamiento de los mo-

⁶ Esa institución es el Sistema Argentino de Interconexión, SADI, que maneja una empresa privada de servicio público, Cammesa: Compañía Administradora del Mercado Mayorista Eléctrico, Sociedad Anónima.

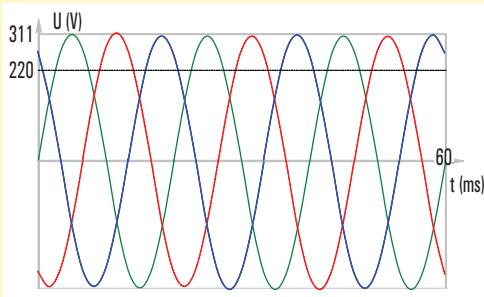
⁷ La corriente se interrumpe dos veces en cada ciclo; cuando aumenta y pasa por cero, y cuando disminuye y pasa por cero.



- Los 220 V serían peligrosos para los timbres, porque afuera a veces llueve; por eso funcionan con menor tensión. En 1930 andaban a pila; hoy, gracias a la alterna, usamos transformadores de 220 a 6 V.

«Cuando estén secas las pilas, de todos los timbres, que vos apretás...» Metáfora del abandono en el tango *Yira, yira*, de Enrique Santos Discépolo, 1930

tores, la distribución de energía eléctrica en edificios y pequeños comercios e industrias se hace con cuatro cables, llamados el neutro, y las fases 1, 2 y 3 (o R, S y T). Entre el neutro y una fase hay 220 V; entre dos fases, 380 V. A cada vivienda pequeña se le da el neutro⁸ y una fase.⁹ Popularmente el suministro monofásico, el de una sola fase y el neutro, se llama luz; y el trifásico, de tres fases y el neutro, *fuerza motriz*, o *fuerza*, porque se usa para alimentar motores grandes.



● Las tensiones alternas de la distribución trifásica no varían simultáneamente en el tiempo, sino que cada una de ellas está atrasada o adelantada un tercio de ciclo con respecto a las tensiones de otras dos fases; eso es útil para el funcionamiento de los motores. La tensión máxima instantánea es de 311 V. Los 220 V son la tensión eficaz, o sea la de una tensión continua del mismo efecto energético.

Hay países que, como el nuestro, usan 220 V y 50 Hz; por ejemplo Alemania, Dinamarca, España, Francia, Italia, Reino Unido, Paraguay, Uruguay y Chile. Los Estados Unidos usan 120 V y 60 Hz, como el Brasil, Canadá, Cuba, México y Venezuela, entre otros. Los fabricantes de artefactos tienen eso en cuenta para que se puedan enchufar en cualquier sitio con sólo correr una llave, y a veces aun sin eso.

Cuando por una falla falta una fase, los motores vibran, hacen menos fuerza y se recalientan. Normalmente hay dispositivos de protección, llamados guardamotors, que cortan la alimentación eléctrica en ese caso.

● Vivo y neutro

En una instalación domiciliaria los tomacorrientes tienen —o deberían tener¹⁰— tres contactos: tierra, vivo y neutro. Si descalzos y parados sobre un suelo húmedo tocáramos el vivo, sufriríamos una sacudida eléctrica peligrosa, mortal a veces. En cambio nada sucede si tocamos tierra o el neutro. Eso ocurre porque la compañía conecta a propósito uno de los cables a tierra, con una barra enterrada que llaman

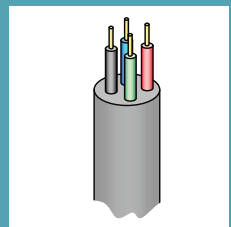
⁸ El nombre de *neutro* proviene del hecho de que ese cable no tiene tensión con respecto a tierra, o tiene una tensión muy pequeña.

⁹ Por error de traducción de las palabras *phase* y *face*, a veces se confunde fase con faz, interfase con interfaz, fases con faces e interfaces con interfases.

¹⁰ Los adaptadores de tres patas a dos, que venden en comercios y en la calle, permiten conectar un artefacto nuevo a una instalación vieja, y viceversa; pero anulan la protección de tierra, por eso su uso y venta están prohibidos. Pero son preferibles a las conexiones improvisadas que haría el público si no los pudiese conseguir. Quizás eso explique el escaso celo para hacer cumplir ese reglamento; seguramente se prefiere la conciencia al castigo.

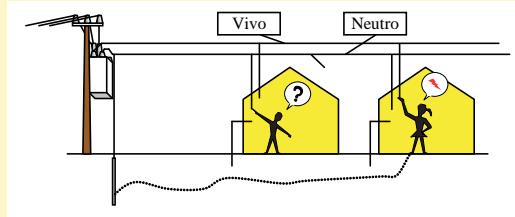


● Emblema del Sindicato Luz y Fuerza, de los trabajadores de los servicios eléctricos. El nombre alude a la energía eléctrica monofásica y trifásica, pero también, y con algo de poesía, a la verdad, y a la fortaleza sindical.



● CABLE DE NEUTRO Y TRES FASES. LAS TENSIONES SON:

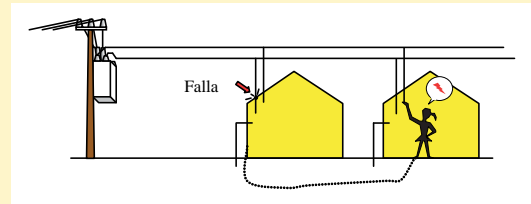
negro-azul:	220 V
negro-rojo:	220 V
negro-verde:	220 V
rojo-azul:	380 V
verde-rojo:	380 V
azul-verde:	380 V



jabalina. Pero ¿por qué hay un vivo y un neutro? Si la compañía no conectara ningún cable a tierra, ¿no nos salvaríamos, acaso, de descargas molestas y peligrosas?

La respuesta es negativa. Supongamos que así lo hicieren, y

que nada conectasen a tierra. Pero una falla en una de las miles de viviendas en el barrio haría que un cable de energía se vincule a tierra, y exponga con eso a los demás a que sufran descargas cuando tocan el otro conductor. Como las fallas son inevitables, la compañía eléctrica decide evitar efectos erráticos y sorpresivos con una conexión definitiva que hace que los percances de un usuario no dependan del estado de la instalación de otro.



● Sistemas aislados de alta seguridad

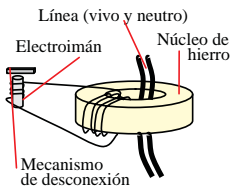
En quirófanos y otros ambientes de seguridad, ponen transformadores de 220 a 220 V, para aislar de tierra los dos conductores de la instalación. Así nadie sufre una sacudida, cualquiera sea el cable que toque, mientras sea sólo uno y no exista ninguna otra falla.¹¹

Cada vez se populariza más la instalación de *disyuntores diferenciales*. Disyuntor significa que desconecta; diferencial, que lo hace cuando hay diferencia entre las dos corrientes que lo atraviesan, la del neutro y la del vivo.

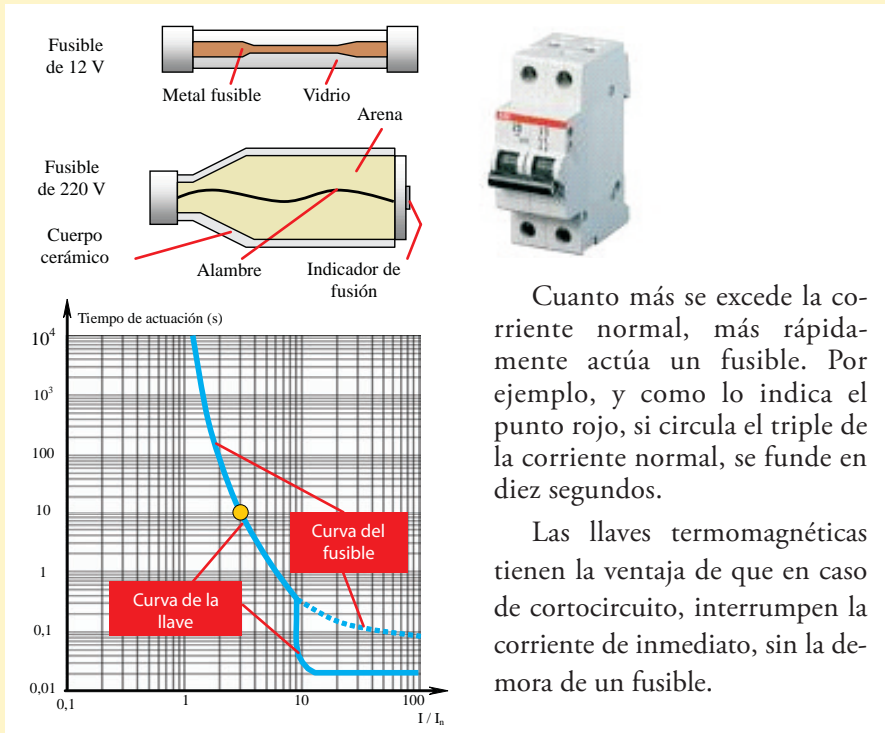
● Fusibles e interruptores termomagnéticos

Las corriente excesiva que circula por los cables de una instalación, debida a que hay demasiadas cosas enchufadas, o a un cortocircuito accidental, puede producir incendios, humos tóxicos, o fundir los cables dentro de las paredes, con graves daños personales y materiales. Para evitarlo, se intercalan fusibles y *llaves termomagnéticas*.

¹¹ Esos sistemas de alimentación sólo se deben usar cuando hay un buen servicio de mantenimiento. De otro modo, si en un aparato se dañase la aislación con respecto a tierra, y si no se lo reparase de inmediato, se perdería la ventaja original, y surgirían percances al azar, según se encienda o no el equipo defectuoso.



- El disyuntor diferencial actúa cuando la corriente que recorre el conductor vivo es diferente de la que pasa por el neutro. Cuando eso ocurre es que hay una fuga a tierra, posiblemente a través de una persona, que con este aparato se salva de recibir corriente durante mucho tiempo. La instalación tiene que estar en perfecto estado. El botón azul comprueba su funcionamiento, con una diferencia de corriente de 30 miliampere.



Cuanto más se excede la corriente normal, más rápidamente actúa un fusible. Por ejemplo, y como lo indica el punto rojo, si circula el triple de la corriente normal, se funde en diez segundos.

Las llaves termomagnéticas tienen la ventaja de que en caso de cortocircuito, interrumpen la corriente de inmediato, sin la demora de un fusible.



- Cortocircuito deliberado producido en una instalación, para estudiar sus efectos destructivos el caso de que no actúen las protecciones. El fuego debe salir arriba y no quemar ningún maniquí testigo.

● Efectos de la corriente eléctrica en el cuerpo humano

Raramente percibimos una corriente de 50 μA . Un miliampere nos da una sacudida alarmante; diez miliampere producen movimientos incontrolados; treinta miliampere, si persisten durante un segundo o más, pueden paralizar los músculos respiratorios. Las corrientes mayores pueden paralizar el corazón.

En la Argentina mueren más de dos mil personas por año en accidentes eléctricos. Los especialistas recomiendan, en caso de desvanecimiento, comprobar si la víctima respira, y en ese caso no hacer nada hasta la llegada de auxilio médico. Si no respira, pero tiene pulso, hay que darle respiración boca a boca.

Si además de no respirar, la víctima tiene el corazón paralizado, hay que hacerle respiración boca a boca y a la vez masaje cardíaco.¹² La figura de la página siguiente indica las maniobras de auxilio para esos casos.

¹²Los médicos que actúan en emergencias aseguran que quienes están en el lugar del accidente, aunque sus conocimientos sean infinitamente menores que los de los especialistas, tienen en cambio la gran ventaja de poder actuar al instante y sin demoras; de ahí la conveniencia de conocer los rudimentos de la atención de víctimas de choques eléctricos que parezcan muertas, pero que tengan apenas una parálisis respiratoria momentánea de la que se puedan recuperar con ayuda.



- Un caracol pintado en un fusible indica que es de actuación lenta, apropiada para el arranque de un motor. Un rayo identifica un fusible rápido, para equipos electrónicos. (La tortuga y la liebre de nuestra fábula latina son íconos menos interpretados en el ambiente eléctrico internacional.)



PROPUESTAS DE ESTUDIO

5.1. ¿Cuál de los cuatro cables de la página 59 es el neutro?

5.2. Busquen en diarios o Internet ejemplos de usos correctos e incorrectos de las expresiones kilowatt y kilowatt hora.



5.3. Construyan un motor experimental, por ejemplo el de la figura, hecho con una pila, un imán y un alambre aislado enrollado alrededor de una caja de fósforos.

5.4. Aluar gasta 14 megawatt hora por cada tonelada de aluminio que produce. ¿Cuánto aluminio fabrica anualmente con los 2.500 gigawatt hora por año que recibe de Futaleufú?

5.5. ¿A cuántos megawatt equivale un gigawatt hora por año?

5.6. A quince centavos el kilowatt hora ¿cuánto dinero se pierde por cada hora que deje de funcionar una línea de 500 kV y 1.000 A? (La potencia trifásica se calcula como $P = \sqrt{3} U.I$)

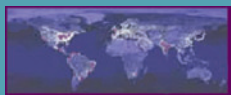
5.7. Consideren las ventajas e inconvenientes de los 220 V en las casas argentinas, comparados con los 120 V de otros países.

• Otras fuentes

Sugerimos buscar en la Red con las palabras Cammesa, generación, distribución, energía eléctrica, vivo, neutro, RCP (reanimación cardiopulmonar), CPR (*cardiopulmonary resuscitation*), Cátedra de Física del CBC UBA; como ejemplo de expresión errónea, “kilowatt por hora”; y acertada, “kilowatt hora por bimestre”.



- Símbolos internacionales de peligro eléctrico, útiles porque muchos no leen las advertencias, o perciben mejor las figuras que el texto.



- El mundo de noche. Se combinaron artísticamente fotos reales tomadas en momentos diferentes, de noche local, y sin nubes (podría haber algo de trampa). Las zonas más luminosas son las de más población y desarrollo.

Materiales eléctricos



● Los plásticos, popularizados a partir de 1930, revolucionaron la producción, especialmente, la de la industria eléctrica.

Izquierda arriba: antiguos aisladores de metal y discos de vidrio, o de porcelana esmaltada, que todavía se usan, enganchados en cadena. Cada disco soporta 10.000 V.

Izquierda abajo: detalle de los eslabones de las cadenas.

Derecha arriba: otros, enterizos, hechos con barras macizas de plástico reforzado con fibra de vidrio (como el de las garrochas y cañas de pescar), enfundados en goma de silicona. Pesan diez veces menos, son más baratos, cumplen la misma función y, si se caen, no se rompen. Cada centímetro soporta 10.000 V.

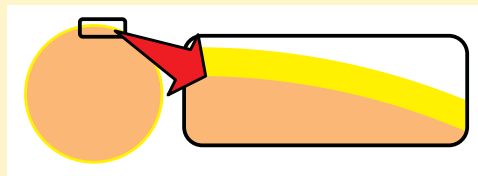


Materiales eléctricos

La industria eléctrica necesita conductores, aislantes y semiconductores.¹ Los materiales conductores más usados, actualmente, son el cobre y el aluminio.

● Cobre

El cobre siempre tuvo un gran valor estratégico, desde la antigüedad, cuando se lo usaba, aleado con estaño, en la fabricación de ollas, arados, lanzas y flechas (después, balas de fusil). Este metal se encuentra, a veces, en estado puro o nativo en la naturaleza, y más comúnmente en forma de óxidos y sales. Hoy, sigue siendo muy apreciado, pero no tanto para la guerra; se usa mucho más en la industria eléctrica. Después de la plata, el cobre es el metal que mejor conduce la electricidad. Se lo puede trafilarse fácilmente, es decir, convertirlo en hilos delgados.



● Corte transversal de un delgado alambre de audífono, de unos cien micrones de diámetro (una décima de milímetro). Sus tres micrones de barniz aislante soportan una tensión de hasta mil volt.

El cobre se suelda con facilidad² y hace buen contacto cuando se lo aprieta. Pero no resiste bien la intemperie. El ambiente industrial y los gases de escape de los coches, en las ciudades y cercanías de rutas, atacan su superficie.

● Aluminio

Este metal es más reciente en la historia; se lo obtuvo por primera vez en 1825.

¹ La palabra *semiconductor* tiene, en este capítulo de electricidad, el significado de un material de propiedades intermedias entre las de conducir y aislar. En el ambiente electrónico, en cambio, reciben ese nombre ciertos cristales que son, normalmente, aislantes, pero que se vuelven conductores cuando se les aplica una señal eléctrica en un electrodo de control, o cuando reciben algún otro estímulo, como la luz o radiaciones.

² Hay alambre esmaltado, llamado *autosoldable*, que se puede soldar sin necesidad de rasparle el esmalte aislante, el cual actúa como fundente y facilita la unión.

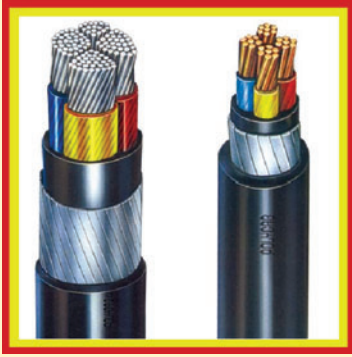


● Aquiles carga el cuerpo de Patroclo, empuña su lanza de bronce y jura vengarse. (Escena de *la Ilíada*, siglo VIII aC.) El bronce es una aleación de cobre y estaño. Abajo, otro uso bélico del metal: balas de fusil con vainas de bronce y cabezas de plomo cubiertas de cobre.



● Cúpula de cobre del Congreso de la Nación. La pátina de óxido, carbonato y sulfato protege el resto del metal.

Resiste mejor los agentes climáticos; pero su conductividad eléctrica alcanza sólo el 60 por ciento de la del cobre. Sin embargo, su densidad es tres veces menor. Entonces, aunque para la misma corriente los cables de aluminio deban ser más gruesos, resultan más livianos que los de cobre. Eso es importante en las líneas de transmisión eléctrica, porque las torres y los aisladores no tienen que soportar tanto peso como lo requeriría el cobre. En cambio, en los conductores envainados, el aluminio es poco ventajoso, porque encarece la aislación, que tiene que ser de mayor diámetro.



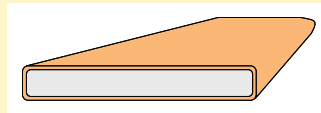
El aluminio vale hoy tres dólares el kilogramo, mientras que el cobre cuesta cuatro. Por volumen, el precio de esos dos metales es de 9 y 36 dólares por litro.

La buena resistencia a la corrosión del aluminio se debe a que se le forma, naturalmente, una capa de óxido muy delgada y transparente, de apenas unas diez moléculas de espesor. Esa capa se reconstituye de inmediato donde se daña. Aún así, la atmósfera de las ciudades la ataca, por lo que se aplica, a veces, un procedimiento llamado *anodizado*,³ que genera una capa de óxido de espesor tres mil veces mayor, unos 30 micrones y, a veces, cien micrones en el llamado anodizado duro.

Esa capa protectora tiene, por desdicha, un gran inconveniente eléctrico: dificulta el contacto. Cuando en las instalaciones eléctricas se usa aluminio, hay que hacer los empalmes con una grasa especial que disuelve la capa de óxido, inhibe su formación y protege el metal de la atmósfera. De otro modo, la unión se calentaría anormalmente, y se fundiría.

● Conductores compuestos

Un material conductor que reúne las ventajas del aluminio y del cobre, resultado de una útil variante del trafilado, está compuesto de aluminio en la mayor parte del volumen, pero con una delgada capa de cobre por afuera. Las barras compuestas se pueden empalmar como si fueran de cobre, pero pesan –y cuestan– poco más que las de aluminio.



Los siguientes datos ayudan a decidir en qué casos conviene usar uno u otro

³ Anodizar una pieza es sumergirla en una solución química, conectarla al polo positivo y hacerle circular corriente para que se le forme una capa protectora, por ejemplo, de un metal resistente a la oxidación. En el caso del aluminio la solución es de ácido sulfúrico, y la capa que se le forma es de un óxido de ese metal. Se hace circular un ampere por cada decímetro cuadrado de superficie, hasta que la pieza se torne bastante aislante. El negativo se conecta a un cátodo de plomo, también sumergido.



- La capa de óxido de aluminio que resulta del anodizado es porosa; por eso acepta bien las tintas. La pieza de apariencia natural en la figura, también fue anodizada.



- Distintas formas de barras de aluminio recubiertas de cobre, destinadas a la conducción de la corriente eléctrica. En edificios grandes, conviene hacer la alimentación eléctrica con barras y no con cables, demasiado gruesos y difíciles de manejar.

material con fines eléctricos. Por ejemplo, el oro conduce mejor que el aluminio, y peor que el cobre; y es, por mucho, el más caro de esos metales. Pero resiste tanto la corrosión, que se lo prefiere para fabricar los electrodos de las pantallas de cristal líquido, o LCD, y para bañar los contactos de las plaquetas de las computadoras, porque en esas aplicaciones su utilidad es mucho mayor que el costo, dado que se lo emplea en muy pequeña cantidad.



- Para obtener nitrógeno líquido, se comprime el aire de la atmósfera con compresores, se espera a que se enfríe, y si la compresión fue suficiente, ya con eso, el aire queda líquido. Cuando se libera la presión, el aire comienza a hervir, pero se lo puede conservar líquido durante muchas horas en un termo. Lo primero que se separa es el nitrógeno, que hierve a 77 K; después lo hace el oxígeno, a 90 K.

METAL	DENSIDAD kg/dm ³	PRECIO DÓLARES/kg	CONDUCTIVIDAD S/m
plata	10,5	160	0,630 x 10 ⁸
cobre	8,9	4	0,580 x 10 ⁸
oro	19,3	25.000	0,452 x 10 ⁸
aluminio	2,7	3	0,377 x 10 ⁸
hierro	7,8	1,6	9,90 x 10 ⁸

$$R = \rho \frac{L}{A}$$

$$G = \gamma \frac{A}{L}$$

Junto a la tabla, recordamos la fórmula que da la resistencia R , en ohm, de un conductor de resistividad ρ (en $\Omega \cdot m$), longitud L (en metros) y sección transversal A (en m^2).

Abajo, su recíproca, que da la conductancia G de ese mismo conductor, en siemen (S), en función de los mismos datos y de su conductividad, γ (en S/m). La conductividad es la inversa de la resistividad, y $S = 1/\Omega$.

Por ejemplo, un alambre de cobre de un metro de longitud y un milímetro cuadrado de sección, tiene una resistencia eléctrica $R = 0,017 \Omega$, y una conductancia $G = 58 S$. Si es de aluminio, su resistencia es de $0,026 \Omega$, y su conductancia, de $38 S$.

• Superconductores de alta temperatura

La superconducción, o superconductividad, y una de sus consecuencias, la levitación magnética, fueron descubiertas en 1911 por el físico holandés H. K. Onnes, premio Nobel de Física en 1913. El investigador notó, entre otros notables efectos,⁴ que el mercurio y el plomo se convierten en conductores perfectos, cuando su temperatura es menor de cuatro grados Kelvin, o 269 grados centígrados bajo cero. La resistencia eléctrica del material se anula por completo y una corriente eléctrica que estuviera circulando, se mantiene, indefinidamente, y sin gasto de energía. El plomo y el mercurio son superconductores de *baja* temperatura.

⁴ Otro efecto de las temperaturas muy bajas es la *superfluidez* del helio líquido que, a tres grados Kelvin, pierde por completo su viscosidad. Cuando se lo deja de agitar, en vez de detenerse, al rato, como lo hacen los demás líquidos, se mantiene en movimiento.



- El paciente en estudio pasa por la bobina superconductora del tomógrafo, que genera en su cuerpo un intenso (pero inofensivo) campo magnético, con el que se estudian sus órganos y tejidos.

En 1986 K. A. Müller y J. G. Bednorz desarrollaron materiales que presentan superconductividad a temperaturas superiores a los 77 K y recibieron, por eso, el premio Nobel de Física de 1987. La receta para fabricarlos resultó tan sencilla después del descubrimiento, que la hija de uno de ellos la puso en práctica en una feria escolar de ciencias. Esos materiales, de la familia de los cerámicos, se conocen como YBCO, en inglés óxidos de itrio, bario y cobre, y son superconductores de alta temperatura. Aquí *alta* significa 195 grados bajo cero,⁵ que es la temperatura de ebullición del nitrógeno a la presión normal. Ese gas es el más abundante del aire.

La explicación de la superconductividad se basa en la física cuántica y es algo complejo, especialmente, la de alta temperatura.



● **Levitación magnética.** Un imán permanece suspendido sobre un material superconductor enfriado con nitrógeno líquido, y viceversa.

Hay variadas aplicaciones de los superconductores. Se los usa en trenes de alta velocidad, que levitan sin rozamiento sobre rieles magnéticos. En algunos tomógrafos computados, en hospitales, se hacen circular, por superconductores, corrientes eléctricas muy grandes, que generan campos magnéticos intensos, necesarios para el análisis por resonancia magnética nuclear.⁶ Los reactores de fusión nuclear, hoy todavía experimentales, emplean superconductores para las grandes corrientes que generan el campo magnético que mantiene el plasma en su sitio. Se usan, también, en el Gran Chocador de Hadrones, en Suiza, donde forman parte de los electroimanes que hacen girar en círculos las partículas aceleradas. Algunas estaciones de telefonía celular emplean superconductores en sus generadores de microondas, y se los usa también en memorias de computadoras de alta velocidad.

Quizá la energía de las centrales eléctricas se transmita, algún día, por superconductores de temperatura ambiente, si su existencia fuera posible.

● Semiconductores

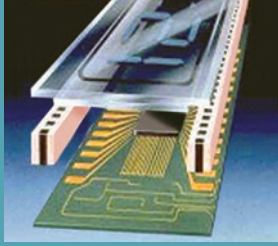
A veces hay que conducir, lo mejor posible, la electricidad; y, en otros casos, se trata, al contrario, de aislarla cuanto se pueda. Para eso se necesitan materiales de elevada conductividad y de gran resistividad, respectivamente.

⁵ Los grados de temperatura de la escala centígrada se indican con el símbolo °C; los de la escala Kelvin o absoluta, con la letra K, sin el círculo elevado. La temperatura de 0 °C equivale a 273,16 K.

⁶ En capítulos siguientes se trata el tema con mayor detalle.



● Cuando se aprietan las teclas, los puntos negros (de goma conductora) unen los contactos de cobre del circuito impreso.



- **Contacto ingenioso.** La unión eléctrica entre los contactos de oro de la pantalla de cristal líquido y el circuito impreso de cobre, se hace a presión, a través de tiras de goma aislante con segmentos conductores intercalados. En vez de oro se usan, también, compuestos conductores transparentes de estaño y de indio.

Pero, también, son útiles los materiales de condición intermedia entre la conducción y la aislación, sea porque deban tener cierta resistencia eléctrica para la función que cumplen o, simplemente, porque son baratos y no se necesita una conductividad mayor.

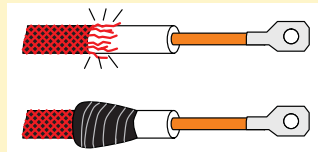
El cable de media tensión de la figura tiene un alma conductora de 19 alambres de cobre estañado, un aislante de polietileno amarillo, una envoltura de tierra de papel metálico, una malla protectora de acero y una funda de plástico rojo. Pero, entre el cobre y el aislante hay unas capas negras de un plástico semiconductor, cuya función es la de evitar que dentro del cable quede aire sometido a un campo eléctrico intenso, porque haría chispas que en pocos años destruirían la aislación.⁷



En este caso no se buscó, especialmente, que esas envolturas fuesen semiconductoras; servirían, igualmente, si condujesen tanto como un metal.

Los teclados de controles remotos y computadoras, suelen tener contactos de goma semiconductor, pero si la goma fuera muy conductora, serviría igualmente. De hecho, la hacen todo lo conductiva que pueden.

En otros casos se necesita, en cambio, que el material tenga cierta resistencia. Por ejemplo, para pintar las líneas calefactoras en la luneta trasera de los coches, que evitan la condensación de humedad, se usa una pintura de polvo de cobre que conduce bastante menos que un cable del mismo material.⁸



Otro ejemplo en el que la conducción parcial es útil, es el de los terminales de media y alta tensión, en los que no alcanza con pelar el cable, simplemente. Donde termina la malla de tierra hay que arrollar cinta semiconductor en forma de cono, para repartir el efecto de borde y evitar chispas.⁹

● Aislantes orgánicos e inorgánicos

Por su relación con los organismos vivos y la antigua creencia de que sólo

⁷ Ese efecto de chisporroteo débil pero, permanente, se conoce como descargas parciales. Se las estudia –y se las trata de evitar– desde hace sesenta años. En un cable se admiten *descargas parciales* de hasta cinco picocoulomb.

⁸ Recordemos que la potencia eléctrica, en watt, se calcula como $P = U^2/R$, donde U es la tensión en volt, y R la resistencia, en ohm. La tensión de la batería de un coche es de 12 V; si se quiere una potencia de calefacción de 36 W, la resistencia de calefacción tiene que ser de 4 Ω .

⁹ La subestación transformadora Azopardo, que abastecía a más de un millón de habitantes en Buenos Aires, quedó destruida por completo en 1999, tres meses después de su inauguración. Se ha especulado que el siniestro se pudo deber a una confusión entre la cinta aislante y la conductora, usadas para empalmar cables de 132 kV.

ellos los podían producir, hoy se llaman materiales *orgánicos* los compuestos del carbono en general, con excepción de los carburos, los carbonatos y los óxidos. Por similitud de las uniones químicas, se incluyen entre los materiales orgánicos los compuestos del silicio del mismo tipo.

Por ejemplo, la glucosa, la celulosa, el polietileno, el ácido acético y la goma de silicona son materias orgánicas. En cambio el vidrio, el cuarzo, la cerámica, el aire y la vidia (carburo de tungsteno, titanio y molibdeno) son materiales inorgánicos, aunque algunos de ellos contengan carbono, o silicio.

En toda época, se usaron aislantes de las dos categorías, por ejemplo, cinta aisladora de tela de algodón impregnada en caucho natural, o gutapercha, que todavía se vende, y alambres de cobre estañados y aislados en goma y tela, encerados para que resbalen dentro de los caños. Para usarlos bajo los rayos del Sol, sin que se degradasen, se los cubría con plomo.¹⁰ Si hoy pedimos en una casa de electricidad cordón *símil plomo*, nos darán uno de apariencia idéntica a la del antiguo, pero, de plástico gris, estable ante la radiación solar. Esa clase de instalación, tan precaria, hoy está en desuso, y prohibida.

En media y alta tensión, los aislantes tradicionales eran inorgánicos: la porcelana y el vidrio, que todavía se usan. Hace 60 años no había otros materiales confiables, que sólo se pudieron desarrollar después de terminada la Segunda Guerra Mundial.

La porcelana es un material *cerámico*, es decir, que resulta de la cocción de tierras. Se fabrica con una arcilla muy fina y blanca, el *caolín*, con la que se hace barro, se le da forma, se lo seca y se lo cuece a temperaturas superiores a los mil grados. Cuando está bien hecha resulta compacta y sin poros, pero la porcelana igualmente se esmalta para su uso eléctrico. El color más común para los aisladores es el marrón oscuro, porque oculta las imperfecciones; por eso los más exigentes prefieren el blanco,¹¹ o el gris, para que se note menos en el paisaje.

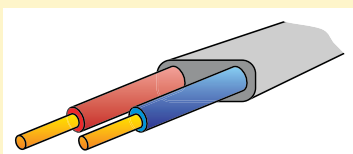
En la fabricación de aisladores eléctricos se tiende a un uso cada vez mayor de materiales orgánicos, muchos de ellos de invención reciente. Sigue un conjunto de términos técnicos relacionados con esa rama de la industria.

● Termoplástico

Un plástico es un material al que se puede dar forma. Si no se aclara otra cosa, se sobreentiende que se trata de un plástico sintético, resultante de la industria

¹⁰ Hoy se desalienta el uso del plomo, porque algunas de sus sales son tóxicas. En América y Andalucía todavía llamamos *plomeros* a quienes trabajan con instalaciones de agua, aunque usen caños de otro material.

¹¹ El blanco, además, es poco atractivo para los vándalos, porque el aislador queda del mismo color antes y después de que le hagan saltar el esmalte a pedradas, o con disparos.



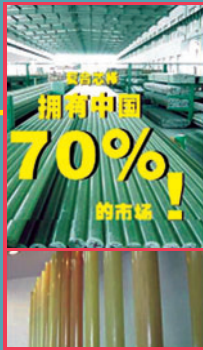
● Aislador inorgánico roto, de porcelana blanca esmaltada



● La artista plástica Marta Minujín, y una de sus curiosas esculturas de yeso. La palabra plástico significa relacionado con las formas.



- Aislador compuesto atacado por caca-túas tropicales. Sólo picotean los aisladores nuevos, quizá por el olor de la goma.



Traducción del chino:
"¡Abastecemos el 70%
del consumo!"

- Barras de resina epoxi reforzadas con fibras de vidrio, fabricadas por Golden Phoenix. Cuando se las cubre con fundas aletadas de goma, sirven de aisladores orgánicos de alta tensión.

química, y no, por ejemplo, del barro o del yeso que, también, son plásticos en el sentido primitivo del término. Un termoplástico es un plástico que se ablanda con el calor; se puede fundir, y volver a usar.

● Termorrígido

Un plástico termorrígido es el que, una vez polimerizado, ya no se ablanda con el calor, y no se puede fundir para reciclarlo. Es el caso de las resinas epóxicas.

● Polímeros

Un polímero es un material de moléculas muy grandes, formadas por otras menores, los monómeros. La unión de monómeros es la polimerización. Por ejemplo, el Poxipol® se vende en forma de monómero. Cuando se mezclan sus dos componentes, se polimerizan y queda un sólido. Su nombre químico es epoxi, o resina epóxica, un muy buen aislante eléctrico. Otros ejemplos de polímeros son el polietileno, el polivinilo, el poliuretano y el poliéster.

● Elastómeros

Reciben ese nombre los polímeros elásticos, entre ellos las gomas de silicona, algunas de cuyas variedades se pueden preparar con la mezcla de dos componentes.

● PRFV (plástico reforzado con fibras de vidrio)

Seguramente, este material es uno de los que más han hecho avanzar todas las ramas de la industria. Se hilan en caliente fibras de vidrio de diez micrones de diámetro, más finas que una tela de araña.¹² Con millones de esos hilos en paralelo, impregnados en epoxi para mantenerlos juntos, se hacen barras, llamadas de epoxi-vidrio, muy resistentes y de muy buena aislación.

Aparte de su uso eléctrico, Los plásticos reforzados con fibras de vidrio se usan

¹²Una tela de araña de cien micrones resiste cinco gramos de peso, lo que equivale a una resistencia a la tracción de 6.500 kg por centímetro cuadrado, comparable con la del acero. La resistencia a la tracción del vidrio hilado es, aún, mayor. Pero no es que el material en sí sea muy resistente; lo que realmente resiste es su superficie, tanto más extensa cuanto más finamente hilado esté el vidrio.

para hacer chapas acanaladas translúcidas para techos, toldos rígidos, protecciones de guardabarros, piletas de natación, bandejas, sillas y agujas de tejer.



- **Aislador de resina poliéster reforzada con fibra de vidrio (el material es semejante al que se usa para hacer piletas de natación). Con fines experimentales se lo mojó y se le aplicó alta tensión, hasta que saltaron chispas que carbonizaron la pieza.**

● Aisladores compuestos¹³

Estos aisladores se componen de un núcleo de epoxi-vidrio envuelto en una funda de goma aletada. Cuando llueve o se humedecen, las aletas aumentan la longitud de agua para que, aun, en esas condiciones provean una buena aislación.

● Comparación de propiedades de materiales eléctricos

El mundo está cada vez más poblado y crece la demanda de energía eléctrica de cada uno de sus habitantes. En las ciudades, apenas queda sitio para el tendido eléctrico. Los aparatos de distribución en media tensión (interruptores, fusibles, transformadores) tienen que ser cada vez más pequeños, y soportar condiciones de servicio más severas que antaño. Esa presión es tan intensa que, aún los profesionales más conservadores y apegados a lo que aprendieron en las etapas tempranas de sus vidas, estudios y prácticas profesionales, terminan aceptando los nuevos materiales, a veces, a regañadientes y con añoranza de las ventajas de los antiguos. Sigue un resumen comparativo para conductores y aislantes eléctricos.

● Conductores

Para fines de transmisión de energía y para igual corriente, el aluminio es más barato¹⁴ y liviano que el cobre; y en las aplicaciones de alta tensión los inconve-



- **Feliz combinación de cobre y aluminio para barras de alimentación eléctrica en grandes edificios. La corriente circula, principalmente, por el cobre, y parte por el aluminio que, con su gran superficie, ayuda a la disipación del calor.**

¹³En el ambiente eléctrico, a los aisladores compuestos de núcleo y envoltura les dicen aisladores poliméricos, o aisladores orgánicos, a pesar de que los de epoxi y los de polietileno también son orgánicos, y poliméricos.

¹⁴El mayor costo en la producción de aluminio no es el del mineral del que se lo extrae, ni el de su transporte, sino de la energía eléctrica que se utiliza para descomponerlo. El costo del aluminio fluctúa, entonces, junto con el de la electricidad.

nientes de empalme y resistencia de contacto se pueden resolver satisfactoriamente. Es ventajoso, también, en las instalaciones de grandes edificios e industrias, donde se lo usa en forma de barras. Pero sus empalmes requieren personal idóneo de instalación y mantenimiento.

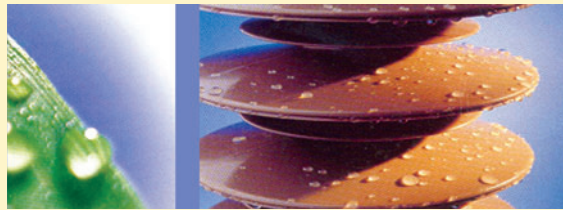
Para conductores de pequeño calibre es preferible el cobre, porque ocupa menos sitio, ahorra aislación y es fácil de unir a presión, y de soldar.

● Aislantes

Los cerámicos resisten bien la radiación solar; también, las chispas superficiales que se producen en los aisladores instalados cerca del mar, causadas por la niebla salina conductora. Están a salvo de la carbonización, porque carecen de carbono; no necesitan petróleo para su fabricación; los loros no los picotean y, en grandes cantidades, son muy baratos.

Pero, en su contra, son pesados y, como se hornean a más de mil grados, no se les puede poner piezas metálicas de fijación incorporadas. Sus bases y cabezas metálicas son muy grandes, y hay que pegárselas después con cemento. Son frágiles, y tientan a los vándalos.

En cambio, los aisladores de materiales orgánicos son livianos, admiten su fabricación en pequeñas cantidades, porque no requieren hornos grandes; resisten los golpes y disparos de armas; además los vándalos los ignoran, porque, cuando reciben un golpe, no estallan en mil pedazos como los aisladores de vidrio, ni marcan el acero con un cambio de color.



● **Epoxi hidrófoba desarrollada por Huntsman (ex Ciba-Geigy). Rechaza el agua, que no llega a conectar vivo y tierra.**

Aunque los aisladores de materiales orgánicos no son eternos como los de porcelana, soportan razonablemente bien el paso del tiempo. Hay variedades resistentes a la carbonización y, algunos, carecen, exteriormente, de carbono, porque están envueltos en goma de silicona. Como se los elabora a temperaturas no mucho mayores que 150 grados centígrados, admiten la colocación de piezas metálicas internas, electrodos, insertos y amarres.

Pero, en su contra, son combustibles; sus materias primas provienen del petróleo que empieza a escasear; no resisten altas temperaturas y el sol los desluce y los vaporiza, paulatinamente.



- Las bujías de coche se hacen con aislantes cerámicos. La porcelana resiste bien las elevadas temperaturas del motor de explosión, y aísla los 20 kV para las chispas de encendido.

● Cálculos de conveniencia

En el estudio de costos interviene, naturalmente, el precio del producto, la conductividad de un material conductor, la resistividad, si es un aislante; la densidad (de la que depende el peso de las piezas fabricadas), la duración, y el costo del mantenimiento, entre otros factores. Pero, a veces, el frío cálculo matemático no es del todo acertado, porque el mundo es más complejo que las ideas que nos hacemos de él.¹⁵

Hecha esa salvedad, consideremos este ejemplo simplificado:

• *¿en qué porcentaje se puede estimar la economía que brinda el uso del aluminio, con respecto al cobre, en el tendido de una línea de alta tensión?*

Respuesta

Sin considerar que el mayor grosor del cable facilita su enfriamiento y que, su menor peso permite ahorrar en torres y aisladores, y basados, solamente, en el propósito de hacer una línea de igual resistencia eléctrica, tenemos en cuenta que, para longitudes iguales, la relación de secciones es la inversa de la relación de conductividades.

De acuerdo con los datos de este capítulo, la sección de aluminio será igual al producto de la sección del cobre por el factor $0,58 / 0,37$.

Por otra parte, la relación de densidades es de 2,7 a 8,9. El nuevo peso, en consecuencia, será igual al producto del peso de cobre por el factor $(0,58 / 0,37) \cdot (2,7 / 8,9)$, que da 0,476. La línea de aluminio pesará menos de la mitad de lo que pesa la de cobre.

Por último, los precios de los metales están en la proporción 3 a 4, entonces, la relación de costos valdrá 0,3566. La economía es, por lo menos, del 64 por ciento.

PROPUESTAS DE ESTUDIO

6.1. ¿Qué se podría hacer para disminuir el vandalismo que afecta las instalaciones eléctricas aéreas, en casi todo el mundo?

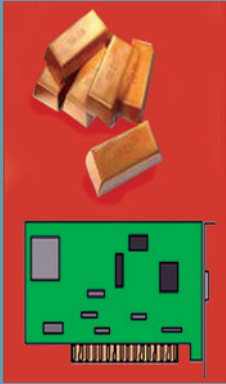
6.2. ¿Qué valor de sección transversal, en milímetros cuadrados, debería tener un

¹⁵Un profesor de luminotecnica del que sólo recordamos su apellido, Yepes, nos dio el problema de calcular en cuánto tiempo se amortizaría el costo de reemplazar las antiguas lámparas incandescentes que alumbraban el Puente Avellaneda, por otras más caras de sodio, pero que dan más luz y consumen menos energía. Obedientes, hicimos el cálculo y hallamos el resultado. El docente, además funcionario municipal, nos hizo ver con amabilidad que habíamos olvidado un factor crucial: el humano. Los destrozos causados periódicamente por los fanáticos daban por tierra con nuestras ecuaciones. Siempre brindaba su experiencia profesional en las clases.



- Arriba, transformador aislado en aceite contenido en una cuba de metal. Abajo, otro de aislación sólida de epoxi; pero su uso se limita a ambientes protegidos de la intemperie.





- La cantidad de oro que se utiliza para mejorar los contactos eléctricos de los circuitos impresos, es baja; y su costo, moderado.

alambre de aluminio para que su resistencia eléctrica sea la misma que la de otro alambre de cobre de la misma longitud? ¿Y cuál sería su diámetro?

6.3. Con los datos del capítulo 4, ¿a cuántos IACS equivale la conductividad del aluminio?

6.4. Los contactos de las plaquetas de una computadora pueden totalizar un área de veinte centímetros cuadrados y se los recubre con dos micrones de oro. ¿Cuánto vale el oro usado en una computadora? Un micrón es la milésima parte de un milímetro; la densidad del oro es de 19,4 gramos por centímetro cúbico, y una onza Troy (31,1034768 gramos) de ese metal vale mil dólares.

6.5. El diámetro de los alambres de cobre, y otros, se suele dar en milímetros, y también en AWG,¹⁶ el mismo número que se usa en joyería y *body piercing* para designar el calibre de los aretes.¹⁷ Más grande el número, más fino el alambre. Esa norma establece 44 diámetros o calibres: 0000, 000, 00, 0, 1, 2, 3,... 38, 39 y 40. El 0000 corresponde a 0,46 pulgadas; el 39, a 0,005 pulgadas; y el resto se distribuye de modo que la relación entre dos calibres consecutivos sea la misma para todos. Con esos datos, calculen qué calibre AWG tiene un alambre de un milímetro de diámetro. Una pulgada equivale a 25,4 milímetros. *(Pueden tomarse el hermoso trabajo de deducir la fórmula, o copiarla de algún lado.)*

• Otras fuentes de estudio e información

Sugerimos buscar en Internet con las palabras cobre, aluminio, elastómeros, alta tensión, superconductividad y levitación magnética (hay vistosos vídeos, con trenes de verdad y modelos pequeños).

http://imagenes.mailxmail.com/cursos/imagenes/7979_12_2.jpg

- Fotografía infrarroja de una línea aérea, en la que los cables tibios se ven luminosos.

<http://www.kr2-egb.com.ar/anodizado.htm>

- Instrucciones caseras para anodizar aluminio.

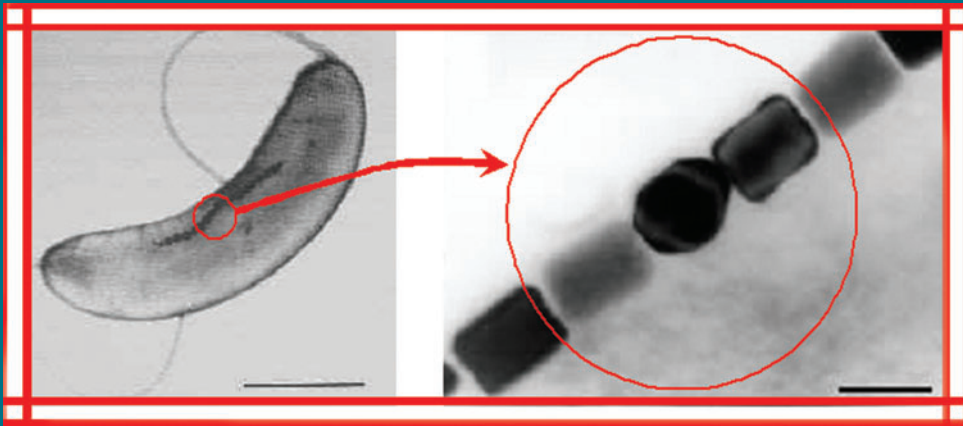


- Calibre, o galga, para medir diámetros de alambres, y espesores de chapas.

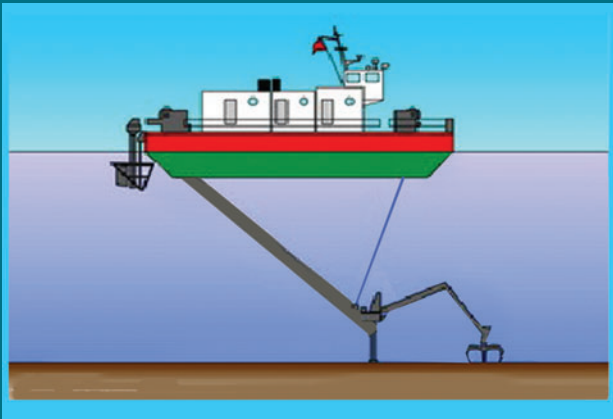
¹⁶ *American Wire Gauge*, calibre estadounidense de alambres.

¹⁷ La influencia de la industria británica y estadounidense se extiende a muchas unidades de medida, todavía usuales en la Argentina. Por ejemplo, compramos la madera en metros de largo, pero en pies de ancho y pulgadas de espesor; la capacidad de las heladeras se da en pies cúbicos; su potencia de enfriamiento en BTU (unidades térmicas británicas) por hora; medimos la presión de los neumáticos en PSI (libras por pulgada cuadrada); el oro se pesa en onzas Troy; y el diámetro de los tornillos y la diagonal de las pantallas se expresa en pulgadas. Es bueno usar las unidades internacionales, que coinciden con las legales argentinas; y también conviene conocer las otras unidades.

Magnetostática



● Bacterias *magnetotáticas*, que sintetizan imanes microscópicos en su interior, llamados *magnetosomas*. Son las brújulas más chicas del mundo, y las descubrió el estudiante graduado Richard P. Blakemore, cuando era investigador auxiliar en microbiología, en 1975. La componente vertical del campo magnético terrestre sirve a esos organismos para distinguir el arriba del abajo, y así sumergirse para huir del oxígeno, cuyo exceso los mata.



● Se han sembrado esos microbios en lechos de ríos contaminados con cromo, cobalto y otros metales insalubres, que las bacterias ingieren y convierten en imanes. Se multiplican hasta agotar su alimento, y después se las extrae con grúas magnéticas. Con ese barro se hacen ladrillos, para que los materiales tóxicos ya no se disuelvan. El río queda más limpio.

Magnetostática

Si nos preguntaran, por casualidad, si llevamos con nosotros algún imán, probablemente diríamos que no, pero que, en casa, sí tenemos muchos, en alfileres, señaladores, carteles adhesivos de servicios a domicilio y, por supuesto, multitud de ellos (algunos con forma de zanahoria) pegados a la heladera. Sin embargo, es casi seguro que llevemos varios imanes con nosotros; uno en el parlante del celular, y dos en los audífonos¹ si acostumbramos a usarlos. Y si tenemos una radio con parlante, hay ahí un cuarto imán, sin contar alguna brújula pequeña que usemos de llavero o, hasta hace poco, cintas y discos magnéticos; y a la propia Tierra, que aunque no la llevemos encima, la tenemos a mano, y se comporta como un imán. Los imanes naturales y artificiales tienen muchas aplicaciones útiles, y se los usa desde tiempos tan antiguos, que no los registra la memoria escrita.

La palabra imán proviene, quizá, de “*pierre aimant*”, en francés piedra amante, porque no se separa del hierro. Los viajeros contaban que en Magnesia,² una región del Asia, había en el suelo un mineral negro, que después se llamó *magnetita*, cuyas partículas se adherían a los clavos de hierro de las botas. Una antigua historia china, parecida a la de Romeo y Julieta, cuenta de un joven que visitaba en bote clandestinamente a su amada, guiado en la niebla por una piedra que ella le había regalado, y que apuntaba siempre hacia la estrella de la que supuestamente había caído.

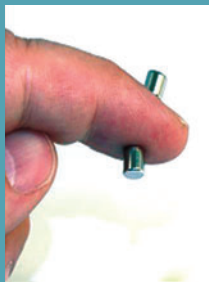
Primitivamente se usaron imanes naturales de magnetita, y después de acero.

Desde mediados del siglo XX, y hasta hoy, se los hizo de cerámicas; y actualmente, hay nuevos materiales de propiedades magnéticas mucho más marcadas.

● Grabado de *Sobre los imanes*, de William Gilbert. Los herreros del siglo XVI sabían que si se golpea un trozo de hierro orientado de norte a sur, se imanta. (Septentrio y avster significan norte y sur en latín).



- Brújula de campaña militar que usó Shih Huang Ti, el primer emperador de la China, en el siglo III a.C. El brazo del muñeco apunta siempre hacia el sur.



- Imanes muy fuertes de neodimio, hierro y boro, desarrollados en 1983 por Metales Especiales Sumitomo, en el Japón, y por General Motors, en los Estados Unidos.

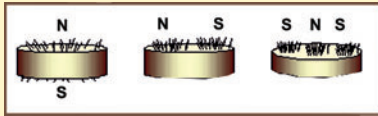


¹ Se comprueba que los auriculares tienen imanes, porque cuando acercamos uno al otro, se atraen o se rechazan, según su posición; además, colgados, sirven de brújulas. (La palabra brújula significa caja pequeña. En ella se guarda una aguja imantada que puede girar libremente sobre un pivote, o en un flotador.)

² Magnesia es el nombre de una antigua ciudad, fundada, según la leyenda, por el semidiós Magnes, que quizá signifique el Grande. De ahí proviene el nombre de la magnetita, o piedra imán, y de la magnesia, un óxido metálico del que se obtiene el magnesio.

● Polos

En un imán, los *polos* son las zonas donde se manifiestan las fuerzas más intensas y donde se acumulan pelusas, limaduras y objetos pequeños de hierro que hayan resultado atraídos. Si hay sólo dos, se comprueba que si el imán cuelga de un hilo, se orienta con una de esas zonas hacia el norte y la otra hacia el sur; y así se nombran sus polos. Pero después se notó que, como en la electricidad, los polos del mismo nombre se rechazan, mientras que los opuestos se atraen. Pero en vez de enmendar la costumbre de llamar polo norte al que apunta al norte, hoy se prefiere decir que en el Polo Norte de la Tierra hay un polo sur magnético, y viceversa.



● Un imán tiene al menos dos polos opuestos, pero pueden existir más polos, en cantidades pares o impares; iguales o diferentes.

No existen los polos magnéticos únicos o aislados; en cambio, sí hay cargas eléctricas aisladas de una misma polaridad.

● Propiedades magnéticas de la materia

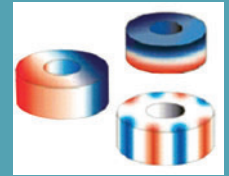
La explicación de las fuerzas magnéticas, entre los materiales, corresponde a la física cuántica y se relaciona con la cantidad de electrones que hay en cada capa que rodea el núcleo de un átomo, y con el movimiento de esos electrones.

Se llaman *ferromagnéticos* los materiales cuyo comportamiento es semejante al del hierro. Esos materiales se atraen³ con los imanes, y separados de estos, mantienen algún grado de magnetismo, o sea, que se pueden convertir en imanes permanentes. Son ferromagnéticos el hierro, el cobalto, el níquel,⁴ el gadolinio, el disprosio, y muchas aleaciones en las que forman parte esos metales.

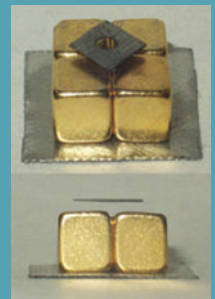
Reciben el nombre de *paramagnéticos* los materiales que se atraen con los imanes, pero no entre sí, a menos que haya un imán cercano. No retienen el magnetismo. Son paramagnéticos el aluminio, el magnesio, el titanio, el wolframio y ciertas aleaciones de hierro.

³ Decimos se *atraen* con los imanes, y no que *son atraídos* por ellos, para recordar la ley de acción y reacción de Isaac Newton. Si un cuerpo atrae a otro, resulta atraído por él, y con una fuerza igualmente intensa. Los dibujos animados muestran personajes que extraen un imán del bolsillo y atraen con ellos al instante yunques y locomotoras, mientras que a los imanes no les pasa nada. Esas escenas son humorísticas, y no pretenden representar la realidad.

⁴ Los nombres del níquel y el cobalto se deben a que fueron muy difíciles de separar del hierro. En alemán, *kobold* significa duende; y *níquel*, endiablado.



● Imanes de la misma forma, pero de diferentes distribuciones y cantidades de polos.



● Grafito *pirolítico*. Ese material, de una variedad especialmente diamagnética, se mantiene suspendido sobre imanes fuertes. Pirolítico significa obtenido con altas temperaturas.



- Un accidente que ocurre en la industria, cuando por descuido no se usan anteojos de protección, es la entrada de una partícula en el ojo. Cuando es de hierro, el oftalmólogo la puede extraer con un imán.

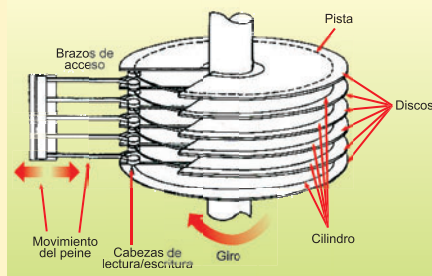


- Curioso comportamiento de una suspensión de partículas de hierro, cobalto y níquel, de un tamaño de un centésimo de micrón cada una, en un medio líquido. Cuando se aproxima un imán, las partículas se magnetizan y se agrupan. Si se retira el imán, se comportan como un líquido común. El material es paramagnético, a pesar de que para esos metales la temperatura ambiente es mayor que la de Curie.

Los materiales *diamagnéticos* son los que se repelen con los imanes, por ejemplo el bismuto, el cloruro de sodio, el cobre, el oro, el silicio, el germanio, el grafito, el azufre, el hidrógeno y los gases nobles.

Los casos de diamagnetismo que hoy conocemos corresponden a fuerzas muy débiles, que sólo se observan en condiciones de laboratorio, o muy cuidadas.

Las propiedades magnéticas de los materiales se aprovechan con diversos fines. Una de las aplicaciones más difundidas es, hoy, el almacenamiento de datos en los discos rígidos⁵ de las computadoras. Como están hechos con materiales ferromagnéticos, retienen el magnetismo; y con él, los datos. Aunque se lo nombra en singular, un disco rígido está compuesto por varios discos apilados, que giran en bloque a 7.200 revoluciones por minuto. Cada lado del disco se puede grabar y leer, como una antigua cinta de audio, con igual cantidad de cabezas lectoras y grabadoras compuestas por diminutos electroimanes, o sea trozos de hierro rodeados de bobinas por las que circulan pulsos de corriente. Los datos se almacenan en zonas físicas llamadas *sectores*, cada uno de los cuales pertenece a una pista *circular*. Un conjunto de pistas de igual diámetro es un *cilindro*.



Un antiguo disco flexible cuadrado de 1,44 MB (Mbyte) tiene dos lados, 80 cilindros y 18 sectores por pista, cada uno de los cuales almacena 512 byte, octetos o caracteres. Un disco rígido puede tener más de diez caras, e igual cantidad de cabezas lectoras y grabadoras; miles de pistas en cada cara; y más de cien sectores por pista, en los que almacena, en total, varios miles de millones de bits, o unidades de información, cada una de las cuales tiene un tamaño aproximado de un micrón.

● Temperatura de Curie

La temperatura de un cuerpo se puede relacionar con el estado de agitación de las partículas que lo constituyen. Por ejemplo, a cero grado Kelvin, o absoluto, las partículas están idealmente inmóviles; y a la temperatura ambiente, la velocidad de una molécula de nitrógeno del aire es de centenares de metros por segundo.

El magnetismo de un material resulta de la acumulación de los efectos magnéticos de todas las partículas que lo componen. Si éstas alcanzan un grado de agitación suficiente, se desordenan, y el magnetismo conjunto de sus átomos se

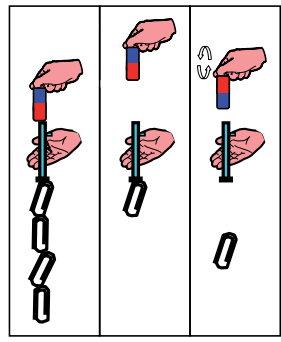
⁵ El nombre *rígido*, que en España es *duro*, distingue ese dispositivo de almacenamiento de datos, de otros que están prácticamente en desuso: los discos flexibles, o floppies.

pierde. Esa temperatura, llamada de Curie, en honor del investigador francés Pierre Curie (1859–1906) es diferente para cada material; la del hierro es de 770 °C.

Cuando alcanzan la temperatura de Curie, los imanes permanentes pierden su ferromagnetismo, y se tornan paramagnéticos.

● Inducción magnética

En el lenguaje llano *inducir* es persuadir, ocasionar, conseguir que alguien haga algo. En electricidad y magnetismo ese término tiene casi el mismo significado. Tal como existe una inducción electrostática (detallada en el capítulo 1), por la cual se puede cargar un cuerpo, inicialmente neutro, al acercarle otro cargado, es posible magnetizar un cuerpo al aproximarle un imán, aunque ese objeto pueda perder su magnetización casi por completo cuando el imán se aleja.

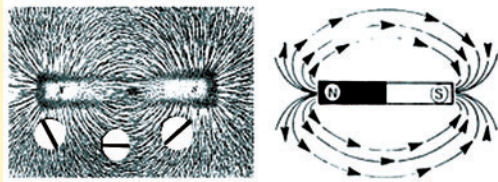


- El clavo, normalmente, no atrae los clips, pero sí lo hace cuando se le acerca una barra imantada. Cuando se aleja ese imán, el clavo deja de atraer los objetos, aunque no pierde del todo su magnetización. Para que la pierda, es necesario invertir el imán y acercarlo un poco.

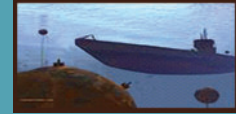
● Representación del campo magnético

Primitivamente, se llamaba *campo magnético* cualquier región del espacio en la que se manifestarán fuerzas magnéticas. Pero desde 1905, cuando Albert Einstein publicó su trabajo *Sobre la electrodinámica de los cuerpos móviles*, esa idea se modificó.⁶

El campo hoy no se considera, simplemente, un lugar del espacio, sino un objeto tan real como cualquiera, en el sentido de que tiene masa, y puede



⁶ Zur Elektrodynamik bewegter Körper, Annalen der Physik, 17, 891-921 (1905) (*Sobre la electrodinámica de los cuerpos móviles*, A. Einstein, Anales de Física 1905).



- En la Segunda Guerra Mundial se usaron minas submarinas que estallaban cuando las chocaban los barcos. Pero las minas magnéticas explotaban sin contacto. El campo terrestre induce magnetismo en los barcos, y éstos movían una brújula dentro de la mina, que conectaba el detonador. (Hay medios de neutralizar ese efecto.)



- El *paleomagnetismo* estudia las variaciones del campo magnético terrestre en la historia geológica. Para ello se toman muestras de minerales de épocas conocidas, y se determina en qué orientación fueron inducidas. Se sabe así que los polos magnéticos de la Tierra intercambiaron sus polaridades muchas veces; la última hace medio millón de años.

existir, independiente de que hayan o no cuerpos que se atraigan o se repelan.⁷

Cuando se coloca una brújula en las proximidades de un imán, se orienta de acuerdo con la intensidad relativa de la atracción entre el polo norte del imán y del polo sur de la brújula, y las demás combinaciones de atracción y rechazo. La orientación de la brújula, en cada punto, define la dirección de la *línea de campo* local. Lo mismo se consigue si se espolvorean las proximidades del imán con limaduras de hierro, o con pelusa de lana de acero.

Esa útil representación ideada por Michael Faraday⁸ sirve para apreciar la intensidad del campo magnético, por medio de la cantidad de líneas que atraviesan una dada superficie. En la figura anterior se ve que las líneas son más densas en las proximidades de los polos, precisamente, donde las fuerzas son mayores.

Las líneas de campo no existen realmente donde se las dibuja; son sólo una representación; hay también campo magnético entre dos líneas consecutivas. No importa con cuántas líneas se represente un campo, siempre se pueden imaginar líneas intermedias, indefinidamente. Comprobamos eso si esparcimos polvo de hierro, o fragmentos de lana de acero, sobre un papel colocado encima de un imán: difícilmente hallemos una línea entera de partículas encadenadas que una ambos polos; se forman cadenas orientadas en cualquier punto.

● Materiales magnéticos industriales

En el ambiente eléctrico se suelen emplear las palabras *blandos* y *duros* para clasificar algunos materiales magnéticos; pero esas palabras no se refieren a la dureza mecánica. Un material duro es el que conserva el magnetismo y, por eso, es apropiado para fabricar imanes permanentes, por ejemplo para altoparlantes, motores, discos rígidos y otras aplicaciones. Uno blando es el que no retiene el magnetismo, propiedad útil para hacer transformadores, cabezas grabadoras y reproductoras, porteros eléctricos y grúas magnéticas.

Los nombres “blando y duro” se justifican en que los primeros materiales magnéticos de importancia industrial fueron los aceros, y se da la coincidencia de que los más duros y templados son los que más sirven para hacer imanes permanentes.

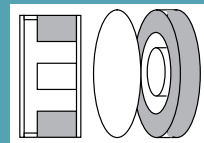
Los metales pueden tener una estructura cristalina, en la que los átomos están, regularmente, orientados como las naranjas en una frutería. Pero ese orden no abarca más que regiones pequeñas, llamadas *granos*, visibles sólo al microscopio. Los diferentes granos tienen cada uno su propia orientación, y las del conjunto de granos están dispuestos al azar.

⁷ Por ejemplo, cuando una estación de radio deja de transmitir, sus ondas siguen existiendo durante algunas fracciones de segundo en la Tierra, y quizá durante muchos años en el espacio.

⁸ En el capítulo 1 se encuentra información sobre este investigador.



- Transformador de 220 a 110 V de núcleo de hierro-silicio de grano orientado. Si fuera de hierro común, sería más grande y pesaría más del doble.



- Vista en corte de un audífono. Tiene una bobina arrollada alrededor de un núcleo de hierro, una espaldita del mismo material, un anillo de imán permanente, y una lámina delgada de hierro que vibra cuando la corriente que pasa por la bobina altera la magnetización. El imán permanente es de ferrita.



- Relevador de lengüeta, más conocido como *reed relay*. Cuando se le acerca un imán, se tocan dos láminas, una de ellas flexible, de material paramagnético. Se los usa en puertas de hornos de microondas, y en alarmas contra intrusos. También actúa cuando se hace pasar corriente por una bobina arrollada sobre él.

ADVERTENCIA: *ES PELIGROSO ANULAR, CON UN IMÁN EXTERIOR, ESTA PROTECCIÓN DE LOS HORNOS DE MICROONDAS.*

- El **hierro-silicio de grano orientado** es el material magnético que más se emplea hoy en la industria. Se lo usa en el armado de generadores, transformadores y motores eléctricos. Se lo hace con una aleación en la que intervienen, principalmente, el hierro y el silicio, pero cuando se lo estira en láminas, en caliente, sus granos se orientan en la dirección de la laminación, y eso refuerza sus propiedades magnéticas.
- La **ferrita**, conocida también por su nombre en inglés, *ferrite*, es un material cerámico compuesto por hierro y sus óxidos, bario, estroncio, molibdeno, y otros elementos no metálicos, como el boro. Se la prepara en forma de polvo fino compactado a presión y después horneado como una porcelana. Hay ferritas de varios tipos, tanto para hacer imanes permanentes como para fabricar objetos que se deban desmagnetizar. Después del hierro-silicio, las ferritas son hoy los materiales magnéticos más usados. Las podemos ver en audífonos, altoparlantes, imanes domésticos, en los transformadores de artefactos fluorescentes alimentados con baterías, en adaptadores de antena de TV, y en el abultamiento que tienen algunos cables de impresoras y computadoras, donde se coloca un anillo de este material para interceptar las interferencias.
- Una variante de las ferritas son los **imanes de goma**, que se fabrican con la incorporación de los mismos polvos a un elastómero. Este material se usa para hacer burletes flexibles para las puertas de las heladeras, y anuncios para adherir a muebles de hierro. Se los fabrica de modo que los polos norte y sur quedan del mismo lado, en forma de surcos alternados paralelos.

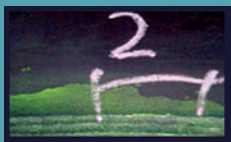


- Anuncios para adherir a muebles de hierro, con muchos polos sur y norte alternados. A la izquierda, polos revelados con polvo de hierro. A la derecha, dos anuncios que se atraen y se rechazan, alternadamente, cuando se los desliza enfrentados.

Eso se comprueba si se exploran esos imanes con una aguja de coser colgada de un hilo, o bien con una brújula; o más fácilmente, si se desliza uno de esos anuncios sobre otro igual. Si enfrentamos los reversos de dos de esas tarjetas y las deslizamos entre sí en la dirección correcta, se separan y se juntan rítmicamente a la vez que se oye el ruido de los choques: tap-tap-tap... (o trrr... si el movimiento es más veloz), cada vez que sus bandas de polaridad alternada se enfrentan con polos iguales u opuestos.

Estos materiales son una variante de las cintas magnéticas de audio y de vídeo, que aún se usan, especialmente, para el resguardo de rutina de datos informáticos.

- El **metal mu**, más conocido como mu metal, como se le dice en inglés, es una ale-



- En la parte inferior de la figura se aprecia una fisura de menos de un micrón de ancho, detectada en una pieza de acero por medio de una suspensión líquida de polvo magnético.

ación de níquel, hierro, cromo y molibdeno. Es un material altamente magnetizable (técnicamente se dice que tiene elevada *permeabilidad*). Deja pasar las líneas de campo magnético ochenta mil veces mejor que lo que lo hacen el aire o el vacío. Su nombre proviene de la letra griega con la que se designa la magnitud física permeabilidad magnética. Una aleación de propiedades semejantes es el *permalloy*⁹ o aleación permeable, de hierro y níquel, pero menos dúctil que el metal mu.

- Hay *líquidos magnéticos*, en realidad suspensiones de polvo magnético en líquidos, que se emplean para detectar fisuras invisibles en piezas de acero. Se pintan las piezas con ese líquido, se las somete a un campo magnético; y donde hay una fisura, el campo se dispersa, atrae las partículas de la suspensión, y con eso se revela el defecto. (Esa inspección es un *END*, o ensayo no destructivo).
- En algunos centros de investigación se desarrollan materiales magnéticos para emplearlos en refrigeración, en reemplazo de los sistemas convencionales de compresión de gases.¹⁰ Se magnetiza el material con un imán o un electroimán, El material, con eso, eleva su temperatura. Se espera a que se enfríe. Se lo pone en otro sitio, se le quita el magnetismo, y el material se enfría. Quizás algunas heladeras del futuro enfríen con una cinta de goma magnética sinfín, que pase frente a un imán, y después por el gabinete del refrigerador. El fenómeno se conoce como *demagnetización adiabática*.

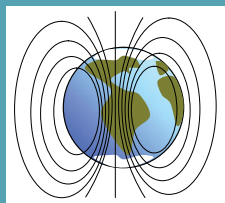
● Magnetismo en biología

Tal como había ocurrido antes con la electricidad animal, las hipótesis de existencia de órganos magnéticos en los animales tropezaron con cierta resistencia en los medios científicos, en los que no caen bien las ideas emparentadas con supersticiones o creencias infundadas, aunque sean, ocasionalmente, verdaderas. Por eso, el descubrimiento que afirma que hay bacterias que sintetizan magnetita, realizado en 1975 por Richard P. Blakemore en la universidad de Massachusetts, tuvo una gran importancia, porque reabrió vías de investigación casi abandonadas. En los diez años que siguieron se descubrió la misma sustancia en moluscos, aves y hasta en mamíferos como los delfines y se comenzó a pensar con seriedad científica que pueden haber varias especies capaces de orientarse en el campo magnético terrestre.

La observación inicial, al microscopio, fue que las bacterias se amontonaban

⁹ Quizá la proliferación de palabras inglesas en la industria se deba ver no tanto como la invasión de un idioma extranjero, sino como la aparición de una nueva lengua internacional, en el ámbito de la tecnología y de la ciencia, como lo fueron el griego y el latín en todo el mundo hace pocos siglos, para el mismo fin de comunicación universal.

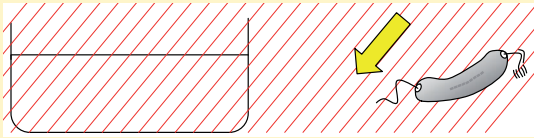
¹⁰ Algunos gases de refrigeración pueden contribuir a la destrucción de la capa de ozono de la alta atmósfera, que nos protege de la radiación ultravioleta.



- El campo magnético terrestre es vertical en los polos, horizontal en el ecuador, e inclinado en las demás localidades.

en un borde de una gota de agua, y las primeras explicaciones de ese efecto fueron que los microbios respondían a la luz, a contaminantes químicos o a diferencias de espesor de agua entre los vidrios del portaobjeto. La aproximación de un imán dispuso toda duda y motivó el examen de las bacterias con un microscopio electrónico. El estudio de las partículas de magnetita que sintetizan mostró que su tamaño, de apenas mil átomos de diámetro, es el de mayor eficiencia magnética.

¿Para qué le sirve a un microorganismo orientarse en el campo terrestre, si tiene una vida tan breve, y un desplazamiento tan lento, que no podría aprovechar esa orientación para migrar? Eso es difícil de entender para nosotros, que navegamos horizontalmente y olvidamos, habitualmente, la componente vertical¹¹ del campo magnético terrestre.



● **Las bacterias anaeróbicas nadan en cualquier dirección, y les conviene hacerlo hacia abajo, donde el ambiente acuático es pobre en oxígeno. Su tamaño es tan pequeño, que no les servirían órganos como los humanos, basados en la gravedad, para la orientación espacial.**

Cada vez que se invierte el campo terrestre, lo que ocurre de manera errática en decenas de miles de años, y hasta en centenares de millones, se produce una gran mortandad de esta clase de bacterias, porque nadan al revés de como les conviene. Las escasas sobrevivientes que por alguna razón tengan su polaridad invertida (y que por eso sean escasas), después proliferan en esas nuevas condiciones más favorables para ellas, hasta llegar a ser la gran mayoría.

El caso de las palomas es algo diferente y más complejo porque, al parecer, aprenden durante su vida a ajustar sus costumbres al campo magnético actual.¹²

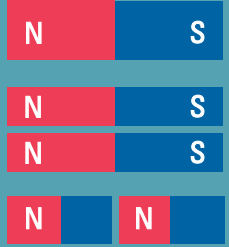


● **La orientación geográfica de las aves es hoy motivo de estudio, y parece depender de factores múltiples, entre ellos el visual y el magnético.**

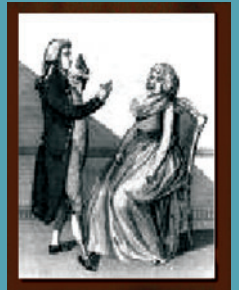
En las palomas se halló magnetita en la parte superior del pico. Sin embargo, en experimentos en los que les ataron fuertes imanes, cuya inducción local era mucho mayor que la del campo terrestre, parecieron seguir igualmente bien orien-

¹¹Las agujas de brújulas que se pueden mover en cualquier dirección, se inclinan; y en los polos, se paran de punta.

¹²Quizá los repetidos vuelos en círculos que hacen las palomas los días soleados, a la mañana temprano y al caer la tarde, les sirvan para ajustar las sensaciones magnéticas que pudieran tener, con la percepción visual del Sol cerca del horizonte, una indiscutible referencia para la orientación geográfica.



- Si se corta un imán a lo largo, las partes que resultan se rechazan, por tener los nuevos polos del mismo lado. Si se lo corta transversalmente, las partes se atraen, porque resultan polos enfrentados de polaridades opuestas. Así, a lo ancho, se dividen las bacterias cuando se reproducen, por lo que sus polaridades magnéticas resultan hereditarias.

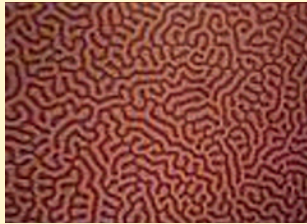


- Franz Mesmer (1733–1815) popularizó el término magnetismo animal, hoy llamado *mesmerismo* para distinguirlo de lo realmente magnético. En medios científicos se lo consideró curandería.

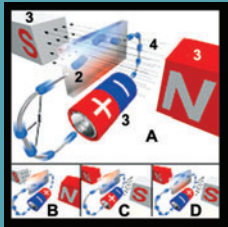
tadas en sus vuelos. Por eso se especula que esos animales no se guían solamente como brújulas sino que, además, sentirían las tensiones eléctricas que generan al desplazarse en el campo magnético terrestre cuando vuelan a gran velocidad. Los imanes que llevan no influirían en ese efecto, porque se desplazan junto con las aves; entonces, no inducen electricidad, como sí lo hace un generador cuyos conductores se mueven con respecto a los imanes. Las investigaciones no son aún concluyentes y parecen mostrar que la orientación de las aves no recurre a un único órgano.

● Teoría magnetostática y la de la inducción

Se llama *espín* (del inglés *spin*, giro) a una propiedad de cada partícula atómica que, por sus efectos, se puede interpretar como si estuviera girando, y que en las partículas cargadas se asocia además a un efecto magnético individual, llamado *dipolo*, porque nunca hay un polo magnético aislado. Cuando en una región predominan los dipolos orientados en la misma dirección y en el mismo sentido, el material presenta propiedades ferromagnéticas. Y si los dipolos elementales no están orientados, pero se orientan en presencia de un campo magnético exterior, se trata de un material paramagnético.



● **Dominios magnéticos en un cristal de hierro, revelados con una suspensión líquida de finas partículas magnéticas (el líquido oscuro). Cuando no se aplica un campo magnético, la suspensión permanece cubierta por otro líquido que no es magnético (el claro). A los pocos segundos de aplicar el campo, se produce ese complejo diseño. Cada surco mide, aproximadamente, un micrón.**



● Esquema del efecto Hall, tomado de Wikipedia. Los electrones que se mueven en el conductor, impulsados por la energía de la pila, reciben fuerzas del campo magnético, y se desvían a un lado. Por tanto, como ahí hay más electrones que enfrente, aparece un campo eléctrico que se puede medir, y por medio de él evaluar la intensidad del campo magnético.

El investigador francés Pierre Weiss (1865–1940) notó que los materiales ferromagnéticos están organizados en *dominios*. Un dominio es una región en las que los dipolos elementales, o átomos, están orientados en la misma dirección y sentido. Si los dominios, a su vez, están orientados al azar, el cuerpo en su conjunto no exhibe magnetismo neto.

La teoría de dipolos y dominios es la que se acepta, actualmente, para explicar muchos fenómenos magnéticos, y para el desarrollo de proyectos industriales.

● Efecto Hall

Ese fenómeno, llamado así en honor de su descubridor en 1879, Edwin Dun-
tey Hall, consiste en la aparición de una tensión eléctrica entre los bordes de un

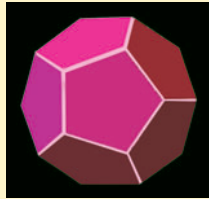
conductor por el que circula corriente, cuando se lo somete a un campo magnético perpendicular. En 1985 se desarrollaron materiales en los que se observa el llamado efecto Hall *cuántico*, mucho más intenso que el descubierto inicialmente. Ese principio se aplica a los sistemas de encendido de chispa de los coches, en los que un sensor Hall detecta el paso de un imán fijo al eje del motor. Ese método es más confiable que el de los antiguos platinos. Carece de elementos que se desgasten, o que dejen de funcionar cuando se mojan.

PROPUESTAS DE ESTUDIO

7.1. ¿Hay alguna relación entre la palabra imán, y los religiosos musulmanes que dirigen los rezos en las mezquitas?

7.2. ¿Tiene fundamento científico el uso de imanes que venden para colocar en los caños de agua y en los de nafta en los coches, para evitar las incrustaciones y mejorar el rendimiento del combustible?

7.3. ¿Por qué los imanes que se suelen poner en las puertas de las heladeras para sostener recordatorios, o de adorno, tienen los polos del mismo lado?



7.4. Si armáramos un dodecaedro con doce pirámides de base pentagonal, cada una de las cuales es un imán con el polo sur en el vértice y el norte en la base, ¿obtendríamos un imán con un solo polo norte hacia afuera, y sin ningún polo sur? ¿Obtendríamos así el tan buscado –y jamás hallado– monopolo magnético?

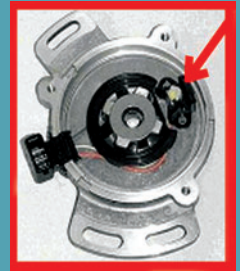
7.5. ¿Por qué un audífono colgado de su propio cable, no sirve de brújula?

7.6. Para magnetizar un trozo de hierro, ¿hay que frotarlo con un imán?

• Otras fuentes de estudio e información

Sugerimos buscar en Internet con las palabras Blakemore, bacteria, ferromagnetismo, paramagnetismo, diamagnetismo, Taringa: imanes fuertes. Abundan los vídeos con demostraciones vistosas.

En <http://www.scribd.com/doc/7100742/010-Materiales-Magneticos> hay un buen artículo sobre materiales magnéticos de Juan C. Fernández, Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires.



- Sensor de efecto Hall, que detecta el paso de cuatro imanes sujetos a un eje giratorio. En esos instantes precisos, el dispositivo envía pulsos de control a un circuito que genera chispas para las bujías de un coche.



- Efecto de los imanes en la pantalla de un televisor.

ADVERTENCIA. SI LA PANTALLA QUEDARE CON COLORES DEFINITIVOS, APARENTEMENTE ARRUINADA, SE LA PUEDE DESMAGNETIZAR CON UN ELECTROI-MÁN ALIMENTADO CON CORRIENTE ALTERNA (MÁS LABORIOSO ES GIRAR UN IMÁN MIENTRAS SE LO ALEJA DE LA PANTALLA.)

Inducción electromagnética



- Horno experimental de inducción. Por el caño de cobre circula una corriente alterna de 100 ampere, y de más de 200 kilociclos por segundo.

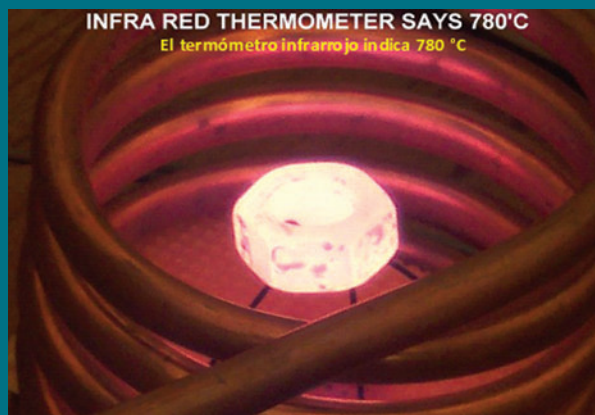
El tornillo y la tuerca de hierro se magnetizan repetidamente hacia un lado y el opuesto, a la misma frecuencia, proceso en el que el hierro se calienta.

Se alcanzan 770 grados centígrados; la temperatura de Curie de ese metal, y a la que pierde sus propiedades ferromagnéticas.



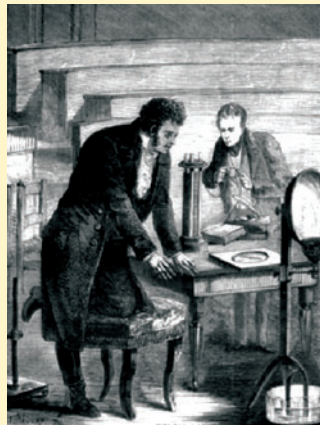
- A todo eso, el caño de cobre permanece apenas tibio.

Con la misma técnica se hacen hornallas de inducción para cocinas. Son frías al tacto, pero generan calor en las ollas y sartenes de hierro. El aceite que cae sobre la hornalla, no se enciende.



Inducción electromagnética

Hemos visto que la proximidad de un imán magnetiza otros cuerpos; a ese efecto se lo llama *inducción magnética*. En la *inducción electromagnética*, en cambio, son las corrientes eléctricas las que generan campos, e inducen magnetismo.¹



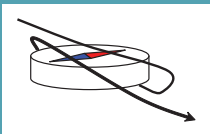
La electricidad y el magnetismo se creían independientes y el científico danés Hans Christian Oersted (1777–1851) hacía en sus clases experimentos para demostrarlo. Cruzaba sobre una brújula un alambre, al que le hacía circular corriente, y la aguja permanecía inmóvil. Pero un día un alumno repitió la prueba con la aguja de la brújula ya previamente alineada con el alambre. ¡Y la aguja se puso perpendicular! La sorpresa de Oersted, cuando vio que las corrientes eléctricas generan magnetismo, quedó registrada en la historia.²

Y el magnetismo ¿genera electricidad? La respuesta es afirmativa; pero no por la presencia de un campo magnético, sino por la *variación* de ese campo. Si ponemos un imán junto a un conductor, no aparece tensión eléctrica entre sus extremos, pero sí lo hace si movemos el imán, o el conductor; uno cualquiera de ellos con respecto al otro.

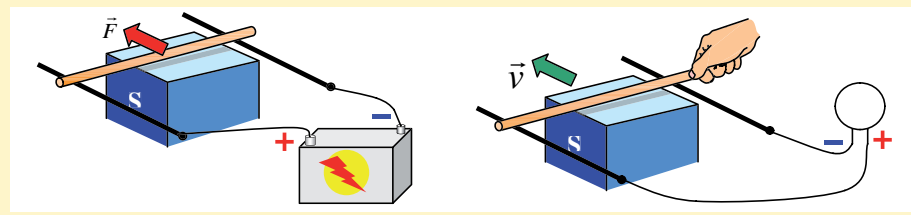
Los dos efectos recíprocos mencionados se resumen en dos leyes que vinculan la electricidad con el magnetismo; son el principio generador, y el principio motor.



- La aguja de la brújula, perpendicular al alambre, permanece inmóvil cuando se hace circular corriente. Pero si se alinean previamente, cuando circula corriente por el alambre, la aguja se cruza.



- Si el mismo alambre por el que circula corriente, se hace pasar dos o más veces junto a la brújula, la intensidad del efecto de orientación se multiplica. Así se inventó la bobina.



¹ El descubrimiento de que las corrientes tienen efectos magnéticos, sugirió que las propiedades magnéticas de la materia se relacionan con el movimiento de cargas eléctricas en el material; hoy sabemos que son los electrones.

² El método científico, lejos de ser una herramienta segura y objetiva en la obtención de conocimientos, está sujeto (como muchas otras actividades sociales) a circunstancias, recursos e intereses; y, en este caso, también al azar y al prejuicio. El investigador creía, erradamente, que el supuesto efecto de la corriente sería *alinear* la brújula con el conductor, en vez de atravesarla, como ocurre realmente. La ignorancia metodológica de los estudiantes de su clase, facilitaron quizás aquel descubrimiento fortuito (esa clase de azar afortunado es más frecuente entre quienes más trabajan, estudian y piensan).

- En la página anterior, a la izquierda se ilustra el principio motor. Si se hace circular corriente por un alambre sometido a un campo magnético, aparece una fuerza sobre el conductor. A la derecha, el principio generador. Si se mueve un alambre en un campo magnético, de modo que corte líneas de campo, se genera electricidad en el conductor. En ese caso, se dice que se induce una fuerza electromotriz. El sentido de la fuerza dinámica, y la polaridad de la fuerza electromotriz, son los indicados en las figuras.



- El descubrimiento de que las corrientes eléctricas magnetizan, fue el inicio del telégrafo, y con él, el de la revolución de las comunicaciones.

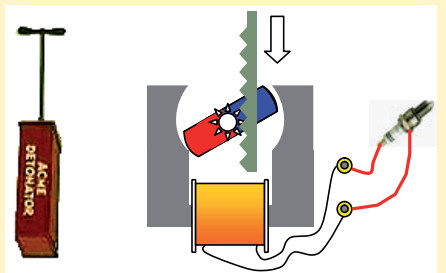
● Inducción, flujo, fuerza electromotriz; ley de Faraday

La magnitud de los efectos magnéticos asociados a imanes y corrientes se caracterizan, en un punto del espacio, con la magnitud física **inducción**, o **densidad de flujo**, designada con la letra B y expresada en unidades tesla. Por ejemplo, la inducción del campo magnético terrestre en Buenos Aires es de unos 30 microtesla. El producto de la inducción B , en tesla (T), por el área transversal, en metros cuadrados, es el *flujo magnético*, cuya unidad es el weber (Wb). Un tesla equivale a un weber por metro cuadrado; $1 \text{ T} = 1 \text{ Wb/m}^2$.

El corte de líneas de campo magnético por un conductor induce en éste una fuerza electromotriz, que se expresa en volt, y se corresponde con la tensión que aparece en los extremos del conductor, si es que forman un circuito abierto y no tienen nada conectado; también si sólo se conecta un voltímetro de muy elevada resistencia. El nombre de esa magnitud es poco afortunado, porque no se trata de una fuerza, en newton, ni en kilogramos; además las fuerzas no *producen* movimientos, sino que cambian la velocidad. Aceptada esa costumbre, el valor de la fuerza electromotriz inducida está dado por la *Ley de Faraday*:

$$E = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \qquad E = vBL$$

E es la fuerza electromotriz, en volt; $\Delta\Phi$ (delta fi) es el flujo magnético, en weber, segado por el conductor que se desplaza en el tiempo Δt (delta te). La letra griega delta mayúscula significa, como siempre, una diferencia o variación. A la derecha, una fórmula equivalente, en la que v es la velocidad, en m/s, del conductor que se desplaza, L su longitud en metros, y B , la inducción del campo magnético, en tesla.

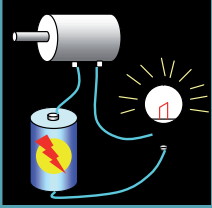


- Detonador de inducción, muy seguro, usado en minería. Al bajar la cremallera, el piñón hace girar un imán cerca de una bobina arrollada alrededor de un núcleo de hierro. Se generan miles de volt, que encienden la chispa necesaria para que estalle el explosivo.



- Para indicar una llamada telefónica, hoy usamos el gesto de la foto. Pero la gente de edad a veces hace un movimiento de manija, con el que los antiguos aparatos generaban, por inducción, electricidad para la campanilla remota.





- La fuerza contraelectromotriz se puede experimentar con los elementos de la figura: una pila, un foco de linterna y un motor eléctrico de juguete, de los conocidos como *Scalextric*. Cuando frenamos el eje del motor con los dedos, le impedimos alcanzar mayor velocidad, para generar más fuerza contraelectromotriz, y la lámpara enciende más intensamente, porque circula más corriente.



- La mente humana se predispone al razonamiento analógico e inductivo. Parece natural que cuando circule una corriente por un alambre, lo haga, también, por otro, al lado. Pero si la intensidad es constante, no ocurre tal cosa; tiene que variar. En el grabado, el filósofo inductivista Francis Bacon (1561–1626).

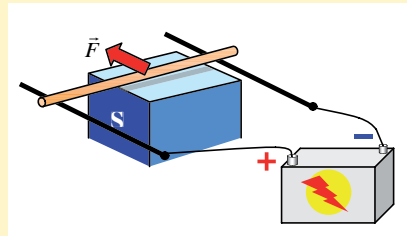
En el efecto motor, la magnitud de la fuerza que actúa sobre un conductor de longitud L , en metros, por el que circula una corriente de intensidad I , en amperes, y sometido a un campo perpendicular de inducción B , en tesla, está dada por la ley de Lorentz:

$$F = BLI$$

B es la inducción, en tesla; I es la corriente, en amperes; L es la longitud del conductor, en metros, y F la fuerza, en newton. ($9,8 \text{ N} = 1 \text{ kgf}$).

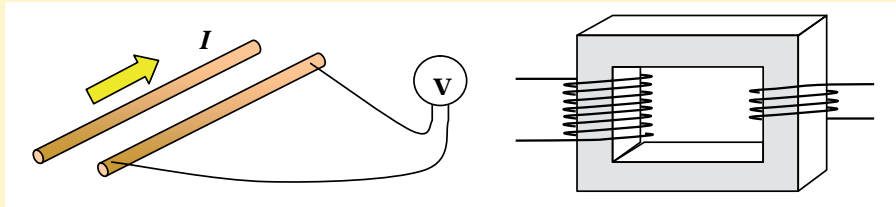
● Fuerza contraelectromotriz

Si dejamos que la barra de la figura se deslice, libremente, impulsada por la fuerza que resulta del efecto motor, a medida que vaya cobrando velocidad y, por el principio generador, se inducirá en ella una fuerza electromotriz, que será de polaridad opuesta a la de la batería. Cuando las dos tensiones se igualen, la corriente cesará, y la barra correrá, idealmente, a velocidad constante. Esa tensión inducida, por ser de polaridad opuesta a la de la alimentación, se llama *fuerza contraelectromotriz*, y aparece en todos los motores cuando ya adquirieron velocidad. En cambio, es nula en el arranque; por eso los motores hacen circular por la red una corriente elevada cuando arrancan, como lo notamos en el descenso de la tensión en una casa, cada vez que se pone en marcha una heladera, o el ascensor del edificio.



● Inducción estática

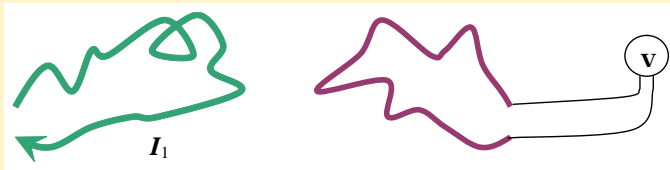
El movimiento relativo de imanes y conductores, induce en éstos fuerzas electromotrices. Si están quietos no hay inducción eléctrica, porque para ello hace falta que el campo magnético varíe, o que el conductor corte líneas de campo. Pero, esa necesaria variación del campo magnético se puede conseguir por medios *estáticos*, sin movimiento alguno. Alcanza con que la corriente de un conductor varíe en el tiempo, para que el campo magnético que genera sea también variable y, entonces, pueda inducir una fuerza electromotriz en otro conductor vecino.



● **Inducción estática.** Si la corriente I varía en el primero de los conductores, su inducción magnética es también variable, e induce una fuerza electromotriz en el segundo conductor. A la derecha, un transformador. Si se conecta uno de sus bobinados a una fuente de tensión alterna, en el otro aparece también tensión. En cambio, si se alimenta un transformador con una tensión continua, nada aparece del otro lado, y además el *trafo*³ se quema.

● Inducción mutua

La corriente variable que circula por un conductor induce una fuerza electromotriz en los conductores vecinos. La magnitud de ese efecto depende de cuánto varíe esa corriente, y con qué velocidad lo haga; pero también depende de la forma, el tamaño y la posición de los conductores. Si son cortos y están alejados, la fuerza electromotriz inducida es menor que cuando los conductores son grandes y están cercanos uno del otro.



Ese hecho se expresa así matemáticamente:

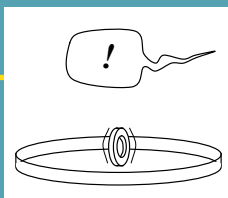
$$E_2 = M \frac{\Delta I_1}{\Delta t}$$

ΔI_1 es la variación de la corriente en el primer conductor, en amperes; Δt es el tiempo en el que ocurre esa variación, en segundos; E_2 es la fuerza electromotriz, en volt, que induce el primer conductor en el segundo; y M se llama el *coeficiente de inductancia mutua*. Sus unidades son volt segundo sobre amperes, combinación llamada *henry*, y que se simboliza H.



● La inductancia mutua de los conductores largos y próximos puede causar interferencias, especialmente, en los de comunicaciones, que emplean altas frecuencias y, por eso, sus corrientes varían muy rápidamente.

³ Tanto en la Argentina, como en los Estados Unidos y Alemania, se entiende que *trafo* es una abreviatura informal para *transformador*, aunque se la excluya de los documentos legales, comerciales, o muy serios.



- Una formulación más general de la ley de Lenz es ésta: *La fuerza electromotriz inducida se opone a su causa.* Si hacemos bailar un imán sobre una superficie aislante, tarda más en detenerse, que si lo impulsamos sobre una bandeja de aluminio. El imán induce corrientes en el metal; y la inducción magnética de esas corrientes hace fuerzas que se oponen al giro del imán que es, en este caso, la causa de la inducción.

• Autoinducción

Un conductor no sólo induce fuerzas electromotrices en conductores vecinos; también lo hace sobre sí mismo; y resulta así, a la vez, inductor e inducido. Matemáticamente, eso se expresa de modo similar al anterior, pero ahora el factor se llama *coeficiente de autoinducción, autoinductancia, o inductancia* a secas. Se designa con la letra L , y se expresa en henry.

$$E = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

E es la fuerza electromotriz, en volt, que induce el conductor sobre sí mismo; ΔI es la variación de la corriente en el conductor, en ampere; Δt es el tiempo en el que ocurre esa variación, en segundos, y L es el coeficiente de autoinducción, en henry.⁴ El signo negativo indica que se trata de una fuerza *contraelectromotriz*.

• Ley de Lenz

Recibe ese nombre, en homenaje a H. F. E. Lenz (1804–1865), el hecho de que la polaridad de la fuerza electromotriz inducida es siempre opuesta a la variación de la corriente que la induce. Por ejemplo, si por un conductor circula una corriente constante e intentamos interrumpirla, bruscamente, la súbita disminución de la corriente genera una fuerza electromotriz autoinducida que hace que la corriente no pueda disminuir de golpe. Es como si la corriente tuviera inercia. Aparece, entre los cables que se desconectan, una chispa larga, de una tensión mucho mayor que aquélla con la que se alimenta el circuito, y que hace que la corriente siga circulando un tiempo más, tarde en extinguirse, y gaste los contactos.

• Fuerza magnética sobre cargas en movimiento

Una forma alternativa de expresar la relación que existe entre la fuerza magnética y la corriente, más parecida a la que propuso el sabio austríaco Konrad Lorentz (1903–1989) es considerar las cargas individuales que componen una corriente eléctrica:

⁴ Por ejemplo, si una bobina tiene una inductancia de un microhenry y medio; eso significa, de acuerdo con la última fórmula, que si se produce una variación de corriente de 200 A en un tiempo de 2,5 millonésimas de segundo, esa bobina se induce a sí misma una fuerza electromotriz de 60 V.

$$F = vBq$$

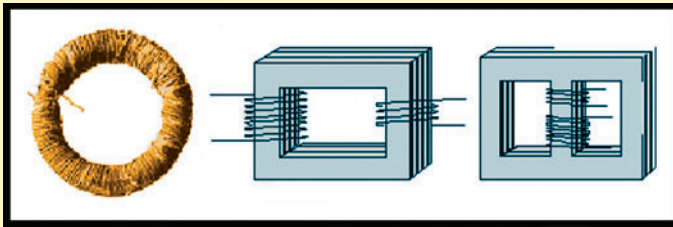


La letra q indica el valor de la carga de una partícula, en coulomb; v es su velocidad, en metros por segundo. B , en tesla, es la inducción magnética del campo en el que se encuentra la partícula; y F es la fuerza, en newton, que hace el campo sobre ella. La dirección de la fuerza es perpendicular a la inducción y a la velocidad; y su sentido es aquél en el que avanzaría un sacacorchos, si se lo hiciese girar desde una flecha que represente la velocidad, hacia otra que indique la inducción.

Como la fuerza magnética es perpendicular a la velocidad de la partícula, la acelera lateralmente, sin que su velocidad aumente ni disminuya.

● El transformador

Uno de los más ingeniosos inventos de Michael Faraday, de importante valor teórico en su época, y de gran utilidad tecnológica en todos los tiempos, es el *transformador eléctrico*, la aplicación más directa de la inducción estática.

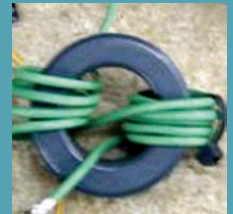


● A la izquierda, el primer transformador de la historia, hecho por Faraday con un rollo de alambre de hierro y dos bobinados de alambre de cobre aislado en algodón. Al centro, esquema de uno actual, llamado transformador de núcleo en anillo. A la derecha, uno de mejor diseño, el transformador de núcleo acorazado.

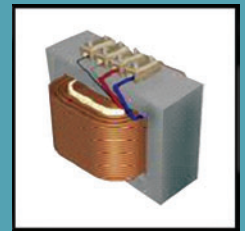
Los transformadores se emplean sólo en corriente alterna y tienen uno o más devanados. Los de alimentación se llaman primarios; y los de salida, secundarios. En ciertas aplicaciones de alta tensión, hay también una bobina terciaria.

Las variaciones de corriente en el primario hacen que el flujo magnético que comparten las bobinas varíe; y eso induce fuerzas electromotrices en ellas.

La **relación de transformación** entre la tensión de entrada y la de salida, es la que existe entre los números de vueltas, o espiras, de los bobinados. Por ejemplo, un transformador con un primario de mil vueltas, y un secundario de quinientas,



● Truco para suprimir interferencias. La corriente de 50 Hz pasa sin dificultades, porque varía lentamente. Las corrientes de frecuencias mucho mayores y que varían más rápidamente, inducen gran fuerza contraelectromotriz, y no pasan. El anillo es de ferrita.



● Transformador de núcleo acorazado, con uno de los bobinados arrollado por afuera del otro. El de alambre grueso es el de tensión más baja, y corriente mayor.

sirve como transformador de 220 V a 110 Vca. Las corrientes están en relación inversa a la de las tensiones. En este ejemplo, cuando la corriente primaria sea de 1 A, la secundaria será de 2 A. Así la potencia, igual al producto de la tensión por la intensidad, es la misma, idealmente, a la entrada y a la salida. En la práctica hay algo de pérdida en forma de calor.

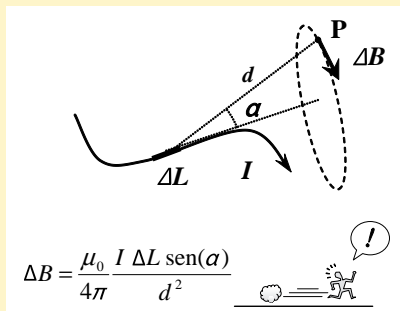
● Motores rotativos

El primer motor electromagnético de la historia fue, como el transformador, también, un invento de Faraday. Desde entonces, se han hecho muchos avances que permiten construir motores de corriente continua y alterna, algunos sin contactos que rocen, y alimentar estos con fuentes de frecuencia variable, con lo que se consigue controlar la velocidad entre límites extremos, desde una vuelta por hora, hasta miles de revoluciones por minuto.

El principio de funcionamiento del motor electromagnético permaneció inalterado desde mediados del siglo XIX: Se produce –con imanes o bobinas– un campo magnético y se hace pasar corriente por un conductor.

● Inducción magnética de una corriente

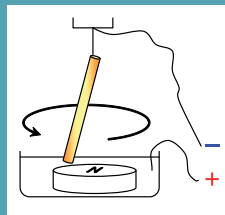
Imaginemos un conductor por el que circula una corriente I , que genera un campo magnético en las proximidades. En cada punto del espacio, por ejemplo en P , cada pequeña parte del conductor, ΔL , contribuye en una cantidad ΔB a la a la inducción, o densidad de flujo.



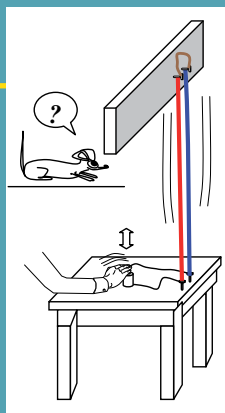
La **ley de Biot y Savart**, llamada así en honor de dos científicos franceses (uno de ellos cirujano) establece cuánto vale esa contribución:

ΔB es el aporte de inducción, en tesla, del fragmento de conductor de longitud ΔL , en metros. El factor $\frac{\mu_0}{4\pi}$ es una constante igual a 10^{-7} tesla metro sobre ampere,⁵ I es la corriente que circula, en ampere; d , en metros, es la distancia entre

⁵ La parte μ_0 de esa constante se llama *permeabilidad magnética del vacío*, y vale $4\pi \times 10^{-7}$ T.m/A. Recordemos, del capítulo 1, que ϵ_0 es la permitividad dieléctrica del vacío. El sabio escocés James Clerk Maxwell, una de las mentes científicas más brillantes de la historia, descubrió, en 1864, que debían existir ondas electromagnéticas, y que su velocidad de propagación sería la inversa de la raíz cuadrada del producto $\mu_0 \epsilon_0$; y eso da... ¡la velocidad de la luz! Maxwell unificó así la óptica con el electromagnetismo. Mientras pensaba, lápiz en mano, dónde podía hallar ondas electromagnéticas, esas ondas estaban iluminando el papel donde escribía.



- El primer motor electromagnético de la historia, lo inventó Michael Faraday. Sumergió un imán en mercurio, colgó una varilla metálica que hiciese contacto, y le hizo pasar corriente.



- La inducción magnética de un conductor por el que circule corriente ejerce una fuerza sobre otro conductor vecino, por el que también circule corriente. Eso se puede experimentar con una pila y dos cables que cuelguen paralelos y muy cercanos entre sí.



el fragmento de conductor y el punto del espacio en el que se calcula la inducción. Y $\text{sen}(\alpha)$ (seno de alfa) es el seno del ángulo marcado en la figura.⁶

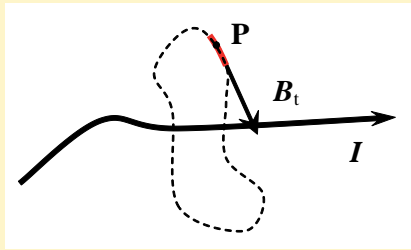
En el caso de un conductor recto y muy largo –idealmente infinito– como el de una línea aérea de alta tensión, la aplicación de esta ley lleva al resultado de que la inducción magnética a una distancia d de la línea vale $B = 2 \times 10^{-7} \text{ T.m/A} \cdot I/d$. Por ejemplo, para 1.000 A y 12 m, que son valores típicos, la inducción vale 16,7 microtesla, menos que la del campo magnético terrestre.



- André-Marie Ampère (1775–1886) aprendió latín por su cuenta para leer los libros de la biblioteca de Lyon, su ciudad natal. Enseñó matemática, e investigó el magnetismo. Podría haber avanzado más, si no hubiera abandonado sus trabajos durante unos años, cuando su padre, juez de paz, murió en 1793, víctima del Terror.

• Ley de Ampère

La ley de Ampère, al igual que la de Biot y Savart, también relaciona la inducción magnética con las corrientes, pero en vez de considerar las contribuciones a la inducción de cada parte de un conductor, da una descripción integral del efecto.



Imaginemos una curva cerrada cualquiera que rodee un conductor por el que pasa una corriente I . Dividamos esa curva en fragmentos pequeños de longitud ΔL (como el marcado en color), multipliquemos cada una de esas longitudes por el valor

de la componente tangente a la curva, B_t de la inducción B en ese lugar, y sumemos todos esos productos. La ley de Ampère establece que el resultado es igual al producto de la corriente, por la permeabilidad magnética del vacío (μ_0).

$$\sum B_{ti} \Delta L_i = \mu_0 I$$

La letra griega sigma mayúscula significa suma, y los subíndices i representan cada uno de los términos de la suma.

Por ejemplo, si trazamos una circunferencia de 12 m de radio alrededor de la línea de alta tensión ya mencionada, la longitud de esa curva imaginaria será de 75,4 m. A igual distancia de la línea, la inducción tendrá el mismo valor, calculado antes, de 17 microtesla. Se cumple la igualdad $16,7 \times 10^{-6} \text{ T} \times 75,4 \text{ m} = 4\pi \times 10^{-7} \text{ T.m/A} \times 1.000 \text{ A}$, lo que corrobora que el resultado predicho por la ley de Biot y Savart coincide con el de la ley de Ampère.

⁶ Esta proposición es puramente teórica. Es imposible conseguir que circule corriente sólo por una pequeña parte de un conductor; por eso la ley de Biot y Savart sólo se corrobora a través de sus consecuencias integrales.

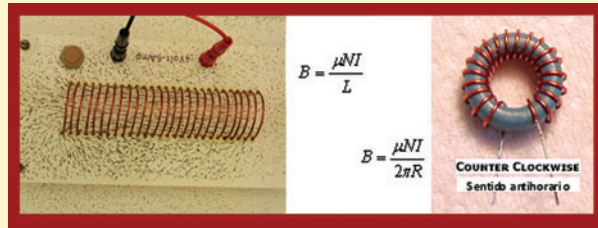


- Cabeza grabadora de disco rígido, cuyo núcleo tiene una permeabilidad magnética 800.000 veces mayor que la del vacío. El cociente entre la permeabilidad μ de un material, y la del vacío, μ_0 , es la *permeabilidad relativa*, que no lleva unidades. La del hierro común es de 5.000. La del hierro silicio de grano orientado, de 20.000.

Las leyes enunciadas valen en el vacío. Para extenderlas a medios cualesquiera, por ejemplo el hierro, o la ferrita, reemplazamos μ_0 , la permeabilidad del vacío, por μ , la permeabilidad particular que tenga ese material.

• Campo magnético de una bobina

La inducción que genera una bobina por la que pasa corriente depende de la forma de la bobina. Las más comunes son las solenoides, y las toroides.⁷



• Izquierda, solenoide; derecha, toroide. La inducción en el centro del solenoide, o en cualquier punto del interior del toroide, es B , en tesla. L es la longitud de la solenoide; R , el radio del toro. N es el número de vueltas arrolladas, sin unidades; y μ es la permeabilidad magnética del material (la del aire es muy cercana a la del vacío).

• Inducción, permeabilidad e intensidad de campo

La forma más sencilla de estudiar estos conceptos es en el caso de la bobina toroide con núcleo magnético, también llamada *anillo de Rowland*, cuya inducción en cualquier punto de su núcleo se calcula como vimos:

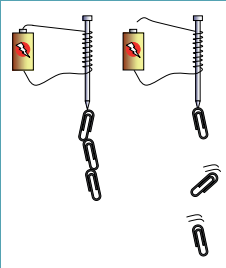
$$B = \frac{\mu NI}{2\pi R}$$

Acomodaremos los términos de las ecuaciones y definiremos nuevas magnitudes; y eso puede parecer confuso si se ignora su propósito, que es el de alcanzar una interpretación más sencilla e intuitiva del magnetismo.

Multipliquemos a izquierda y derecha por la sección transversal del núcleo, s , expresada en metros cuadrados. El producto $B \cdot s$ es el flujo magnético, Φ .

Por otra parte, el producto $N \cdot I$ expresado en amperes vueltas (o directamente en amperes, porque las vueltas carecen de unidades), se llama *fuerza magnetomotriz*. Y a la longitud del desarrollo del toro, $2\pi R$, dividida por la sección y por la permeabilidad, se la define como la *reluctancia*. Queda entonces una expresión muy sen-

⁷ *Solenoide* significa de forma tubular, como el resorte del lomo de un cuaderno. *Toroide*, recordemos, significa con forma de toro, un cuerpo geométrico semejante a una rosquilla, o a un salvavidas.



• **Electroimán.** La corriente eléctrica que pasa por la bobina magnetiza el clavo, que atrae los clips. Cuando la corriente cesa, el clavo se desmagnetiza casi por completo.

cilla, que se parece a la ley de Ohm de la electricidad, pero que se aplica al magnetismo:

$$\Phi = F / R,$$

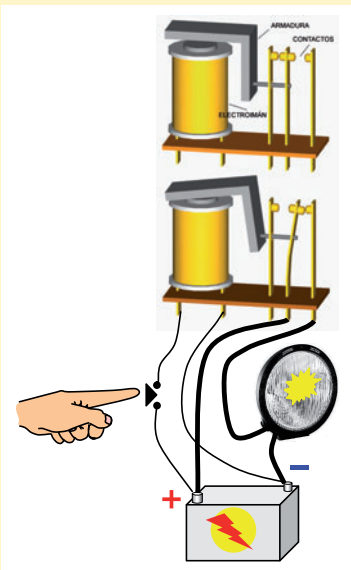
Se lee: *el flujo es igual al cociente entre la fuerza magnetomotriz, y la reluctancia, la primera se mide en ampere vueltas, la segunda, en uno sobre henry, o H^{-1} .*

El número de ampere vuelta, dividido por la longitud del circuito magnético, es la *intensidad de campo magnético*, H: Tenemos, entonces,

$$B = \mu H$$

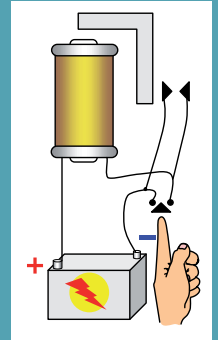
La última fórmula nos dice que a igual intensidad H de campo magnético aplicado, cuanto mayor sea la permeabilidad magnética del medio, μ , tanto mayor será la inducción, o densidad de flujo, B.

● Relés electromecánicos; circuito autoalimentado



Una aplicación de la inducción magnética, casi tan importante como la del motor y la del transformador, es la del relevador electromecánico, o *relé*. Es una variante del *electroimán*, en la que la fuerza magnética, en vez de abrir una puerta, o cargar objetos, establece –o abre– un contacto eléctrico diferente del que se hace para hacer circular corriente por su bobina.⁸ De esa manera, por ejemplo, las luces y bocina de un coche, que necesitan una corriente grande, se pueden manejar con una corriente mucho menor, la de la bobina del relé, con una llave pequeña en el tablero.⁹

Hay relés con varios juegos de contactos, algunos que se cierran cuando se alimenta la bobina; otros que, en cambio, estaban ya cerrados, y se abren cuando actúa el relé. Esos contactos se llaman *NA* y *NC*, normalmente abiertos y normalmente¹⁰ cerrados.



- Relé autoalimentado. Cuando se aprieta el botón, actúa el contacto. Pero si se suelta el botón, el relé queda tomado, hasta que alguien desconecte la batería. Así, cuando la energía eléctrica vuelve después de un corte, las máquinas no arrancan solas, y hay que apretar otra vez el botón para que se pongan en marcha.

⁸ En la jerga eléctrica, esos contactos independientes y libres de potencial y, que por eso, se los puede usar libremente en un circuito, se llaman *contactos secos*.

⁹ Cuando accionamos las luces altas y bajas en algunos modelos de coche, en un ambiente silencioso, se oye el ruido del relé cuando actúa. Algunos modelos nuevos usan relés de estados sólido, dispositivos electrónicos que carecen de piezas móviles.

¹⁰ La normalidad, en este contexto, consiste en que la bobina del relé no se encuentra alimentada. Comentemos, de paso, que en electricidad *cerrado* significa conectado; y *abierto*, desconectado, en el mismo sentido que cuando se dice que una idea no cierra, o sea que no establece conexión con otras. Pero este significado eléctrico es opuesto al del lenguaje vial: abierto al tránsito es que se puede pasar; y cerrado, que no hay circulación de vehículos.

PROPUESTAS DE ESTUDIO



- Aún después de finalizada la Segunda Guerra Mundial, los grandes barcos llevaban a bordo técnicos que se ocupaban de neutralizar la inducción del campo terrestre, mediante la circulación de una corriente eléctrica apropiada por bobinas que rodeaban la nave. La operación se llamó *desgaussaje*, y servía para disminuir la eficacia de las minas explosivas. El gauss es una unidad de inducción, o de densidad de flujo.



- Nicola Tesla (1856–1943), nacido en la Serbia del Imperio Austrohúngaro, desarrolló un aparato de inducción, hoy conocido como *bobina de Tesla*, que genera alta tensión. Su invento se usa hoy en el encendido de chispa de los motores de nafta.

8.1. Además de las unidades electromagnéticas internacionales mencionadas en este capítulo, se usan muchas otras, especialmente, en los Estados Unidos de América y en otros países influidos por su comercio e industria. Averigüen en otras fuentes, por favor, a cuántos gauss equivale un tesla, y qué es un gilbert.

8.2. La linterna de la figura recarga sus pilas mediante el accionamiento manual de la palanca. ¿Qué se puede imaginar sobre su principio de funcionamiento?

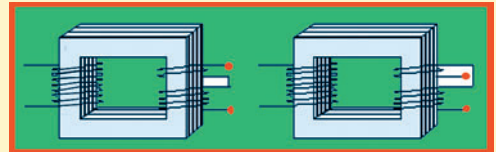


$$B = 2 \frac{\mu_0 I}{4\pi d}$$

8.3. La fórmula de arriba, da la fuerza que se ejercen dos cables paralelos de longitud L , distantes una distancia d , por los que circula una corriente I , en el supuesto de que el largo de los conductores sea bastante mayor que la distancia que los separa. En un cortocircuito a la salida de un generador de una central, la corriente alcanza los 200.000 A. Si los conductores de salida hasta el transformador midiesen veinte metros de largo, y distaran entre sí un metro, ¿cuánto valdría la fuerza entre esos conductores, en caso de corto?

8.4. Esta propuesta es difícil, porque tiene infinitas respuestas posibles; entonces hay que tomar decisiones, e inventar alguno de los datos faltantes; en eso consiste su dificultad. Diseñen un solenoide que, cuando se le hace circular cien miliampere, produzca en su centro una inducción semejante a la terrestre, de 16 microtesla.

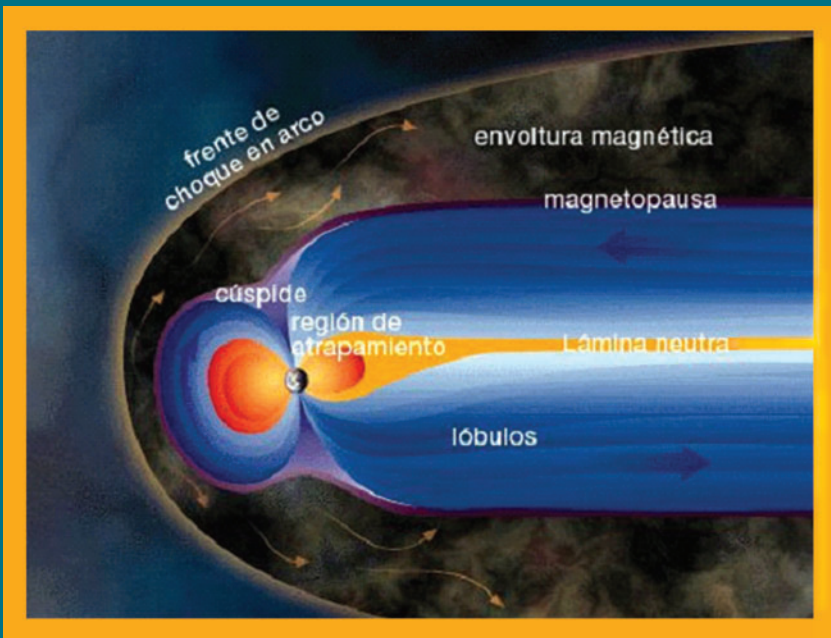
8.5. Los primarios de estos transformadores se alimentan con 100 V. ¿Qué valor de tensión hay entre los puntos de color del primer transformador? ¿Y en el segundo?



• Otras fuentes de estudio e información

- Sugerimos buscar en Internet con las palabras electromagnetismo, elemental, Faraday y Maxwell.
- Hay un material destinado a docentes, pero accesible, en este sitio del INET http://www.inet.edu.ar/mat_serie_colect.asp?ID=7. Se piden los motivos de consulta, y el registro, que es gratuito.
- Francis Bitter, *Imanes*, Eudeba, Buenos Aires, 1960. Contiene interesantes datos históricos.

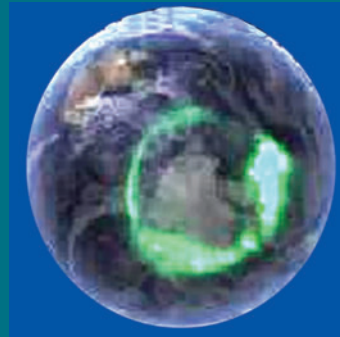
Aplicaciones científicas, industriales y domésticas del magnetismo



● En el medio de la figura está la Tierra, nuestro planeta. En la imaginación, fuera del dibujo en escala, una cuadra a la izquierda, y de un metro de diámetro, el Sol. En colores, el campo magnético terrestre.

Se investiga todavía a qué se debe ese campo. Tiene que ver, sin duda, con la rotación diaria de la Tierra; posiblemente también con su núcleo ferroso, y con las partículas cargadas del viento solar, que la fuerza de Lorentz desvía en todas partes menos en los polos, donde entran como por embudos, ionizan el aire y generan las auroras polares.

● La aurora austral, fotografiada desde el espacio. En la parte más alta de la atmósfera, la presión del aire es la misma que en el interior de un tubo fluorescente; y el fenómeno al que obedece el fulgor, muy similar (arriba, a la izquierda, Oceanía.)



Aplicaciones científicas, industriales y domésticas del magnetismo



- Demostraciones magnéticas de William Gilbert, ante la Reina de Inglaterra y miembros del Parlamento.



- Un GPS, del tamaño de un celular, recibe señales de tres o cuatro satélites. Según sus demoras, determina las coordenadas locales con una precisión de cinco metros.

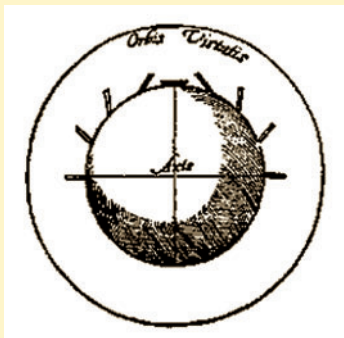


- El girocompás es un motor con un volante montado en tres aros, uno dentro de otro, para que su eje de rotación se mantenga fijo, aunque la base del aparato gire con la nave.

Los avances científicos, rara vez, resultan del esfuerzo individual, ni siquiera en las épocas más antiguas. Los científicos de mayor renombre que recuerda la historia pertenecieron a academias, universidades y cortes, o recibieron el apoyo de familias ricas, emperadores y reyes; sea porque retribuían los recursos con resultados prácticos inmediatos que se pudieran aplicar a la paz o la guerra, o, porque el verdadero poder siempre supo que el cultivo de las artes y las ciencias lo afianza y, tarde o temprano, cosecha de ellas bienes de los que no sospechaba su existencia.

La Reina Isabel I de Inglaterra instruyó, directamente, a su médico personal, William Gilbert (1544–1603) para que aprovecharse sus conocimientos de física en el diseño de mejores brújulas e instrumentos de navegación, que necesitaban los barcos de la Armada para la guerra contra España.¹

Gilbert la obedeció y dedicó, después, su vida al estudio del magnetismo. Perfeccionó varios instrumentos y construyó unas brújulas que, además de indicar la dirección geográfica, marcaban la inclinación vertical del magnetismo local. Elaboró una teoría sobre el campo magnético terrestre que, aunque era errada, resultó útil para la navegación marítima, y motivó el inicio de nuevos trabajos de otros investigadores.



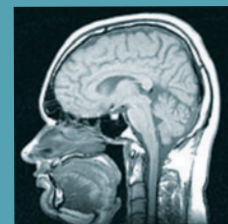
- Una terrella de Gilbert. La bola de barro seco tiene un imán en su interior. Los alfileres revelan las líneas de campo, e ilustran el concepto de *inclinación magnética*, mayor cerca de los polos. Terrella, en latín, significa Tierra pequeña.

¹ A Isabel I la llamaron la Reina Virgen. En el contexto político de su época, virgen significaba soltera y sin hijos. Resistió la presión del Parlamento para que se casase y diese descendencia al trono; se supone que para evitar que un cónyuge disminuyese el poder de mando directo que había consolidado.

Gilbert consideraba a la Tierra como un gigantesco imán² y, con trozos de magnetita envueltos en arcilla, construyó modelos a escala, que llamó *terrellas*. Con ellas demostró que, aunque el campo magnético es más intenso cerca de los polos, resulta menos útil para la orientación. Las brújulas, en los polos, *enloquecen*, como dicen los navegantes.

En la actualidad, la orientación magnética de las naves marítimas y aéreas cayó en desuso. La brújula, o compás magnético, aunque se lleva a bordo para que ayude en emergencias, se reemplaza por el girocompás, y por el sistema de posicionamiento global, GPS.

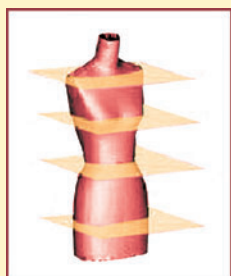
En la actualidad, las investigaciones básicas y aplicadas superan en mucho las de los siglos anteriores, al extremo de que ya no hay trabajos importantes a cargo de una sola persona, o de pocas. Por ejemplo, el premio Nobel de Medicina de 1979 se otorgó, en conjunto, al físico Allan M. Cormack, y al ingeniero electrónico Godfrey N. Hounsfield, por su desarrollo del tomógrafo axial computarizado. Ese aparato, tiene poco que ver, directamente, con el magnetismo, pero dio lugar a una muy útil herramienta de diagnóstico médico: la *tomografía axial computarizada de resonancia magnética nuclear*, largo e impresionante nombre que explicaremos enseguida. Por el desarrollo de ese instrumento, el químico Paul C. Lauterbur y el físico Sir Peter Mansfield obtuvieron el Premio Nobel, también el de Medicina, en 2003.



- Imagen del cerebro obtenida sin rayos X, con la técnica de la tomografía computada de resonancia magnética nuclear.

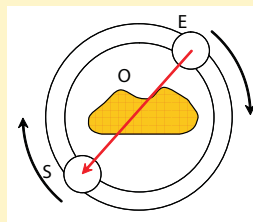
● Tomografía axial computarizada

La *tomografía*, de *tomo*, cortar, y *grafo*, dibujo, es la obtención de imágenes internas



de un cuerpo, como si se lo cortara en rebanadas. *Axial* significa en la dirección del eje. En el caso de un paciente, las rebanadas gráficas corresponden a cortes perpendiculares al eje mayor del cuerpo.³ Computarizar es calcular con computadora.

A diferencia de las radiografías comunes que obtienen imágenes de una vez por transparencia fotográfica a los rayos, las de la tomografía computada resultan de explorar el cuerpo con haces delgados de radiación, en muchas direcciones cruzadas. El



² Si bien nuestro planeta se comporta como un imán en algunos aspectos, hoy sabemos que la Tierra no tiene un magnetismo permanente, ni lo podría tener, ya que su núcleo, que es de hierro, se encuentra a 4.500°C, temperatura mucho mayor que la de Curie para ese metal.

³ Es casi innecesario aclarar que el paciente queda entero después de este examen. No se lo corta verdaderamente; sólo se obtienen imágenes internas de su cuerpo, que resultan de mediciones y de cálculos.



- ¡Resuelvan esas cien mil ecuaciones en una milésima de segundo!

emisor rotativo **E** de la figura emite, por ejemplo, rayos X, que atraviesan el objeto **O**, y recibe, disminuidos en su intensidad, el sensor **S**, enfrenteado con el emisor, y también giratorio.

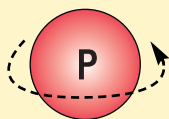
Se supone esa sección del objeto dividida en regiones imaginarias, por ejemplo celdas cuadradas de un milímetro. Cada celda que atraviesa el rayo, según su opacidad a los rayos X, contribuye a atenuarlo. Si el rayo se aplicara en una sola dirección, no se sabría cuál fue la contribución a esa atenuación de cada una de las celdas individuales que atravesó el rayo en su camino. Pero si el haz gira, o se trasladada, barre el objeto; y con eso se obtienen, por ejemplo cien mil datos. Se pueden plantear entonces cien mil ecuaciones con cien mil incógnitas, resolverlas matemáticamente, saber qué hay dentro del objeto, y representarlo gráficamente.

El matemático J. Radon ya había resuelto ese atractivo problema en 1925, e incluyó el tratamiento de las inevitables imprecisiones de medición y de cálculo. Pero para llevar su idea a la práctica, hubo que esperar hasta 1980, cuando se desarrollaron computadoras apropiadas.

La técnica descrita es invasiva, porque el exceso de rayos X daña los tejidos humanos. Pero en pocos años la tomografía computada se asoció con otra herramienta de diagnóstico que no usa radiaciones peligrosas, ni daña los tejidos, y se basa en una propiedad magnética de las partículas atómicas que componen el objeto de estudio. Es la RMN (NMR en inglés), *resonancia magnética nuclear*.

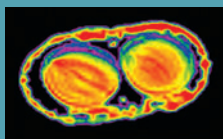
● Resonancia magnética nuclear

Los elementos químicos que, como el de hidrógeno, tienen un único protón



en sus núcleos, o un número impar de ellos (como el carbono 13, o el fósforo 31), tienen un espín diferente de cero. El espín es una propiedad de las partículas que la física cuántica asocia con un movimiento de giro.

Las partículas cargadas que giran se comportan como pequeños imanes, o dipolos, y se orientan en presencia de un campo magnético. En esas condiciones, con los espines orientados en el campo, se aplican ondas electromagnéticas al objeto que se estudia. Según la frecuencia de estas ondas, los núcleos las absorben, o las dejan pasar. La frecuencia exacta a la que ocurre la absorción depende de lo que haya en las vecindades de los núcleos, por ejemplo otros núcleos de otros átomos, iguales o diferentes. Así, con el estudio de la absorción de la radiación de diferentes frecuencias, se sabe qué sustancias químicas hay en cada punto de una muestra.



- Imagen de resonancia magnética nuclear de dos semillas de colza, de las que se obtiene aceite comestible. Los colores indican la concentración de agua y de aceite después del secado.

Como los tejidos no sufren daños, que se sepa, por los campos magnéticos, ni por las radiaciones empleadas, de frecuencia relativamente baja, la técnica de tomografía axial computarizada de resonancia magnética nuclear permite diagnósticos que no causan los daños que sí pueden producir las ondas electromagnéticas ionizantes y de frecuencias altas, como los rayos X. Esta técnica revolucionó el diagnóstico médico y, hoy, todos los centros importantes de salud tienen uno o más de esos aparatos, o trabajan en colaboración con otro instituto que los tenga.

● Campo magnético terrestre

El estudio del campo magnético de la Tierra tiene hoy mucha menos utilidad para la navegación, que la de hace un siglo. Pero han surgido, desde entonces, nuevos motivos de interés en su estudio. Uno de ellos es el del cambio climático,⁴ fenómeno por el cual la temperatura global del planeta parece estar aumentando; casi, seguramente, como consecuencia de las actividades humanas, en particular, la quema de combustibles fósiles. Por eso crece el interés científico en el pasado de la Tierra y en conocer las temperaturas en cada época y las causas de sus variaciones, para saber si esto que está ocurriendo en los últimos dos o tres siglos, ya ha pasado antes o no. Se investiga si influyen los cambios en la actividad solar; y, en caso afirmativo, de qué depende el retorno a la normalidad. Una variable, posiblemente, muy vinculada con la actividad solar es el campo de la Tierra, por eso resulta de interés saber cuánto valía la inducción magnética terrestre en cada época, cuáles eran su dirección y sentido, y dónde se encontraban, entonces, los polos, en relación con los continentes.

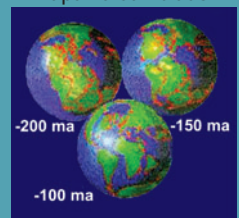
● Paleomagnetismo

El paleomagnetismo es el estudio del campo magnético terrestre en el pasado. Ese dato se puede conocer gracias al pequeño magnetismo permanente que adquirieron algunas rocas sedimentarias en el momento de su formación, cuando a partir de un barro o suspensión en agua, sus partículas se depositaron mientras se hallaban sometidas al campo terrestre de la época. El examen microscópico de esas rocas, y la medición de su magnetismo con un magnetómetro, dan indicios de la dirección, el sentido y la inducción del campo magnético antiguo.

⁴ Se discute, en medios científicos, la verdadera magnitud del llamado cambio climático, desde las hipótesis más moderadas, hasta las catastróficas. Se estima que en el transcurso de este siglo, el mar subirá entre veinte centímetros y un metro.

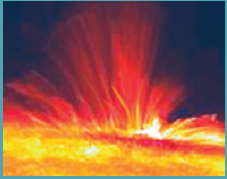


- Migración del Polo Norte en 3.000 millones de años. Esa representación es discutible, porque en mucho menos tiempo el mapa ha cambiado.





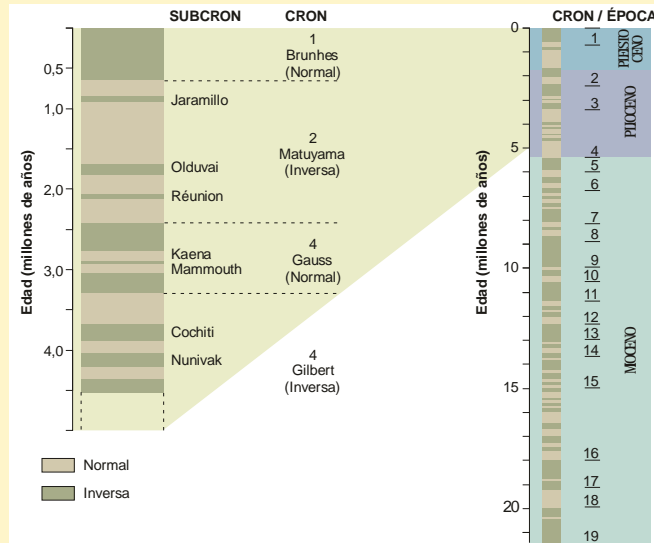
- Colocación de una muestra de roca en un magnetómetro, para determinar la dirección y sentido del campo terrestre en épocas pasadas.



- El Sol y los planetas tienen, igual que la Tierra, un campo magnético. Desde que su padre le regaló una brújula cuando era niño, Albert Einstein consideró la explicación del magnetismo terrestre como uno de los grandes misterios de la ciencia. Muchos científicos aceptan hoy la teoría de la *dinamo*, que atribuye el campo magnético de la Tierra al movimiento del metal líquido del núcleo. Otros investigadores le otorgan importancia a la carga eléctrica de nuestro planeta, resultante del bombardeo de partículas provenientes del Sol.

Los magnetómetros primitivos eran simples balanzas, que medían miligramos de fuerza de atracción. Hoy se usan otros mucho más sensibles, llamados SQUID, sigla en inglés de *dispositivo de interferencia cuántico superconductor*. Consisten en un anillo superconductor adelgazado en uno o dos sitios, por donde la corriente circula por efecto túnel (el capítulo 2 hace referencia a ese fenómeno cuántico). Esa circulación es muy sensible al magnetismo y, con ese aparato, se detectan campos de intensidad, miles de veces, inferiores a la del terrestre.

Los resultados de esas determinaciones muestran que el campo magnético de nuestro planeta se invierte erráticamente, según indica la figura.⁵ Como se acostumbra en geología, el pasado se representa abajo, y el futuro arriba, en el mismo orden en el que se depositan los sedimentos. Los investigadores llaman polaridad normal a la actual, e inversa a la opuesta, y creen ver tendencias temporales, por lo que clasificaron los tiempos en épocas, crones y subcrones.



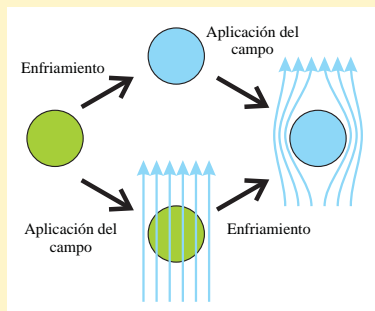
● Efectos de un superconductor en un imán, y el recíproco

En el capítulo 6 mencionamos la propiedad fundamental de un superconductor, que es la de tener una resistencia eléctrica nula. A continuación agregamos que, ese útil comportamiento, reconoce límites. Uno está dado por la inducción magnética *máxima* que es capaz de soportar el material sin perder su condición de superconductor. Otro límite, muy relacionado con el que se acaba de mencio-

⁵ Los humanos de la especie *homo sapiens* todavía no vivimos ninguna de esas inversiones. Pero nuestros antecesores y sus contemporáneos llegaron a experimentar tres o cuatro, aparentemente sin consecuencias. Se acerca, quizás, una inversión, porque el campo terrestre disminuyó un diez por ciento en el último siglo y medio.

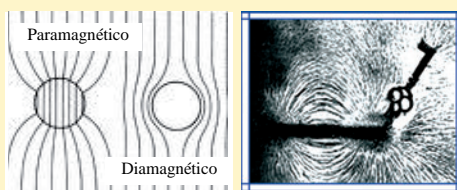
nar, es que la densidad de corriente que circula por el material, en amperio por metro cuadrado, también tiene que estar *por debajo* de un cierto valor, el cual depende del tipo de material superconductor. Si la inducción magnética a la que se somete el material, o la densidad de corriente que lo atraviesa, son demasiado elevadas, el material deja de ser superconductor.⁶

Otra propiedad de los superconductores, es el *efecto Meissner*. Consiste en que un superconductor que se encuentre sometido a condiciones que no excedan los límites mencionados, expulsa de su interior todo vestigio de campo magnético.



● **Efecto Meissner.** En azul, el material frío; en verde, más caliente. Arriba: si se enfría un material hasta hacerlo superconductor, el campo magnético que se le aplique, no lo penetra. Abajo: si el campo magnético se aplica antes, entonces después, cuando el material se enfría y se vuelve superconductor, expulsa el campo magnético que había en su interior.

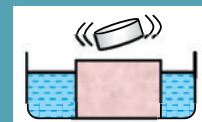
Los materiales paramagnéticos y ferromagnéticos, como la llave de la foto, *concentran* las líneas de campo en su interior. Los diamagnéticos, por el contrario, *separan* las líneas. Los superconductores actúan como materiales diamagnéticos perfectos, porque no permiten ningún magnetismo en su interior.



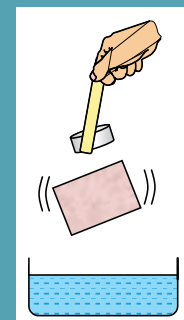
● Aplicaciones de la superconducción

La aplicación práctica más común de los superconductores en la actualidad, es la de producir, con grandes corrientes eléctricas, campos magnéticos intensos para los tomógrafos de resonancia magnética nuclear y para la levitación magnética de ferrocarriles de alta velocidad. Se experimenta la fabricación de circuitos integrados superconductores, de velocidad de procesamiento de datos mayor que los actuales de silicio; y no se descarta que en el futuro, en vez de almacenar la energía eléctrica de los coches en baterías químicas, esa energía se almacene en forma de corriente muy intensa que circule por un superconductor, sin ninguna resistencia, y que esté siempre ahí disponible para cuando se la necesite, por ejemplo, para poner el ve-

⁶ Ese límite indeseable se aprovecha, sin embargo, para construir magnetómetros SQUID, mencionados en este capítulo.



● En las demostraciones con superconductores hacen levitar un imán sobre el superconductor enfriado en nitrógeno líquido. Es menos conocido el efecto opuesto: se toma el imán, y se iza el superconductor, sin contacto físico.



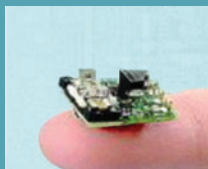
● Superconductores de alta temperatura de segunda generación (2G HTS), desarrollados y puestos en venta en 2005 por la *American Superconductor*. Les agregan unas partículas muy pequeñas que aumentan la densidad de corriente crítica.

hículo en marcha. Más difícil es la transmisión de la energía eléctrica que producen de las centrales, por cables superconductores.

● Motores lineales

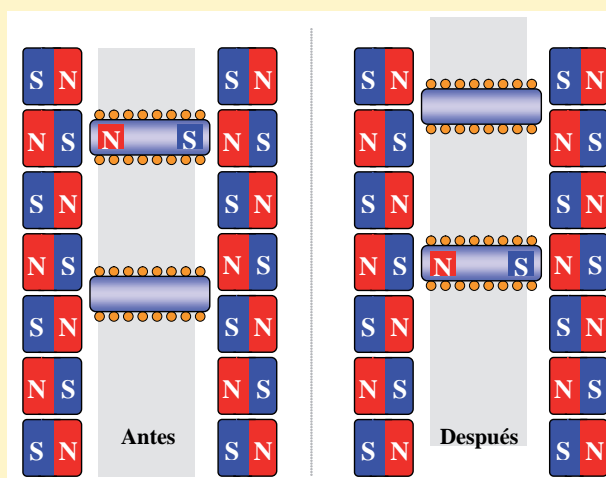


Motores lineales fabricados por la Copley Controls Corp. Alcanzan una aceleración de dos gravedades y media, y tienen una precisión de un micrón. Para evitar el desgaste, la parte móvil desliza por flotación magnética sobre la fija. Se los usa en escáneres de computadoras, y otras aplicaciones.



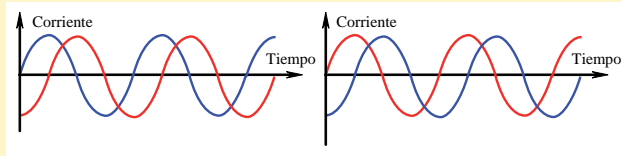
● Motor lineal de 8 mm de carrera, usado en el reconocimiento óptico de los caracteres impresos de un texto. Pero no usa principios magnéticos, sino un material *piezoeléctrico*; el mismo de las alarmas de relojes y encendedores de chispa, que cambia levemente de tamaño cuando se le aplica tensión.

Los primeros motores eléctricos fueron los rotativos y servían para hacer funcionar molinos, ventiladores, piedras abrasivas y ruedas de vehículos. Pero, en muchas operaciones industriales, los movimientos que se requieren son de traslación y no de rotación; entonces, se usan motores lineales, cuyo principio de funcionamiento es semejante al de los motores rotativos. Un motor lineal se puede imaginar como un motor rotativo desarrollado en una línea.



La figura muestra el principio de funcionamiento de un motor lineal. Por simplicidad se representan sólo dos de las bobinas con núcleo de hierro, montadas en el carro móvil. **Izquierda:** se hace circular corriente por la bobina de arriba que, entonces, se atrae con los imanes vecinos, y se acomoda en línea con ellos. Por la otra bobina no pasa corriente. **Derecha:** se desconecta la bobina de arriba y se conecta la de abajo, con la misma polaridad; entonces la bobina de abajo sube medio paso, junto con la otra y con el carro al que están sujetas. Y así, sucesivamente, con los cambios de polaridad adecuados, se hace avanzar el carro en forma continuada, o, bien, paso a paso, si eso es lo que se necesita.

Una manera de conseguir un avance continuo y no tembloroso o de a saltos, es alimentar las bobinas con corrientes alternas *en cuadratura*, esto es, desfasadas en el tiempo un cuarto de período.

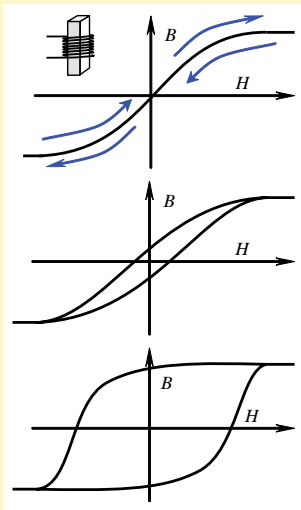


- **Alimentación desfasada.** A la izquierda, la corriente representada en rojo está atrasada con respecto a la indicada en azul. A la derecha ocurre lo opuesto. Con ese cambio se consigue que el motor lineal avance, o que retroceda.

Los motores lineales se usan en muchas aplicaciones, entre ellas los tomógrafos, los escáneres de computadoras, la robótica, y en máquinas herramienta que trasladan la plataforma móvil a la que se fija la pieza que se trabaja. Un motor lineal impulsa la plataforma, que hace pasar la pieza frente a herramientas giratorias que la agujerean, la desbastan, la rectifican, o le hacen otras operaciones.

● Histéresis magnética

En el capítulo anterior mencionamos dos magnitudes, designadas con las letras H , y B ; que son, respectivamente, la intensidad de campo y la inducción magnética; la primera medida en ampere vueltas por metro, y la segunda en tesla. Para caracterizar un material magnético es útil representar una de esas magnitudes en función de la otra.



Podemos interpretar la curva a partir del origen, cuando no circula corriente por la bobina, y el material no adquirió aún inducción. Aumentamos la corriente y aumenta la inducción. Pero llega un momento en que, aunque se aumente más la corriente, la inducción no crece más; se dice entonces que el material se *satura*. Cuando la corriente cambia de sentido, repetidamente, la inducción puede repetir los valores, en tal caso el material es bueno como núcleo de un transformador.

En la práctica, el camino de regreso es diferente del de ida, y se dice que el material presenta *histéresis*⁷ magnética. La curva se llama *lazo de histéresis*. Los materiales que presentan gran histéresis se calientan cuando se los usa como núcleos de transformadores.

⁷ *Histéresis* significa retraso, y tiene la misma raíz que *historia*. *Histeria*, en cambio, es una enfermedad nerviosa que antiguamente se la creía relacionada con la matriz femenina, cuyo nombre griego es *hyster*.



- Refrigerador magnetocalórico, patentado en Suiza. Consigue de 10 a 15 grados de enfriamiento, con imanes de sólo dos tesla de inducción.



- Detector de gas, desarrollado en Grecia, basado en la diferente velocidad del sonido en cada gas, medida con un resonador magnetoelástico. El gas pasa a la cámara de detección a través de una membrana selectiva de materia porosa, la zeolita, que sólo deja pasar el gas que interesa, y no otros, ni los gases del aire.

Si se desea que el material conserve su magnetización, conviene usar uno de gran histéresis, cuyo lazo se aproxime mucho a un rectángulo.

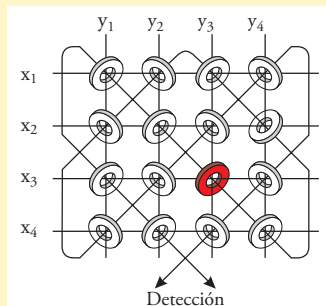
Estas características opuestas son apropiadas, respectivamente, para la fabricación de transformadores e imanes permanentes.

● Materiales magnéticos especiales

Pero, hay otros materiales magnéticos, con propiedades diferentes y útiles en algunas aplicaciones: los **magnetostrictivos**, que se acortan cuando se los magnetiza; los **magnetorresistivos**, cuya resistencia eléctrica varía con la magnetización; los **magnetoópticos**, en los que la aplicación de un campo magnético altera su transparencia, o el plano de polarización de la luz que los atraviesa, tal como ocurre, con el campo eléctrico, en las pantallas de cristal líquido; los **magnetocatólicos**, en los que el efecto de enfriamiento por desmagnetización adiabática es muy notorio y, posiblemente, se utilicen, por eso, en refrigeración. Hay también materiales **magnetoelásticos**, cuya elasticidad varía con el magnetismo. Estos últimos, sometidos a una fuerza constante, se deforman cuando se les aplica un campo magnético; y si el campo es alterno, vibran. Se hace con eso un *resonador* magnetoelástico, cuya frecuencia de oscilación depende, entre otros parámetros, del esfuerzo al que se encuentre sometido, por lo que se puede usar para medir fuerzas.

● Memorias magnéticas

Además de las cintas de datos, audio y vídeo, y los discos magnéticos flexibles y rígidos, cuyo material es de elevada histéresis y, por eso, apto para el almacenamiento de datos, se han usado, de 1950 a 1970, memorias de toros de ferrita, basadas en un ingenioso tejido de cables e imanes y que, aquí mencionamos, no sólo como curiosidad histórica, sino por su valor conceptual.



Si se hacen pasar corrientes de pulsos simultáneos, y del valor apropiado, por los cables x_3 e y_3 de la figura, se magnetiza el toro rojo, y los demás no, porque se calcula que una sola corriente no alcance a vencer la histéresis. Con cien filas y cien columnas (sólo, 200 cables) se pueden magnetizar 10.000 toros. Para leer el resultado se magnetizan a la inversa, con el mismo método, todos los toros, uno por uno. Cuando le



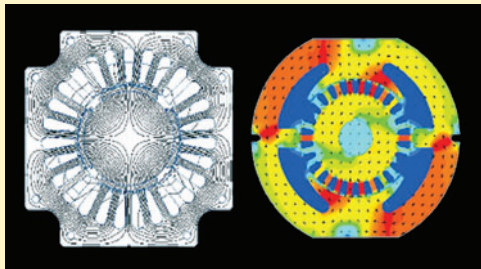
- Memoria de toros de una de las primeras computadoras de la historia, Univac III (Universal Automatic Computer), en 1960. En 1950 usaban memorias de lámparas de vacío, aún más grandes y costosas.

toque al elegido antes, ese anillo experimentará una variación magnética mayor que los otros, y generará una fuerza electromotriz mayor en el cable de detección que atraviesa todos los aros; entonces, se sabrá que ahí había un bit almacenado. Las memorias actuales, electrostáticas, son más capaces, pequeñas, veloces y baratas, y resultan miles de millones de veces más ventajosas que las de núcleos de ferrita.

● Software para la simulación y estudio de casos eléctricos y magnéticos

Internet ofrece una gran variedad de programas para tratar, matemáticamente, diversos problemas eléctricos y magnéticos, sin necesidad de resolver, personalmente, las ecuaciones. Uno, especialmente útil, que ocupa unos 20 MB de espacio en el disco rígido de la máquina, y que se puede bajar en unos minutos de la Red, es el Quick Field 5.4 para estudiantes, gratuito (la versión profesional es más potente.)

El programa se aplica a problemas electrostáticos, térmicos y magnéticos, y muestra, a elección, las líneas de campo, o sus valores en el punto que se señale con el ratón.



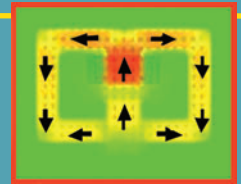
● Líneas de campo en el estudio magnético de motores. Los colores indican diferentes valores de la inducción; en azul el valor más bajo, en el aire, cuya permeabilidad es mucho menor que la del hierro.

El capítulo 16 amplía datos sobre este potente software, menciona otros programas antiguos y modernos, y da ejemplos de aplicaciones.

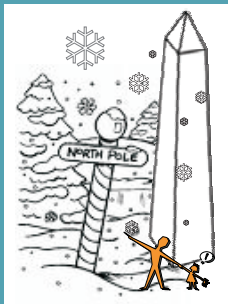
PROPUESTAS DE ESTUDIO

9.1. ¿Hubo algún momento en la historia de la Tierra, en la que Buenos Aires haya estado en el Polo Norte? *Advertencia: esta pregunta carece de significado preciso y se debe interpretar, sólo, como una invitación a discutir el tema magnético y geográfico.*

9.2. Para hacer imanes permanentes, ¿conviene un material cuya histéresis sea elevada, o baja? ¿Y qué pieza se calentará mejor en un horno de inducción, una de gran histéresis, o una cuya histéresis sea pequeña?



● Magnetización del núcleo de un transformador, simulado en el Quick Field. El usuario de ese programa dibuja el núcleo en la pantalla, e ingresa como datos la permeabilidad del hierro y la cantidad de ampere vueltas en la bobina. Las flechas indican el sentido de la inducción.



9.3. Averigüen, por favor, qué es una pinza amperométrica, cómo funciona, si su funcionamiento se relaciona con un transformador, y si sirve para corriente continua (son necesarias fuentes de información ajenas a este libro).

9.4. Si hubiera manera de tender delgados alambres superconductores entre una gran central eléctrica y nuestra ciudad, y de mantenerlos a la temperatura adecuada, ¿se podría transportar con ellos la misma energía que hoy viaja por gruesos cables de aluminio? Basen su respuesta en las condiciones que limitan el funcionamiento de un superconductor: densidad de corriente e inducción máximas.

9.5. ¿Es posible el examen de una muestra de materia inorgánica con un tomógrafo de resonancia magnética nuclear? Fundamenten su respuesta, sea afirmativa o negativa.

9.6. Experimenten si una brújula funciona o no en el interior de un coche, o de un subte. Recomendamos que escriban un resumen de los resultados de las pruebas realizadas.

● Otras fuentes de estudio e información



- La carrocería de los trenes incluye una gran masa de hierro, y en los subterráneos, además los túneles están reforzados con varillas y vigas de acero.

- Sugerimos buscar en Internet con las palabras paleomagnetismo, resonancia magnética nuclear, cambio climático, y actividad solar.

- Este sitio tiene una explicación clara y accesible de la RMN:

http://es.geocities.com/qo_10_rmn

- Informe de estudiantes avanzados sobre los principios de la superconducción; María Emilia De Rossi y Juan Manuel Conde Garrido, Estudio de la interacción entre un superconductor de alta temperatura y un imán permanente, *http://www.df.uba.ar/users/sgill/labo5_uba/informl/info/pract_especial/Superconductor_uba2k2.pdf*

- Vídeo de levitación magnética.

<http://cabalodetroyabase.blogspot.com/2007/06/prueba-de-video-youtube.html>

Electricidad y medio ambiente

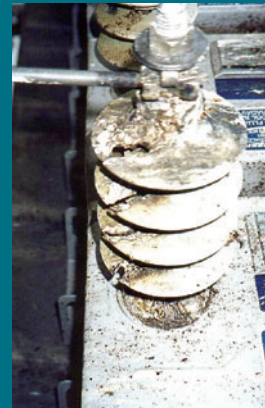
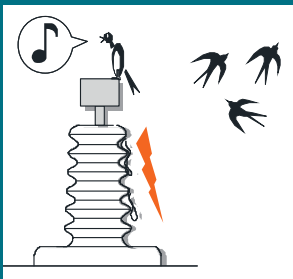


- Golondrinas en descanso, en uno de sus dos largos viajes de migración anual. Cuando alcanzan vuelo todas a la vez, sobresaltadas por algún ruido, y se aceleran, hacen sobre el cable una fuerza que triplica su peso, y a veces lo derriban.

Frecuentan las líneas de alta tensión, que las guían en parte de su camino y les sirven de posada, junto con aparatos de maniobra y bancos de capacitores. Aunque representan un riesgo de daño material, por fortuna nadie piensa en eliminarlas, espantarlas ni incomodarlas, en cambio sí en adaptar las instalaciones, para convivir humanos y pájaros.

- Las deposiciones de las aves son muy conductoras de la electricidad. Con la tensión de servicio y la lluvia, chisporrotean como una máquina de soldadura eléctrica, y volatilizan el material de los aisladores. El de la figura, a pesar de los graves daños sufridos, es de una resina que no se carboniza (la epoxicicloalifática), y permaneció en servicio hasta su reemplazo.

Muchas veces el cuidado del medio ambiente y la tecnología parecen opuestos, como cuando los cables tapan el paisaje, o se queman demasiados combustibles fósiles. Son menos conocidos los casos en que uno y otra armonizan.



Electricidad y medio ambiente

La palabra ecología la creó el biólogo Ernst Haeckel en 1869, con el significado del estudio de la relación entre los seres vivos, entre sí y con su hábitat. El término se publicó treinta años después. Pero desde hace pocos años, el diccionario de nuestra lengua recoge un sentido más usual de ese vocablo, que es la defensa y protección de la naturaleza y del medio ambiente. La preocupación por los efectos ambientales del desarrollo tecnológico es relativamente nueva en la historia. Siempre hubo precursores y pioneros defensores del entorno, pero es a partir de 1980 que la cuestión ambiental nos alarma a todos, quizá porque ya sufrimos consecuencias de descuidos importantes, o porque a partir de las computadoras personales e Internet, hay más información accesible.

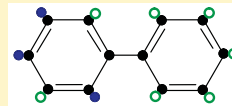
Resumimos varias preocupaciones de raíz ambiental –muchas de ellas fundadas– asociadas con la producción y el uso de la electricidad.

RECALENTAMIENTO PLANETARIO. La mayor parte de la energía eléctrica producida en el mundo proviene de la quema de carbón, gas y petróleo, de la que resulta dióxido de carbono, gas que refuerza el efecto invernadero normal de la atmósfera.

AGRESIÓN DEL PAISAJE. Los cables subterráneos son muy caros, entonces abundan los antiestéticos y peligrosos tendidos de cables a la vista.¹

USO DE ACEITES VENENOSOS. Algunas variedades de aceites aislantes podrían perjudicar la salud si llegasen a las aguas subterráneas, lo que ocurre cuando los transformadores que los usan tienen fugas. En nuestro país, ese líquido se terminó de retirar de servicio en 2006. La ley 25.670 establece que todo aparato que lo haya contenido debe tener un cartel que lo indique. En el ambiente técnico es frecuente usar expresiones inglesas; en la

foto, NO PCB significa, en nuestro idioma, SIN PCB.²



Molécula de una de las variantes del PCB.
● Carbono ● Hidrógeno ● Cloro



- Principales yacimientos de carbón. Los Estados Unidos, con el 5% de la población mundial, emiten el 25% del dióxido de carbono que produce el mundo.



- Efecto corona, causante de interferencias, en un aislador defectuoso. El fenómeno es casi invisible; la foto se tomó de noche, en pose, y durante un minuto. El campo eléctrico de radiointerferencia tiene un nivel máximo permitido, que se mide en microvolt por metro, con un receptor.

¹ A veces chocan con los cables helicópteros, avionetas, planeadores y aladeltas.

² Los PCB son 209 sustancias químicas de la familia del policlorobifenilo, cuya fórmula es $C_{12}H_{(10-n)}Cl_n$, donde n varía entre 1 y 10. Supuestamente, ese aceite no debería tomar contacto con el exterior; pero los recipientes pierden a veces, como lo delatan las manchas oscuras de polvo adherido, que se ven en algunos transformadores suburbanos. En las ciudades, los transformadores están en cámaras cerradas, algunas subterráneas. (El acrónimo PCB significa, también, *printed circuit board*, plaqueta de circuito impreso; eso dio origen a confusiones en trámites de importación.)

INTERFERENCIA. Las líneas en mal estado, sucias, con cables deshilachados o aisladores rotos, ionizan el aire cercano, y generan ondas que interfieren las comunicaciones.

RIESGO DE CONTAMINACIÓN RADIATIVA. Si bien las centrales nucleares son hoy las más limpias y las menos agresivas del ambiente, la población las ve con gran reserva, sobre todo después de varios accidentes en los que se dispersaron venenos radiactivos.³

ACCIDENTES ELÉCTRICOS. Estos percances se deben considerar como un problema ambiental de la electricidad, ya que causan la muerte de humanos y animales. Son más los daños por los efectos indirectos de la electricidad (incendio, asfixia, caídas) que por el choque directo. En los inicios de la era eléctrica, en 1900, había mucha sensibilidad popular al respecto; hoy estamos más endurecidos.

EFFECTOS BIOLÓGICOS DE LOS CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS. A lo dicho en el capítulo 3 sobre el campo eléctrico que admite la Organización Mundial de la Salud, de 5 kV/m, agreguemos que eso corresponde a campos de frecuencia menor de 300 Hz. Hasta la misma frecuencia, el límite de inducción magnética que recomienda ese organismo es de 100 microtesla, unas cinco veces la del campo terrestre. Para frecuencias mayores, el límite es de 5 miliwatt por centímetro cuadrado.⁴

Tanto las instalaciones de transmisión de energía, como los transformadores, transmisores, y todo artefacto eléctrico (eso incluye los teléfonos celulares) emiten radiaciones y campos que son inferiores a los límites higiénicos mencionados. Sin embargo, se oyen voces de alarma al respecto, y hay organizaciones que se oponen a los transformadores a la vista, a las torres de comunicaciones, y a las líneas aéreas de transporte de energía.⁵



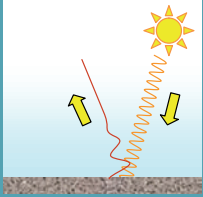
- Los cables exteriores dañan doblemente el ambiente; por una parte empeoran el paisaje; por otra, cuando los voltea una tormenta, son fuentes de riesgo de electrocución.

³ También se denuncian supuestos daños causados por la mera presencia de las centrales nucleares. La cultura hostil hacia esa forma de generación aparece en sátiras y dibujos animados de países que queman mucho carbón, o donde se teme que los residuos de la industria nuclear se empleen en la fabricación de armas en su contra.

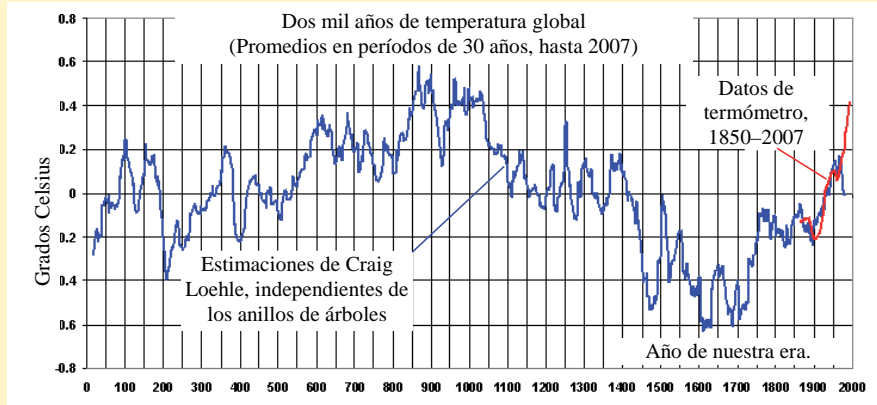
⁴ En frecuencias altas hay propagación de ondas, cuyos campos eléctrico y magnético máximos se vinculan por la relación $E/B = c$, donde c es la velocidad de la luz en el vacío. Por eso se da un único parámetro, en vez uno eléctrico y otro magnético.

⁵ Evitamos juzgar las protestas ecologistas; sólo ofrecemos datos y conceptos científicos y técnicos –o los medios para obtenerlos– para que cada uno, y cada una, adopte libremente su posición de conciencia.

● Efectos ambientales de la quema de combustibles fósiles



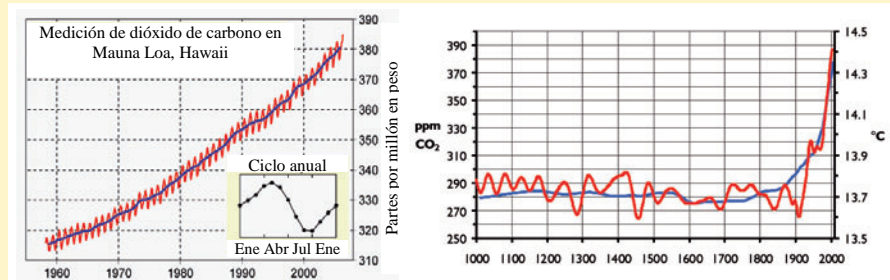
- Mecanismo del efecto invernadero. La atmósfera es muy transparente a casi toda la radiación solar, llamada de *onda corta*; la mitad de ella visible. Cuando el Sol incide sobre el suelo, lo calienta, y la Tierra emite una radiación de onda larga, que no atraviesa la atmósfera, la que absorbe esa energía, y aumenta su temperatura.



- La figura revela el llamado período cálido medieval, en el año 1000, y la *pequeña edad de hielo*, seis siglos después. En los últimos dos mil años, la temperatura varió medio grado arriba y abajo del promedio. Pero si sólo se consideran los últimos cinco siglos, se aprecia un aumento grande.

Hay registros de temperatura desde la invención del termómetro, en el siglo XVIII. Para saber cuál era la temperatura antes, se recurre a testimonios de efectos cualitativos, y más objetivamente, al estudio de los anillos de los árboles⁶ y las características químicas de los sedimentos en las cuencas.

Algunos investigadores opinan que el calentamiento global que vivimos ya ha ocurrido antes, muchas veces, y que la generación de electricidad y el uso de automóviles son relativamente inocentes en relación con ese fenómeno. Otros estudiosos –la gran mayoría– consideran que estamos frente a un fenómeno grave y nuevo, coincidente con la era industrial, y causado por la actividad humana, la cual debe cambiar, bajo la autoridad de los gobiernos y el apoyo de empresas y organizaciones, para reducir los efectos negativos que ya sufrimos.



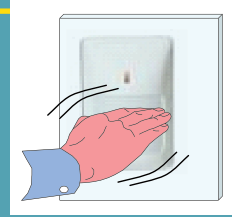
- Nivel de dióxido de carbono en la atmósfera. A partir de la Revolución Industrial del siglo XVIII, se registra un aumento del cuarenta por ciento.

⁶ Craig Loehle no confía en los anillos de los árboles, porque su grosor depende tanto de la temperatura, como de la radiación solar y las lluvias. Las estimaciones de ese investigador se basan en las propiedades químicas de los sedimentos.

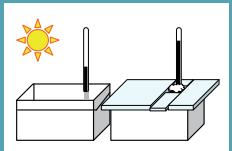
● Economía de energía eléctrica; prácticas aconsejables

Aparte de las decisiones de gobierno y del trabajo de empresas y organizaciones, los especialistas en cambios atmosféricos hacen las siguientes recomendaciones para las acciones individuales voluntarias, que podrían evitar indeseables medidas económicas disuasivas, como podrían ser los impuestos a los viajes en avión, la prohibición de circulación de coches con una sola persona a bordo, o los aumentos en electricidad y combustibles.

- Cambiar las lámparas incandescentes por fluorescentes compactas, más conocidas como lámparas de bajo consumo.
- Ajustar el termostato del aire acondicionado a una temperatura no muy extrema: 24 grados en verano, y 18 en invierno.
- Moderar el uso del agua caliente, y cerrarla mientras fregamos los platos, o nos desvestimos para el baño.
- Secar la ropa al aire libre, si tenemos lugar, en vez usar el secado eléctrico.
- Comprar productos de papel reciclado, cuya fabricación demanda menos de la mitad de la energía que requiere el papel nuevo. E imprimir sólo lo necesario.
- Consumir, si hay, alimentos frescos. El envasado y el congelado son energéticamente costosos.
- Apagar los aparatos eléctricos que no se estén usando, especialmente estufas, planchas, luces intensas y televisores de tubos de rayos catódicos. En vez de dejar una luz siempre encendida de noche, ponerle un sensor pasivo infrarrojo, que la encienda sólo si alguien se acerca.
- Viajar en transporte público; preferir los coches de menor consumo, y los que pueden cargar alconafeta. Compartir el viaje; ofrecerse a acercarse a alguien. Manejar sin aceleradas ni frenadas evitables, y evitar los embotellamientos.
- Moderar los vuelos. La mitad del valor del pasaje se quema en las turbinas.
- Plantar árboles. Reponer los que derriban las tormentas. Desalentar la ocupación de plazas y espacios verdes con puestos de comercio, por ejemplo, no comprar nada ahí, o votar autoridades que les brinden espacios adecuados a los artesanos.
- Comprar artefactos que consuman poco, aunque sean más caros. Alentar el desarrollo de productos de bajo consumo. Si somos técnicos o ingenieros, contribuir a esa tarea.
- Se discute si la basura se debe quemar o enterrar, porque en ambos casos produce gases invernadero; dióxido de carbono en el primero, y metano en el segundo. Todo lo que podemos hacer es tratar de producir menos residuos.



- Experimentación del efecto invernadero. El detector de intrusos es sensible a la onda larga, pero no a la corta. La luz de una linterna no lo excita, y deja de funcionar si se lo tapa con un vidrio. Eso demuestra que el vidrio es opaco a la onda larga, aunque sea transparente a la corta. El film de cocina es transparente a las dos ondas. Si se tapa una caja con un vidrio, se calienta más al sol, que si se la tapa con la lámina de polivinilideno.



- Los aparatos destinados a evaporar agua (tostadoras, secadores) son de elevada potencia; pero si se los usa poco tiempo, entonces no gastan mucho.



- Medidor programable y portátil de potencia eléctrica y de gasto acumulado de energía. Recibe los datos por radio, y permite saber cómodamente cuánto se consume en cada período que interese, qué potencia se desarrolla en cada instante, o cuánto gasta, (en dinero por bimestre) un artefacto dado, que se enciende durante unos segundos de prueba. Transmite en 433 MHz; tiene un alcance de 40 a 70 m, según la edificación; una memoria de 64 kB, se puede conectar a una computadora, y funciona con dos pilas. Lo fabrica Efergy, del Reino Unido.



- La calefacción con un acondicionador de aire reversible es cinco veces más económica que la de una estufa eléctrica. Esa máquina absorbe calor del exterior.

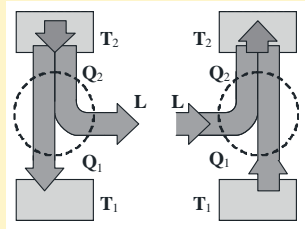
VEHÍCULO	PASAJEROS	CONSUMO, LITROS /100 km	
		TOTAL	POR PASAJERO
Barco	3.000	35.000	12
Tren	300	600	2
Avión	200	700	3,5
Ómnibus	50	60	1,2
Camioneta	5	14	2,8
Coche grande	4	10	2,5
Coche pequeño	4	6	1,5
Motocicleta	1	5	5
Bicicleta ⁷	1	3,3	0,3
A pie ⁷	1	1,5	1,5

De la tabla resulta que el viaje de una persona sola⁸ en un coche grande, es energéticamente más costoso que el de un vuelo compartido con doscientos pasajeros.

Una gran parte del desperdicio de energía obedece no tanto al despilfarro desaprensivo, ni a la falta de solidaridad, sino simplemente al desconocimiento de hechos energéticos básicos, entre ellos el de poder diferenciar, en la factura del servicio eléctrico, los impuestos y costos fijos, de lo que cambia con el consumo; o la sensación, a veces falsa, de que los artefactos grandes, o caros, consumen más que los pequeños.

Un hecho poco conocido es que los aparatos enfriadores de aire, que realmente consumen mucho cuando se les da ese uso, son en cambio muy económicos y eficientes cuando se los usa como calefactores. Hay modelos reversibles, que cumplen las dos funciones. Un simple mecanismo de válvulas de paleta, dirige el aire de dos maneras diferentes: en una, toma el calor del interior de la habitación y lo expulsa al exterior: y en la otra, toma calor de afuera, y lo vuelca adentro.

Veamos el fundamento termodinámico de esa idea.



- Esquemas termodinámicos de una máquina térmica y de una máquina frigorífica.

La figura de la izquierda representa, por ejemplo, un motor de automóvil, o una máquina de vapor, que toma un calor Q_2 de una fuente que está a una temperatura T_2 , entrega por su radiador una cantidad menor de calor, Q_1 , a una fuente más fría, de temperatura T_1 ; y brinda la diferencia de calores en la forma de un trabajo útil, L .

⁷ Se calculó el equivalente en combustible del calor desarrollado en esos ejercicios; dado que, para ser justos, la respiración animal, y otros gases que emitimos, son también fuentes de dióxido de carbono y metano, dos gases invernadero.

⁸ Esa acostumbrada práctica, y la generación de energía eléctrica a partir de la quema de combustibles, son las mayores – y casi las únicas – fuentes de gases invernadero, casi seguramente causantes del actual cambio climático.

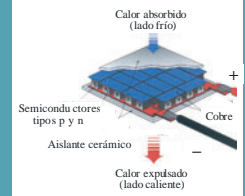
A la derecha de la misma figura, un refrigerador. Se le entrega, con un motor, un trabajo L . La máquina absorbe del ambiente que enfría una cantidad de calor Q_1 , que sumada al trabajo, expulsa al exterior en forma de calor Q_2 .

Para este último caso, la relación entre esas magnitudes, en un caso ideal, es la de la siguiente fórmula:

$$\frac{Q_2}{L} = \frac{T_2}{T_2 - T_1}$$

Por ejemplo, para una temperatura en la calle de $T_1 = 5^\circ\text{C}$, y una en la casa de $T_2 = 18^\circ\text{C}$, que en grados Kelvin (o de temperatura absoluta) equivalen, respectivamente, a 278 K y 291 K, la relación entre el calor ingresado a la vivienda y el trabajo eléctrico gastado, es de 278/23, un factor 12 de economía.

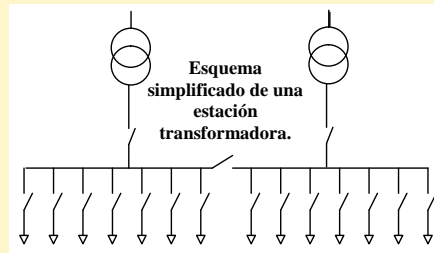
En la práctica, una máquina real permite una mejora en un factor cinco. Un acondicionador en reversa caliente, al menos, como cinco estufas de la misma potencia eléctrica.



- Celda Peltier, basada en el efecto del mismo nombre, por el cual una corriente que atraviesa la unión de dos conductores de diferente tipo, la calienta, o la enfría, según la polaridad. Se usan desde 1950 como refrigeradores reversibles, sin gases ni piezas móviles.

● Riesgos y necesidades de la electrodependencia

El ansia de la indispensable libertad hace que deploremos todo tipo de dependencia, entre ellas la tecnológica.⁹ Pero tampoco deseamos una vida salvaje e incómoda, con hambre, enfermedades y muertes en el parto. Tratamos entonces de reducir los riesgos de falta de energía, por ejemplo con dobles líneas de alta tensión, conexiones de doble alimentación, y en anillo, para la distribución de energía, y con dos grupos electrógenos de emergencia para cada hospital o lugar crítico de salud y de vida. La figura muestra un esquema típico de distribución. Llegan dos líneas de alta tensión, que alimentan un par de transformadores. Dos conjuntos de interruptores distribuyen la energía entre las ciudades. Cuando falla una línea, o un transformador, se los desconecta, y se alimenta todo desde la otra rama, hasta que arreglen el desperfecto. Hay sistemas de doble juego de barras horizontales, por si la falla ocurriera en el propio tablero de distribución, el cual se construye de modo que un percance en una parte, no propague el daño a otras.



- Cortocircuito de 690 V, 65.000 A y 0,1s, de energía equivalente a la de dos kilogramos de explosivo, en una prueba de arco interno de una celda de interruptor. No tienen que volar chapas, abrirse puertas, ni quemarse ninguna de las gasas colgadas del bastidor, que representan posibles circunstancias. La aprobación de ese ensayo es un indicio de aptitud para el servicio.

⁹ Al matemático Manuel Sadoski (1915–2005) le preguntaban siempre si las calculadoras podrían entorpecer el desarrollo de la habilidad mental, y generar una verdadera dependencia. El investigador, creador de la computación en la Argentina, después de dar ejemplos de pensamiento creativo con calculadoras, decía: *—¿Acaso no dependemos también de las vacunas, del agua potabilizada, del teléfono, y de la energía eléctrica? ¡Está bien depender de cosas buenas y útiles!*



● Salubridad

Aparte de lo dicho en relación con la emisión de gases invernadero, los aceites contaminantes y los mínimos campos electromagnéticos, mencionamos otras cuestiones vinculadas con la salubridad, la energía eléctrica, su producción y sus usos.

ADITIVOS DE RETARDO DE LLAMA. En la prevención de los daños por incendio, hay una oposición entre la reducción del riesgo de quemadura y la reducción del riesgo de intoxicación. En la tragedia de República de Rock–Magnon en el barrio de Once en Buenos Aires, a fines de 2004, nadie resultó gravemente quemado; pero sí murieron casi doscientas personas por intoxicación con los gases venenosos que despidieron los plásticos a los que se les añaden sales de bromo y otras sustancias que reducen la velocidad de propagación de la llama en caso de incendio; los mismos que se usan en la envoltura aislante de los conductores eléctricos. En ciudades de países industrializados, pero con muchas construcciones de madera y materiales combustibles, se prefiere el humo venenoso al fuego vivo. Quizás en las ciudades argentinas, en las que se emplea más el ladrillo, convenga, a la inversa, reducir las exigencias de incombustibilidad de los materiales eléctricos aislantes.

RUIDO. Los reactores, reactancias o balastos de los tubos fluorescentes grandes, o de las lámparas de mercurio, tienen una bobina con núcleo de hierro laminado que sirve para regular la corriente.¹⁰ Cuando las chapas del núcleo se aflojan, vibran y generan un ruido molesto e insalubre. Los artefactos de arranque electrónico suelen tener núcleos de ferrita, en los que el material magnético no está dividido en láminas separadas, sino en forma de polvo disperso en cerámica maciza y aislante; entonces no hacen ruido, aunque se aflojen sus partes.¹¹

MERCURIO EN LAS PILAS DE BOTÓN. La energía que suministra una pila es insignificante frente a la que se obtiene de la red por el mismo costo. Una pila botón de 2 volt y 200 mA.h puede, en teoría, suministrar doscientos miliampere durante una hora. Eso equivale a $1 \times 0,2 \text{ A} \times 2 \text{ V} = 0,4 \text{ W.h}$, ó 0,0004 kW.h. El precio de esa energía, si se la toma de la red, es de 600 microcentavos, o seis micropesos. La pila vale un peso, quince mil veces más de lo que brinda. Sin embargo, las usamos igualmente, porque no podemos llevar un reloj pulsera o una calculadora siempre enchufados en un tomacorriente. El alto costo de la energía de las pilas se justifica

¹⁰ Si no estuviera el balasto, la corriente crecería hasta la destrucción de la lámpara, o hasta que actúe alguna protección, porque los gases son CTN (de coeficiente de temperatura negativo, en inglés NTC), materiales cuya resistencia disminuye al aumentar la temperatura. A la inversa, los metales sólidos aumentan su resistencia eléctrica cuando se calientan (*balasto* significa carga, o contrapeso).

¹¹ Los núcleos magnéticos de transformadores, balastos y motores suelen estar laminados, o ser de ferritas, porque si fueran enterizos de hierro, la inducción alterna generaría en el metal fuerzas electromotrices que harían circular corrientes en remolino (*eddy currents*), con recalentamiento del material y pérdidas de energía.

- El caduceo es el símbolo de Hefestos, Hermes Trismegisto (el Tres Veces Grande), o Mercurio, dios del comercio. Ese ícono, en los envases de pilas, indica la presencia de mercurio.



- El Sombrero Loco (Dibujo de John Tenniel), personaje de Alicia en el País de las Maravillas, de Lewis Carroll, alude a un caso frecuente en la Inglaterra del siglo XIX. Muchos fabricantes de sombreros enfermaban de los nervios al manipular fieltro tratado con sales de mercurio, que se usaban como mordientes para que fijasen las tintas. Hoy preocupa el mercurio de las pilas.

por el servicio especial que brindan. El problema con ellas es que, cuando se las desecha, afectan la salubridad del medio ambiente, porque contienen mercurio, un elemento químico pesado, cuyas sales son muy tóxicas y producen enfermedades nerviosas y renales. En nuestro país hubo un caso de intoxicación grave con pañales de tela desinfectados con sales de mercurio. Medicamentos a base de mercurio como el mercurio cromato o timerosal ($C_9H_9HgNaO_2S$) cambiaron de fórmula y ya no usan mercurio. En nuestro país algunos municipios ya se ocupan de recoger las pilas gastadas, para asegurarles un destino alejado del agua que bebemos.

En la actualidad y en nuestro país, la mayor emisión de mercurio al ambiente proviene de la incineración de residuos hospitalarios.

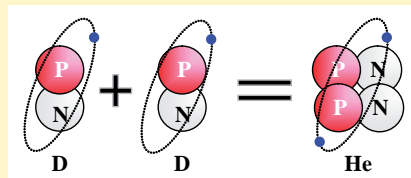
● Mercurio en las lámparas fluorescentes

Por una parte, el uso de lámparas fluorescentes compactas ahorra energía; eso hace que se quemen menos combustibles, se emitan menos gases invernadero, y se contribuya a disminuir la gravedad del cambio climático. Pero por otro lado, esas lámparas contienen mercurio, perjudicial para el medio ambiente, cuando llega al agua subterránea después de tirar a la basura esas lámparas, cuando ya no sirven.

En nuestro país, sólo unos pocos municipios tienen en marcha un sistema de recolección diferenciada de esa clase de residuos. Hay quienes, por eso, se oponen a las campañas de reducción de consumo basadas en el reemplazo de lámparas incandescentes por fluorescentes.

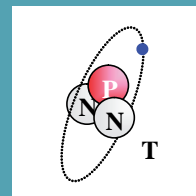
● Energía limpia de fusión

Todavía está en fase experimental, con resultados prometedores, la obtención de energía eléctrica en centrales nucleares de fusión.¹² En esas instalaciones se unen



entre sí núcleos de deuterio, para formar núcleos de helio. El deuterio es una variedad del hidrógeno, que en vez de tener un protón y un electrón, como el hidrógeno ordinario, tiene además un neutrón. Ese

¹²La palabra *fusión* tiene dos significados; uno es el de pasar un cuerpo del estado sólido al líquido. Otro es el de unión, por ejemplo la de dos empresas, o la de dos núcleos atómicos.



- La reacción de fusión para obtener energía útil también es factible con tritio, un isótopo del hidrógeno con dos neutrones, además del protón.



- En un kilogramo de gas a la temperatura ambiente hay miles de trillones de átomos de variadas velocidades, distribuidas alrededor de un promedio. Pero la probabilidad de que un solo núcleo tenga velocidad suficiente como para incrustarse en otro, es insignificante. Aun así se especuló con la *fusión fría*, realizada en un líquido por el que circula corriente. Martin Fleischmann y Stanley Pons la anunciaron a la prensa en 1989, después de que una revista especializada les rechazó un artículo. El supuesto resultado no se pudo repetir, y hoy casi toda la comunidad científica lo considera un error de medición.

isótopo¹³ del hidrógeno, está presente en el agua común, en una proporción del 0,014%. De cada siete mil átomos de hidrógeno, uno es de deuterio.

La masa de un átomo de helio es un poco menor que la masa de dos átomos de deuterio. En unidades u de masa atómica:¹⁴

Átomo de deuterio:	2,014102 u;	el doble:	4,028204 u
Átomo de helio:			4,002603 u
Diferencia:			0,025501 u (<i>más del 0,5%</i>)

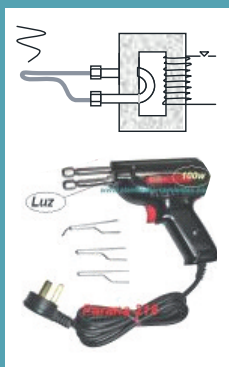
De cada 18 kilogramos de agua, dos son de hidrógeno, en cada uno de los cuales hay 0,00014 kg de deuterio. El medio por ciento de eso es 0,0000014 kg de materia, que convertida en energía con la célebre fórmula de Einstein $E = mc^2$, resulta de más de 10^{11} joule, o watt segundo, que equivalen a 35.000 kilowatt hora, suficientes para alimentar una casa mediana durante setenta bimestres, u once años. Y sólo con un balde de agua de la canilla.

Los residuos de esa reacción nuclear son inocuos, y se pueden ventilar a la atmósfera sin prevenciones. Pero para acercar suficientemente dos núcleos de deuterio, en contra de la formidable fuerza de repulsión eléctrica, que podríamos sentir en los dedos,¹⁵ hay que arrojar los núcleos unos contra otros con suficiente velocidad, y para eso hay que calentar un gas a cien millones de grados.

● Un posible generador de plasma

Recordemos (capítulo 2) que un plasma es un gas totalmente ionizado, lo que ocurre (entre otros casos), cuando se encuentra a una elevada temperatura. En esas condiciones, conduce bien la electricidad,¹⁶ porque está compuesto de iones libres de ambas polaridades, que reciben fuerzas de los campos eléctricos presentes.

En el reactor de cámara toroidal el plasma se encuentra en la circunferencia central del toro, donde está la flecha azul de la figura. Hay una bobina primaria, marcada en rojo, arrollada alrededor de un núcleo paramagnético. El anillo de plasma conductor funciona como un secundario de una sola espira en cortocir-



- Como el reactor, el transformador del soldador instantáneo tiene un secundario de una sola espira en cortocircuito.

¹³ *Isótopo*, en griego, significa *en el mismo lugar*. Los elementos químicos cuyos núcleos tienen igual cantidad de protones, y sólo difieren en la de neutrones, se consideran el mismo elemento químico, y ocupan la misma casilla en la tabla periódica de los elementos.

¹⁴ Una unidad de masa atómica es la duodécima parte de la masa de un átomo de carbono 12, y vale $1 u = 1,660\,737\,86 \times 10^{-27}$ kg.

¹⁵ Los protones tienen carga muy pequeña; pero cuando se fusionan están muy cerca uno del otro.

¹⁶ Por eso a veces no se sabe si un incendio fue causado por un cortocircuito, o si el cortocircuito ocurrió cuando el fuego ofreció un camino conductor de la electricidad, en una instalación en buen estado.

cuito, que se calienta para el arranque cuando se alimenta la bobina primaria con tensión alterna de alta frecuencia.

En anillo azul representa una de muchas bobinas alrededor del toro, que en conjunto generan una inducción en la dirección del hilo de plasma. Y así como las partículas cargadas que vienen del Sol siguen las líneas del campo magnético terrestre, la inducción de las bobinas alrededor del toro ayudan a mantener el hilo de plasma bien delgado, y alejado de las paredes, para que el plasma no se enfríe, y las paredes no se quemen. (La flecha roja indica el sentido de circulación de la corriente en los anillos azules.)

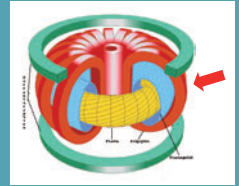
Los cables paralelos por los que circula corriente, se atraen. Por la misma razón, el hilo de plasma tiende a mantenerse unido por ese efecto de encogimiento radial.

Cuando el plasma alcanza unos cien millones de grados, comienzan las reacciones de fusión, y genera energía propia que ya no viene de afuera.

Esa condición ya se alcanzó experimentalmente durante tiempos muy breves, desde hace décadas.

El calor generado en la reacción puede calentar un fluido de intercambio, para hervir agua y generar vapor que aprovechen turbinas, pero se investiga también la posibilidad de extraer directamente la energía eléctrica del propio reactor, por medios electromagnéticos y sin turbinas, si se consigue la adecuada oscilación de una corriente en el plasma.

Hay decenas de países, cada uno con varios reactores de fusión en marcha, que procuran avanzar en el desarrollo de prototipos que funcionen de manera estable, y no por breves períodos experimentales. Se calcula que en 2020 estaría resuelta esa etapa, e iniciada la de obtención de un reactor de utilidad industrial.

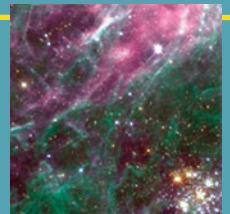


- Para poder hacer circular las grandes corrientes necesarias para generar campos magnéticos intensos, se usan superconductores enfriados con nitrógeno líquido.

● Otras aplicaciones del plasma

Si tenemos en cuenta que cualquier gas incandescente es un plasma, hay varias aplicaciones de la materia en ese estado de agregación.

CORTE DE PLASMA. Los equipos de corte de plasma tienen una boquilla o soplete por el que sale gas a presión, que se calienta hasta 30.000 grados con un generador eléctrico de alta frecuencia conectado a un electrodo resistente a la oxidación y a las altas temperaturas. Consiguen concentrar la energía en una zona muy pequeña, y algo alejada del electrodo, por lo que éste no se funde. El método sirve para hacer cortes muy delgados y precisos. En la foto, un equipo portátil, de 220 V y 3,3 kW, que corta metales de hasta un centímetro de grosor.



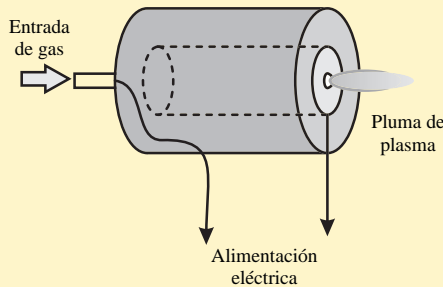
- El plasma es el estado más común de la materia en el universo, tanto en las estrellas, como en otras regiones amplias del espacio, y en la parte más alta de las atmósferas de los planetas.

PANTALLAS DE PLASMA. El capítulo 2 muestra un esquema del funcionamiento para el caso de pantallas de televisores y monitores. La técnica se aplica a otros tipos de pantallas, además de las gráficas; por ejemplo en indicadores para equipos de sonido, y en tableros de mando de máquinas. Cada signo luminoso se compone de dos electrodos; uno de ellos común a todos los signos, o a un grupo de ellos, que suele ser una reja muy fina y casi transparente. La presión del gas varía, según los modelos, ente 100 y 500 torr.¹⁷ La tensión de funcionamiento es de algunos centenares de voltios, suficientes para ionizar el gas cuando se aplica a dos electrodos muy cercanos entre sí. Los iones, y los fotones ultravioleta que resultan del proceso, chocan contra un material fluorescente, y excitan sus átomos. Cuando los átomos vuelven, casi al instante, a su estado de reposo, emiten energía en forma de luz, de un color típico para cada material fluorescente.

PLASMA FRÍO. Se emplea con fines de desinfección de tejidos vivos, esterilización, tratamiento de superficies para limpieza profunda, y erosión microscópica para aumentar la adherencia de pinturas. Para conseguir un alto grado de ionización se emplean pulsos muy breves de alta tensión, para que los efectos térmicos acumulados de las corrientes sean muy pequeños.



- El plasma de una lámpara de mercurio alcanza una temperatura, llamada *temperatura de color*, de unos 6.000°C. Sin embargo, la del tubo de cuarzo que lo contiene, no llega a 300°C. No hay contradicción en ese hecho, porque el gas no está en equilibrio térmico con el recipiente, dado que emite radiación. Lo mismo ocurre con la *termosfera* de nuestro planeta. Esa capa de la atmósfera, ubicada a unos 300 km de altura, es un plasma de 1.500°C, que no nos quema porque no está en equilibrio térmico con la Tierra.



- Generador de plasma frío desarrollado por Mounir Laroussi y XinPei Lu, de la Old Dominion University, en Virginia, Estados Unidos. Unos pulsos de varios miles de volt y un microsegundo de duración, ionizan gas de helio, que ingresa a presión.

PROPUESTAS DE ESTUDIO

10.1. Les proponemos rehacer los gráficos de este capítulo, para que incluyan el cero, y estimen si causan la misma impresión subjetiva que como se los presenta habitualmente, con el cero fuera de la escala.

10.2. Un acondicionador de aire de frío y calor, de 1.260 W y 3.000 frigorías por hora vale \$ 2.000; y su instalación, \$ 600. Una estufa de aceite de 1.500 W cuesta \$ 200, y se la mantiene encendida mil horas anuales. Una frigoría, lo mismo que

¹⁷ Un torr es la presión de una columna de un milímetro de mercurio.

una caloría, equivale a 4.185 J, o W.s. La energía eléctrica cuesta \$ 0,15 el kWh. Con los datos de este capítulo acerca de la eficiencia calefactora de un acondicionador, teniendo en cuenta sólo el factor económico personal, y sin contar la ventaja de disponer de frío en verano, ¿a partir de cuánto tiempo el cambio de la estufa por el acondicionador empezaría a resultar ventajoso? (a) seis meses, (b) un año; (c) tres años; (d) diez años; (e) más de diez años.

10.3. ¿En qué se gasta más energía eléctrica, en mantener una luz encendida de noche en el vestíbulo, o en tostar el pan del desayuno? (por favor, estimen los datos necesarios).

10.4. La energía cinética de una partícula se calcula como $E_c = \frac{1}{2} m v^2$, donde m y v son su masa y su velocidad. Por otra parte la energía cinética se relaciona con la temperatura mediante $E_c = K.T$, donde K es la constante de Boltzmann, $1,38065 \times 10^{-23}$ J/K, y T la temperatura Kelvin o absoluta. La masa de un núcleo de deuterio es de $1,66 \times 10^{-27}$ kg ¿Cuánto vale, aproximadamente, la velocidad de los núcleos de deuterio en un gas a cien millones de grados?

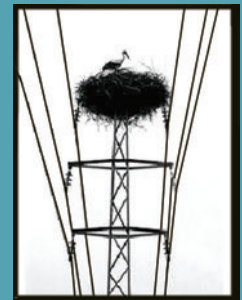
10.5. En un movimiento circular, la aceleración vale v^2/R , donde v es la velocidad, y R el radio. Si el reactor de fusión tiene un radio de diez metros, ¿cuánto vale la aceleración de un núcleo de deuterio?

10.6. La fuerza de Lorentz vale $F = q.v.B$, donde q es la carga, v la velocidad, y B la inducción magnética. La fuerza, la masa y la aceleración se vinculan con la segunda ley de Newton, $F = m.a$. ¿Cuánto vale la inducción magnética necesaria para mantener en movimiento circular de diez metros de radio un núcleo de deuterio de un gas de cien millones de grados?

10.7. Una persona llegó a su trabajo a las tres de la tarde, vio una sala con todos los tubos fluorescentes encendidos, y apagó esas luces, que juzgó innecesarias en ese momento del día. Enseguida le pidieron que las volviese a encender, porque al caer la tarde la compañía eléctrica reduce la tensión de la red para disminuir el consumo, o la tensión baja sin que la compañía se lo proponga, cuando se cargan las líneas con mucho consumo; y entonces los tubos no arrancarían. Comenten el caso.



- Una consecuencia ecológica de los embalses, es el corte de la ruta de desove de los peces. El ascensor de la figura genera una corriente con bombas; los peces nadan en contra, los captura, los sube, y los libera del otro lado del dique, aguas arriba.



- Nido de aves en una línea de media tensión. Se discute si hay que dejarlo en beneficio de los pájaros. En nuestro país se los quita, porque las interrupciones del servicio eléctrico son costosas no sólo en bienes materiales, sino también en salud y vidas humanas. El llamado pájaro espino, para hacer su nido, incluye alambres que encuentra, con los que a veces produce cortocircuitos.

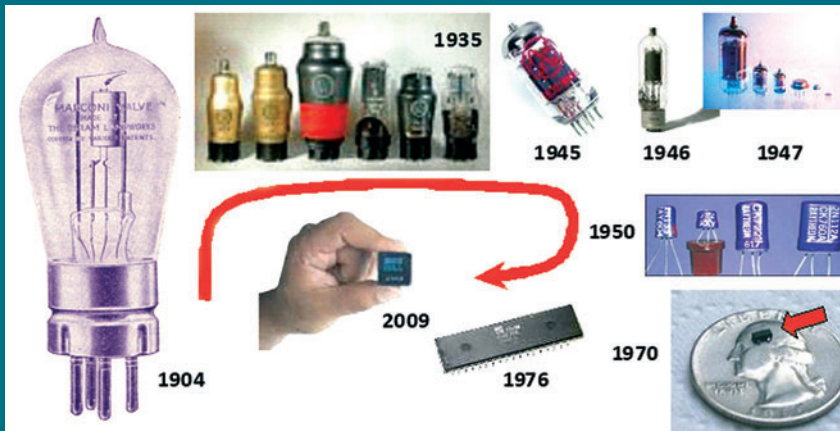
● Otras fuentes de estudio e información

- Sugerimos buscar en Internet con las palabras: medio ambiente, electricidad, cambio climático, calentamiento global, PCB, fusión nuclear, tokamak y stellamak (son diferentes modelos de reactores).
- Explicación de los avances en la construcción de reactores de fusión nuclear. (Manifiesta tendencias en favor de la fusión fría, descalificada por la comunidad científica mundial.): <http://www.arrakis.es/~lallave/nuclear/fusion.htm>
- Informe de funcionarios y especialistas argentinos de primer nivel, en materia de salubridad ambiental electromagnética:
http://www.cnc.gov.ar/normativa/pdf/sc0202_95AI.pdf

Historia de la electrónica



- Edwin Howard Armstrong y Marion MacInnis, en su luna de miel en Palm Beach, Florida, Estados Unidos, posan para una propaganda comercial. El inventor de la radio FM, muy orgulloso del *pequeño* tamaño del aparato, regala a su esposa el primer receptor portátil de la historia.



- La primera válvula o *lámpara* de radio, con la que se amplificaban las ondas y el sonido, se inventó en 1904. Si-guieron otras más eficientes y pequeñas; y, después, los transistores, de igual función, pero de menor tamaño y consumo. En 1976 se fabricó el circuito integrado Z 80, con 8.000 transistores que, aún, sirve de computadora. Hoy hay reproductores de sonido y radio que contienen el equivalente de veinte mil millones de transistores y almacenan igual cantidad de bits de información, suficientes para cien horas de grabación de sonido. Los datos históricos ayudan a predecir algunos hechos futuros, a valorar el trabajo de los precursores y a equi-librar las ansias de bienes tecnológicos novedosos que quizás en poco tiempo resulten anticuados.

Historia de la electrónica

El término *electrónica* se empezó a usar en 1910 cuando se consiguió explicar el fenómeno que desde 1895 se conocía como *efecto Edison*, o *efecto azul*.

Desde mediados del siglo XIX, cuando la energía eléctrica se empezó a distribuir y vender y, hasta los comienzos del siglo XX, su empleo en iluminación se limitaba a los arcos voltaicos,¹ los que no se podían usar en puestos de venta de combustible, salas de pintura, ni ambientes con gases inflamables, porque un arco es una chispa permanente. Un alambre se calienta cuando conduce una corriente eléctrica, y se puede poner incandescente y emitir luz. Ése era un hecho muy conocido, que se intentó usar para el alumbrado. Para que el alambre no se quemase, lo encerraban en una ampolla al vacío. No se quemaba, pero se volatilizaba, o se fundía. Fue Edison quien consiguió por primera vez, en 1879, mantener encendida durante dos días una lámpara de filamento. Para eso, en vez de metal usó carbón, cuyo punto de fusión es de 3.500 °C.²

Las fibras de bambú y palma carbonizadas le sirvieron para hacer hilos muy resistentes y duraderos. Después de varias pruebas con filamentos de diferente grosor y longitud, Edison fabricó la primera lámpara comercial, tan difundida enseguida en todo el mundo, que su encendido se constituyó, durante mucho, en el principal destino de la energía eléctrica.



- Thomas Alva Edison (1847–1931), uno de los fundadores de la General Electric, perfeccionaba ideas propias y ajenas. Inventó el fonógrafo y la máquina de votar, y mejoró el telégrafo y las pilas eléctricas.



- Walt Disney (1901–1966) quizá se inspiró en Edison para crear sus personajes Giro Sin Tornillo, el inventor, y su ayudante de filamento en bucle y pico de vacío arriba de la ampolla, igual que la primera lámpara eléctrica.



- Lámpara de filamento de carbón inventada por Edison. El zócalo de bayoneta resiste sin aflojarse las vibraciones en los vagones de tren.

● Ennegrecimiento interno del vidrio

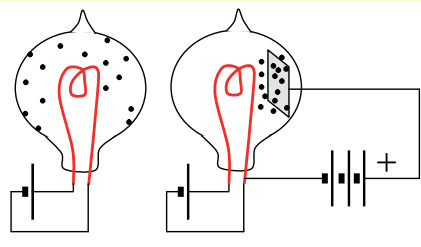
En esa primitiva lámpara, a las pocas semanas de uso, el carbón volatilizado del filamento manchaba el vidrio, como se ve en la foto, y disminuía la intensidad de la iluminación. Al fabricarlas, se les ponía un poco de arena adentro, para lim-

¹ Descrito en el capítulo 5.

² Después se usó, hasta hoy, el tungsteno, o wolframio, un metal cuya temperatura de fusión es de 3.483 °C, casi igual que la del carbón.

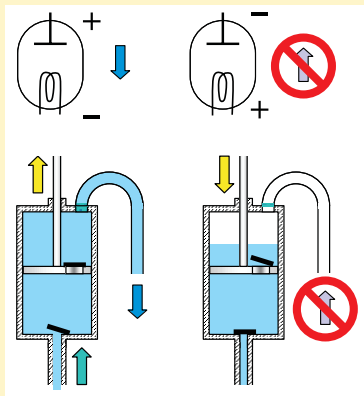
piarlas cada tanto con movimientos; pero esa operación era incómoda, y aumentaba el riesgo de rotura del filamento, o de la ampolla.

Edison imaginó que las partículas de carbón desprendidas del filamento se podrían capturar electrostáticamente (como el humo de una chimenea) antes de que chocasen contra el vidrio. Para eso agregó a la lámpara una placa, y experimentó con unos 100 V de ambas polaridades, positiva y negativa, con respecto al filamento.



Capturó las partículas. Pero en ese momento ocurrió algo sorprendente, que cambió por completo el curso de su investigación.

Lo llamativo fue que cuando la placa era positiva con respecto al filamento, circulaba corriente entre esos dos electrodos; y además se veía un fulgor azul cerca de los conductores. Pero cuando la polaridad se invertía, no circulaba corriente, ni se veía fulgor.



● La válvula de Edison permite el flujo en un solo sentido, como en una bomba de agua. (Las flechas indican el sentido convencional de la corriente, desde el positivo hacia el negativo).

La lámpara con la placa se comporta, entonces, como una *válvula* de una cámara de pelota o de neumático, o de una bomba de agua, que deja pasar el fluido en un sentido, pero le impide el paso en el sentido opuesto.

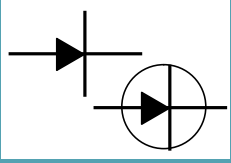
Se supuso que las partículas de carbón quedaban convertidas en iones, o sea cargadas eléctricamente, y que la corriente eléctrica observada estaba era el flujo de esas partículas. Por eso, la lámpara con placa se llamó *válvula termoiónica*.

No se sabía el porqué las partículas cargadas de carbón viajaban, supuestamente, en uno solo de los dos posibles sentidos.

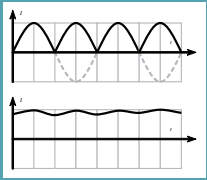
Después, con mediciones cuidadosas y la aplicación de campos magnéticos, se supo que la corriente debida a las partículas de carbón es muy pequeña, y que casi toda la conducción se debe al flujo de electrones, que salen del filamento caliente y los atrae la placa; la cual, como está fría, no los emite. Se propuso entonces (contra la costumbre y sin éxito) el nombre de *válvula termoelectrónica* para ese aparato. Esta válvula en particular, la primera histórica, y la más sencilla, formada por un



● Otras antiguas formas de conseguir que la corriente circule en un solo sentido: el diodo de *piedra galena*, que se toca con un alambre delgado, el *bigote de gato*; el diodo de llama; y el diodo de óxido de germanio. Los dos primeros no manejan tanta corriente como una válvula termoiónica o termoelectrónica; y el de selenio ofrece mucha resistencia.



- Símbolo de un diodo, o elemento que conduce en un solo sentido, cualquiera sea su tipo, incluidas las válvulas de vacío y de gas. El icono proviene del *bigote de gato* que toca un cristal de galena. Cuando se lo encierra en un círculo, significa que está encapsulado. El sentido convencional de circulación de la corriente es de positivo a negativo; el opuesto al del movimiento de los electrones.



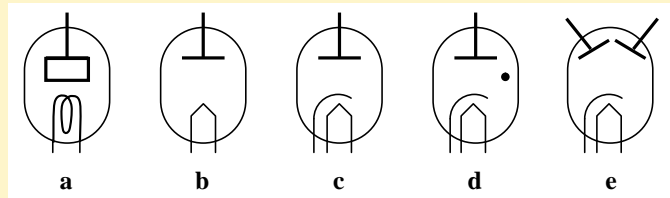
- A pesar de que la representación de la tensión de salida no es una recta, a los elementos que dejan pasar corriente en sólo un sentido se los llama *rectificadores*. El nombre proviene de circuitos más avanzados, en los que la salida pulsante se convierte realmente en algo parecido a una recta, con la ayuda de *filtros*, que almacenan carga durante parte del período, y la entregan en otros instantes.

filamento y una placa, se llamó también *diodo*, por estar compuesta de dos electrodos, ánodo y cátodo. El filamento es el cátodo, o polo negativo; y la placa, el ánodo, o polo positivo.³

La válvula eléctrica, como elemento de un circuito que deja pasar la corriente en un sentido, y lo impide en el opuesto, tenía una utilidad mayúscula a principios del siglo XX, porque se la empezó a usar para detectar ondas electromagnéticas generadas con chispas, con la posibilidad de usarlas en comunicaciones sin necesidad de cables. Nada de eso existía todavía; aunque el escritor de fantasía científica Julio Verne (1828–1905), ya les había dado nombre: *radiotelegrafía* y *radiotelefonía*, o telegrafía y telefonía inalámbricas.

En la polémica sobre si convenía distribuir la energía eléctrica en forma de corriente alterna o continua, Edison era partidario de la continua. Cuando se impuso el criterio opuesto, desarrolló válvulas verdaderamente termoiónicas, en las que las partículas que transportan la corriente no son electrones, sino átomos ionizados. La más popular fue la válvula de gas de mercurio.

● Diodos termoelectrónicos y termoiónicos

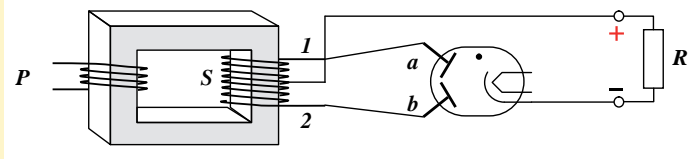


- La válvula diodo y sus símbolos. (a) Representación primitiva. (b) Se simplifica el dibujo del filamento y el de la placa. (c) Válvula de calentamiento indirecto: el filamento se aloja dentro de un cilindro, que funciona como cátodo, y está hecho de un material apropiado para la emisión de electrones. (d) El punto indica la presencia de gas; por ejemplo, de mercurio. (e) Válvula de doble placa, útil para la conversión de corriente alterna en continua.

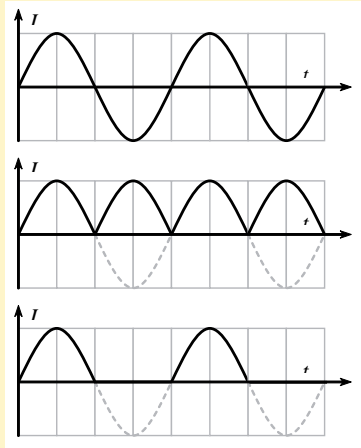
El uso de mercurio en las válvulas permite manejar corrientes grandes, de decenas y centenares de amperes, más difíciles de lograr con el desplazamiento de electrones solos, puesto que no salen muchos electrones del cátodo caliente, mientras que los iones de mercurio se producen en mayor cantidad, al volatilizarse suficiente metal líquido con las chispas.⁴

³ El capítulo 2 explica el origen de esas palabras.

⁴ La teoría completa del porqué los iones y electrones viajan en uno de los dos sentidos, con preferencia al opuesto, es algo compleja, y se basa en la energía necesaria para arrancar electrones de la superficie de diferentes materiales, y en la distancia que recorren esas partículas antes de chocar con otras, e ionizarlas. Las válvulas de vapor de mercurio se emplearon mucho antes de que se supiera en detalle cómo funcionan. (Véase el apéndice sobre descargas en gases.)



● Una válvula de doble placa convierte corriente alterna en corriente pulsante de polaridad constante. El primario P del transformador se alimenta con una tensión alterna. El secundario, S , tiene un punto medio y dos extremos, 1 y 2. Cuando 1 es positivo con respecto al centro, conduce la placa a . Cuando el positivo es 2, conduce la placa b . El resistor R recibe tensión de polaridad constante. (Se omite representar la alimentación del filamento).

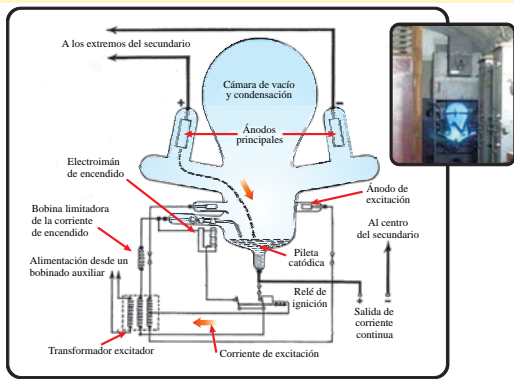


● Tensión, en función del tiempo, en el primario del transformador.

● Tensión a la salida, sobre el resistor R .

● Tensión que habría a la salida, sobre el resistor R , si la válvula tuviera una sola placa.

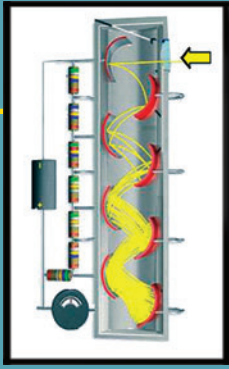
Hoy, y desde hace pocos años, el uso del mercurio se desalienta en aquellos casos en que se puede sustituir por otro material que, si se dispersase, sería menos dañino para el ambiente. Pero todavía se lo emplea en antiguas válvulas de conversión de corriente alterna en continua. Ya no se fabrican nuevas, porque se las reemplaza, con ventajas, por diodos de silicio, que se describen en capítulos siguientes.



● Vistoso aparato, de los que hay aún algunos en servicio, que convierte corriente alterna en continua. La ampolla de vidrio al vacío, del tamaño de una pelota de básquet, contiene mercurio líquido. Unos electrodos movidos por electroimanes encienden chispas eléctricas, y producen iones de ese metal. Las bobinas, con su autoinductancia, hacen que la corriente siga circulando aun cuando la tensión pasa por cero, y así el arco no se apaga. Las placas son de carbón.

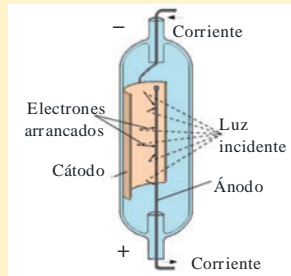


● Cuando una lámpara de mercurio se agota, suele actuar como válvula: conduce en un solo sentido, y parpadea 25 veces por segundo, la mitad de los 50 Hz de la línea.



El tubo fotomultiplicador es una ingeniosa variante de la fotocélula. La luz desprende electrones del cátodo; éstos se aceleran en un campo eléctrico, chocan contra otros electrodos, arrancan electrones secundarios, y el efecto se multiplica en avalancha. Se detecta, así, un único fotón, o partícula cuántica de luz.

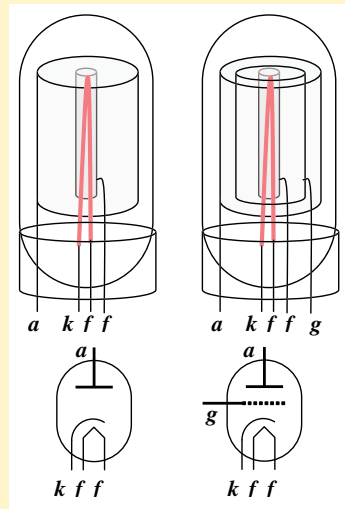
● La célula fotoeléctrica, o fotocélula



Hoy, por *célula (o celda) fotoeléctrica*, independientemente de cuál sea su principio de funcionamiento, se entiende cualquier dispositivo que detecte luz, como los que encienden una lámpara automáticamente cuando anochece.⁵ La original, el *fototubo*, es diodo de cátodo frío, que conduce corriente a través del vacío cuando incide un haz de luz sobre su placa, que es negativa, a diferencia de la del diodo de Edison, conectada al positivo.

La fotocélula se usaba —y aún se usa— en la industria, y tuvo gran valor teórico en 1905, cuando Albert Einstein dio una explicación cuántica de su funcionamiento: para arrancar un electrón, un fotón tiene que tener una energía igual o mayor que el trabajo que cuesta separar el electrón de la superficie de la placa.

● Control del flujo electrónico con una rejilla, o grilla



Al principio por pura curiosidad, y después con objetivos inmediatos muy definidos en la amplificación del sonido y de las ondas de radio, los investigadores agregaron más electrodos a la primitiva válvula de vacío, con el fin de controlar el flujo de electrones entre el cátodo y el ánodo.

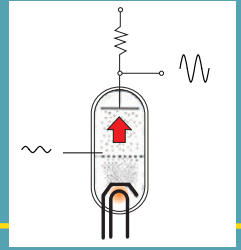
A la izquierda, una válvula de calentamiento indirecto. El filamento incandescente, **ff**, calienta una vaina cilíndrica, el cátodo **k**, el cual emite electrones, que atrae la placa o ánodo **a**.

A la derecha, entre el cátodo y el ánodo se agrega una rejilla o grilla **g**, que se mantiene negativa con respecto al cátodo. Con eso la grilla rechaza los electrones que emite el cátodo, y la corriente de placa es pequeña, y a veces nula.

El agregado de la rejilla brindó un efecto muy ventajoso, que permitió construir el primer amplificador electrónico. Cuando la tensión de la grilla varía muy poco, digamos desde -5 V hasta -4 V , la corriente que circula por la placa varía mucho,

⁵ Los más comunes hasta hace diez años eran los fotorresistores, de un material cuya resistencia eléctrica cambia con la iluminación. Actualmente se usan fotodiodos, unos cristales que conducen corriente en un solo sentido cuando les da la luz, y en ninguno a oscuras. También hay fototransistores, de funcionamiento semejante.

por ejemplo desde 50 mA hasta 240 mA. Entonces, si esa corriente circula por un resistor de 1.000 Ω , la tensión varía de 50 a 250 V. Así, una variación de 1 V se convierte en una variación de 200 V, que es mucho mayor. A todo esto, la corriente de grilla es nula, o insignificante, por lo que se amplifican señales de muy débil potencia. Nació así, en 1904, el *triódo amplificador*.



- Funcionamiento del triodo amplificador. La grilla, negativa con respecto al cátodo, rechaza los electrones, y les dificulta el libre paso hacia la placa. Cuando la tensión de la grilla varía, el flujo de electrones cambia a la vez.

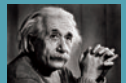
La grilla actúa como una compuerta, que se puede abrir y cerrar con pequeño esfuerzo, y controlar con ella un gran caudal.



Dryden



Newton



Einstein

- La frase: “Año milagroso”, es de un poema de 1667 de John Dryden, que se refiere a la sobrevida de Londres a la peste y el incendio. Se usó después en latín (*annus mirabilis*) para calificar la producción científica de Isaac Newton en 1684; y hace poco, para conmemorar los trabajos de Einstein de 1905.

● El triodo

Muchos opinan que la verdadera revolución de las comunicaciones⁶ comenzó en 1904, y no en 1800 con la pila eléctrica de Alessandro Volta, cuya consecuencia en ese campo, la aparición del telégrafo Morse, demoró 35 años.

El triodo se difundió velozmente, y se le hallaron pronto variadas aplicaciones. Se usó para amplificar el sonido en estaciones de tren, salas de espectáculos y estadios deportivos; y para generar ondas de radio, detectarlas desde lejos, y amplificarlas. En 1941 se emplearon casi veinte mil triodos diminutos, no más grandes que un foquito de linterna, para construir la primera computadora electrónica, Eniac (*Electronic Numerical Integrator And Computer*)⁷, para uso militar. En 1950, varios años después de terminada la Segunda Guerra Mundial, se construyó una máquina de aplicaciones pacíficas y más amplias, Univac I (*Universal Automatic Computer I*). Fueron años de gran crecimiento tecnológico y científico.

● Amplificador de triodo, el primer amplificador electrónico

Para usar un triodo como amplificador (por ejemplo de sonido) es necesaria, en primer lugar, la señal⁸ eléctrica que se quiere amplificar, como la que provee un micrófono, por sí misma insuficiente como para accionar un parlante.

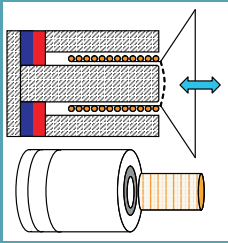
Hace falta, también, una tensión pequeña, por ejemplo 6 V, para alimentar el filamento del triodo. Además, se necesita una tensión bastante mayor, 100 ó 200 V, para alimentar la placa. Por último, se usa una tensión pequeña, para polarizar la grilla, negativamente, con respecto al cátodo

La figura muestra un posible esquema de un amplificador de triodo. Una batería de 6 V alimenta el filamento calefactor. Una de 75 V, polariza la placa a través

⁶ Al año siguiente, en 1905, Albert Einstein enunció su célebre teoría de la relatividad, y obtuvo el Premio Nobel de Física por explicar el efecto fotoeléctrico, fenómeno por el cual la luz arranca electrones del cátodo frío de un diodo de vacío. El invento del triodo formó parte de una serie de trabajos muy fértiles en ciencia y tecnología.

⁷ En ese año se empieza a usar la palabra *computadora*, que en España llaman ordenador.

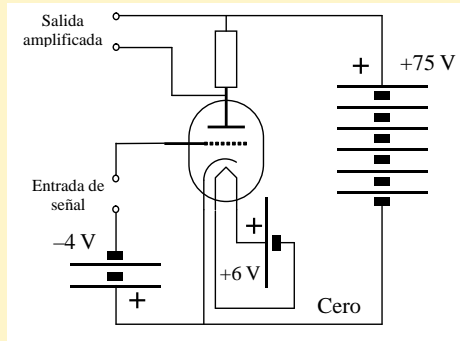
⁸ En este ámbito llamamos *señal* a cualquier tensión, corriente, u otra cantidad eléctrica variable y de pequeña magnitud, portadora de información.



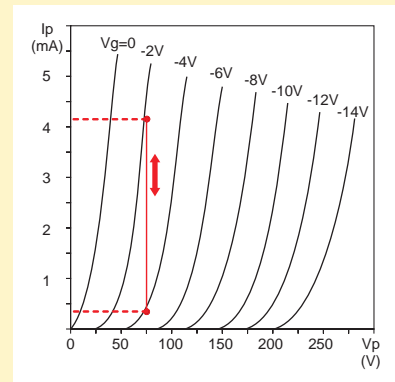
- Los parlantes más comunes tienen una bobina móvil inmersa en un campo magnético. Cuando por la bobina pasa una corriente variable, aparece sobre ella una fuerza también variable, que hace que la bobina vibre y, con ella, también un cono flexible solidario, que produce entonces sonido. Los parlantes son reversibles. Si se habla frente al cono, éste vibra, acompañado por la bobina móvil. Como se mueve en un campo magnético, en sus espiras se induce una fuerza electromotriz, que se puede amplificar con un triodo, para alimentar otro parlante.



- Doble triodo 2C34, fabricado por la Radio Corporation of America (RCA).



El gráfico representa, para un cierto triodo, la corriente de placa, I_p , en función de la tensión de placa, V_p , para varias tensiones diferentes de grilla, V_g . Por ejemplo, si la tensión de placa es de 75 V, cuando la tensión de grilla varía entre -2 V y -4 V, la corriente de placa cambia entre 0,4 mA y 4,2 mA. Si estas corrientes circulan por un resistor de 10.000 ohm, la tensión en ese resistor varía entre 4 V y 42 V, o sea 38 V. La señal que ingresa por grilla se amplifica, en este ejemplo, 19 veces.



En vez de tres baterías, se puede usar una sola fuente de alimentación, con varias salidas.

La ganancia, o factor de amplificación de un triodo, se designa con la letra griega μ (mu), y depende de las características constructivas, de la resistencia en serie con la placa, y de las tensiones con las que se polarizan ésta y la grilla. Un valor típico es 50. Si se quiere una ganancia mayor, se pueden disponer varios triodos, uno a continuación de otro, y se obtienen así ganancias de un millón, o más. En ese caso hay que blindar las conexiones con mallas o escudos conductores, para amplificar solamente las señales, y no también los ruidos.⁹

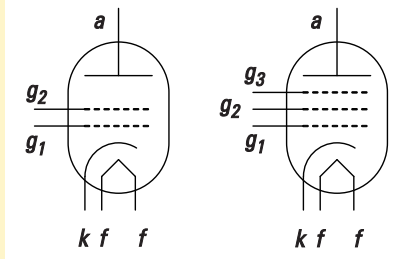
Un truco de los reparadores de radios y amplificadores para probar una válvula, era apoyar un dedo en el casquillo de la grilla. Si la válvula funcionaba, se oía un zumbido fuerte por el parlante, resultado de la amplificación de la corriente alterna captada por el cuerpo de la persona, en un ambiente poblado de cables de alimentación eléctrica.

de un resistor limitador de corriente. Otra, de poca tensión, polariza negativamente la grilla. Cuando a esta última tensión, se le suma la tensión alterna de la señal de entrada, la válvula conduce proporcionalmente, y entre los extremos del resistor aparecen cambios de tensión mucho mayores que los de la señal, pero de la misma forma de variación en el tiempo.

⁹ Algunas de las válvulas de la foto de la primera página de este capítulo, tienen como blindaje una capa de pintura metálica. La conexión de la grilla se hace por arriba, para alejarla de otros cables que podrían causar perturbaciones. Los blindajes de chapa metálica son más efectivos.

• Sucesores del triodo: tetrodos y pentodos

El agregado de más grillas entre el cátodo y el ánodo, mejoró mucho lo que se conseguía con el primitivo amplificador de triodo.

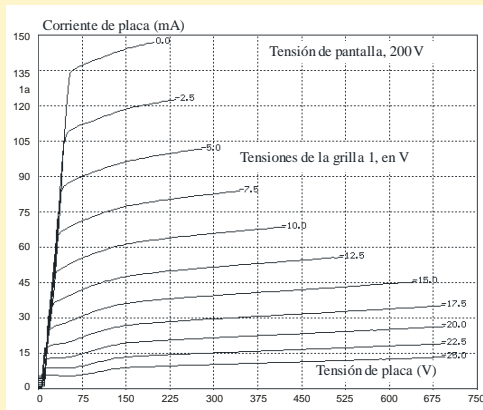


• **Válvulas tetrodo y pentodo.** *ff*: filamento; *k*: cátodo; *a*: ánodo; *g₁*: grilla sensible; *g₂*: grilla pantalla; *g₃*: grilla supresora.

El tetrodo tiene dos grandes ventajas con respecto al triodo. Una de ellas es la mayor linealidad (o proporcionalidad) entre la entrada y la salida; eso implica una menor distorsión. Y la otra es su mayor ganancia, o coeficiente μ de amplificación.

La primera grilla, igual que en el triodo, es la del control del flujo de electrones, del que depende la amplificación. Se la polariza una tensión pequeña y negativa con respecto al cátodo. La segunda grilla, llamada *pantalla*, se mantiene a una tensión fija, positiva con respecto al cátodo, y a veces mayor aun que la de placa. Su función es la de disminuir los efectos de la capacitancia entre la primera grilla y la placa, indeseable en las aplicaciones de alta frecuencia.

La tercera grilla se llama *supresora*, porque suprime la nube de electrones secundarios que se forma en las cercanías de la placa, como consecuencia de la gran velocidad con la que chocan contra ella los electrones que emite el cátodo. La grilla supresora, de trama muy abierta, se suele conectar, directamente, al cátodo, y como está muy cerca de la placa, genera un campo eléctrico intenso; eso facilita que los electrones secundarios retornen a la placa, en vez de formar alrededor de ella una nube negativa que altere la conducción.



• **Curvas características de un pentodo,** llamado así porque tiene cinco electrodos: cátodo, tres grillas, y ánodo. El filamento no se cuenta como electrodo, salvo que actúe además como cátodo, como en las válvulas de calentamiento directo.

$$S = \frac{\Delta I_P}{\Delta V_G}$$

- La *transconductancia* de un triodo es el cociente entre la variación de la corriente de placa, y la variación de la tensión de grilla. Se expresa en la unidad inversa del ohm, o sea en siemens (S). En la conductancia (véase el Cap. 4) se dividen corriente y tensión de un mismo cuerpo; en cambio en la transconductancia se divide la corriente en la placa, por la tensión en otro objeto, que es la grilla.

● Aplicaciones actuales de las válvulas de vacío

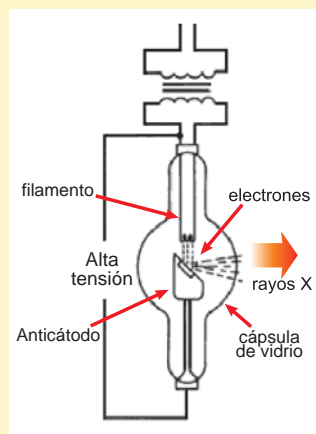
A pesar de que los transistores y otros cristales semiconductores cumplen casi todas las funciones que desempeñaban las válvulas, y con ventajas de funcionamiento, tamaño, consumo y costo, éstas se siguen prefiriendo cuando se manejan grandes potencias eléctricas, como en algunas estaciones de transmisión.



- Triodos para transmisores de radio, de vidrio y de porcelana; de treinta centímetros de largo y dos kilogramos de masa. Tienen aletas para disipar el calor; y algunos, circuitos de agua de refrigeración.

Los tubos de rayos X tienen alguna semejanza con las válvulas de vacío, y se siguen usando desde 1895.

Igual que en un diodo de Edison, un filamento calienta un cátodo que emite electrones, atraídos por un electrodo conectado a unos 10.000 V positivos con respecto al cátodo. Los electrones chocan contra ese electrodo, que en el caso de los tubos de rayos X recibe el nombre de *anticátodo*, y se frenan bruscamente. Emiten, entonces, una *radiación de frenado*, conocida también por su nombre en alemán, *Bremsstrahlung*. Esa radiación es la que se conoce como rayos X, o rayos Roentgen.



- Radiografía tomada en 1895 por Wilhelm Roentgen, o Röntgen (1845–1923). El sabio dio el nombre de *rayos X*, o incógnitos, a la radiación que emitía el tubo de vacío con el que experimentaba, para indicar que ignoraba por completo su naturaleza y origen. Hoy se mantiene ese curioso nombre, a pesar de que ya se sabe que son ondas electromagnéticas de longitud del orden de un angstrom (10^{-10} m), aproximadamente el tamaño de un átomo.



- Tubo de rayos X, con anticátodo de cobre.



- Transformador de audiofrecuencia, para adaptar la salida de un amplificador de válvulas, a un parlante. A diferencia de los transformadores comunes, que funcionan con tensiones de 50 ó 60 Hz, los de audio operan con las frecuencias del sonido audible, comprendidas entre 20 y 20.000 Hz.

Además de estas aplicaciones actuales de las válvulas (técnicamente muy justificadas), hay aficionados al sonido de muy alta fidelidad que aseguran que la amplificación con válvulas de vacío es de mejor calidad que la actual de transistores; y construyen todavía amplificadores de válvula, a pesar de sus dificultades técnicas. Por ejemplo, la bobina de un parlante requiere mucha corriente y poca tensión, a la inversa de lo que entrega un amplificador de válvula: mucha tensión y escasa corriente. Entonces hay que intercalar, entre el amplificador y el parlante, un pesado y voluminoso transformador.

PROPUESTAS DE ESTUDIO

11.1. La computadora Eniac tenía 18.000 triodos, y desarrollaba una potencia de 200 caballos. Un caballo equivale a 736 W. Si se construyera, con la misma tecnología, una computadora actual, de las más chicas, de sólo 500 MB (megabyte) de memoria volátil, ¿qué potencia eléctrica sería necesaria para hacerla funcionar?

11.2. Con los datos de las páginas 133 y 134 sobre el funcionamiento de un triodo, ¿cuánto vale su factor μ de amplificación? ¿Y cuánto vale su transconductancia?

11.3. ¿Qué sucedería si se polarizara, positivamente, la grilla de un triodo?

11.4. ¿Qué semejanzas y diferencias hay entre un diodo de válvula termoelectrónica, y una fotocélula?

11.5. Ya sea con los datos de este libro, o con averiguaciones independientes, por favor ordenen cronológicamente en una línea de tiempo los siguientes hechos históricos: Segunda Guerra Mundial; Primera Guerra Mundial; invención del pentodo; la del triodo; invención de la lámpara de filamento; uso del arco voltaico en iluminación; construcción de la primera computadora electrónica; uso de la luz eléctrica; uso de las lámparas incandescentes; teoría de la relatividad; primera bomba atómica; venta al público de grabadores y reproductores MP3; uso de los rayos X.

11.6. Las lámparas incandescentes actuales no se cierran al vacío, sino con un gas que no oxide ni ataque el filamento; como el nitrógeno, o el argón. Con eso se consigue reducir la volatilización del alambre. La lámpara consume más, porque transmite más calor, pero dura más horas en servicio. ¿Qué experimentos sencillos se podrían hacer para comprobar la presencia de gas en el interior de la ampolla de la lámpara? *(Nota: la respuesta no deriva completamente de lo expuesto en este capítulo; es necesario integrar conceptos de otros estudios: transmisión de calor por convección, o propiedades de los gases.)*



- Lámparas *nixie*; así se llamaban las de gas de neón, con electrodos de la forma de cada dígito, que encendía cuando se le daba tensión con respecto a una reja frontal compartida.

• Otras fuentes de estudio e información



- Antigua radio de gabinete curvo de madera, conocido como *capilla*, anterior a la época de los plásticos.

- Sugerimos buscar en Internet con las palabras: historia, electrónica, válvulas de vacío, *vacuum tubes*, museo, Eniac, Multivac.
- Charles A. Schuler, *Electrónica, principios y aplicaciones*, Reverté, Barcelona, Buenos Aires, 1986. Este libro incluye tanto aspectos históricos en el desarrollo de la electrónica, como los actuales.
- En este sitio muestran cómo construir un amplificador y un oscilador, con los iones de la llama de gas de una hornalla de cocina, o de un mechero.
<http://www.sparkbangbuzz.com/flame-amp/flameamp.htm>
- En este otro, hay un sencillo receptor de radio hecho con auriculares, una antena y una llama de gas. Pero quizás olvidaron decir que los auriculares tienen que ser de muchas vueltas de alambre delgado, de los llamados de alta impedancia (unas decenas de miles de ohms); los de las radios y equipos de sonido portátiles no son adecuados para ese experimento.
<http://www.cientificosaficionados.com/foros/viewtopic.php?f=7&t=6931>.