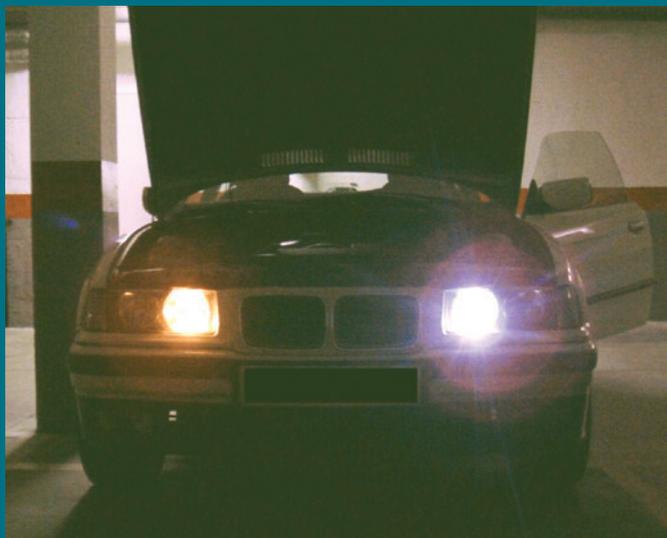


Diodos semiconductores



- Las lámparas de leds, o diodos emisores de luz, prometen ser fuentes de iluminación más baratas, duraderas, rendidoras y frías que las incandescentes y fluorescentes, y más benignas para el medio ambiente.
- El faro amarillento es uno incandescente común; el azulado, de leds.



- Ducha con leds, que indican la temperatura del agua; en azul hasta los 32 °C; después verde, y en rojo a partir de los 43 °C. La luz viaja por dentro de los chorros, por el efecto de fibra óptica. Necesita una buena presión de agua, para impulsar un generador de energía eléctrica de turbina, imanes giratorios y bobina fija. Para forzar la venta del frívolo artefacto, algunos vendedores le atribuyen propiedades mágicas y curativas.

- Sencillo anuncio de $100 \cdot 100 = 10.000$ lámparas bicolors, hechas cada una con un led rojo y uno verde, encapsulados juntos. Cuando se encienden los dos colores a la vez, resulta el amarillo rojizo, o ámbar. Una computadora cambia la figura, o la anima.

LOS LEDS, IGUAL QUE OTROS DIODOS RECTIFICADORES, CONDUCE LA CORRIENTE EN UN SOLO SENTIDO, PERO ÉSE ES UN EFECTO SECUNDARIO CUYA VENTAJA ES MARGINAL, O NULA; SU UTILIDAD PRINCIPAL ES LA DE EMITIR LUZ.



Diodos semiconductores



- Diodo A6A 4.004, de 30 A y 400 V, y 1 cm de altura, para alternador de coche. El cuerpo estriado facilita su montaje a presión en una gruesa plancha de aluminio, para la disipación del calor (el modelo A6B es el de la polaridad opuesta).

La electrónica es el estudio del comportamiento de los electrones en diversos medios, como el vacío, los gases y los semiconductores. Esa ciencia y sus aplicaciones nacieron con el invento del diodo de vacío.¹ La electrotecnia, en cambio, es el estudio de las aplicaciones de la electricidad. La construcción de circuitos de control con válvulas, diodos y transistores, pertenece a la electrónica; en cambio las centrales, instalaciones y motores eléctricos, corresponden al campo de la electrotecnia.

Recordemos que la palabra *semiconductor* tiene un significado diferente en los ámbitos de la electrotecnia y de la electrónica. En la primera, semiconductor es un material de conductividad intermedia entre la de un conductor y un aislante. En electrónica se llama semiconductor el material que conduce o no la corriente eléctrica según cuál sea su sentido, o el que lo hace sólo cuando recibe una señal eléctrica, óptica o de otro tipo.

● El diodo semiconductor



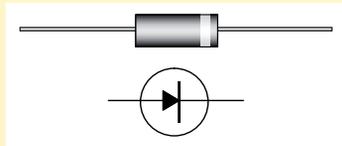
- Diodo de 350 A y 400 V, de 3 cm, para soldadora de arco eléctrico.

La función de un diodo es la de permitir el paso de la corriente eléctrica en un sentido, e impedirla en el sentido opuesto.

Posiblemente sea éste el componente más utilizado en la electrónica. Los más comunes se elaboran con pequeños cristales de silicio conectados a alambres de cobre estañados, y encapsulados en plástico.



- Diodo miniatura ESD OP2RF-02LS, de medio milímetro, diseñado como elemento de protección contra tensiones excesivas en equipos de comunicaciones.



- Diodo conductor, y su símbolo.

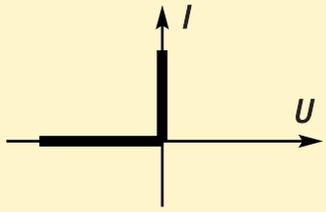


- Diodo semiconductor 1N 4.004, de medio centímetro de largo, capaz de conducir una corriente de 1 A, y de soportar 400 V de tensión inversa.

¹ El hecho de que la electrónica se aplique hoy principalmente a las computadoras y sus redes, dio lugar a términos como correo electrónico, libro, voto, encuesta, música, juego, soporte, boletín, diseño, congreso, seminario y cerebro, electrónicos.

Su antecesor histórico es el rectificador, diodo o detector de piedra galena y bigote de gato, mencionado en el capítulo anterior.

La gráfica de la figura, llamada *curva característica*, representa la corriente que circula por un diodo ideal, en función de la tensión entre sus extremos. Cualquiera sea la tensión inversa que se le aplique, el diodo ideal no conduce, y la corriente es entonces nula. El diodo se comporta, para las tensiones de polaridad opuesta a la de conducción, como un cable cortado (parte horizontal de la gráfica).



● Curva característica de un diodo ideal.

Aparte de lo dicho, y cualquiera sea la corriente que circule en el sentido permitido, la tensión entre los extremos del diodo es nula; o sea que el diodo ideal, para la corriente directa, se comporta como un cable (parte vertical del gráfico).²

En la práctica, no es del todo cierto que un diodo real conduzca sólo en un sentido, y que no lo haga en el opuesto. En rigor, conduce algo de corriente en el sentido opuesto; hay una pequeña conductancia inversa. Y esa corriente crece mucho, abruptamente, si la tensión inversa que se le aplica supera un cierto valor máximo, llamado *tensión Zener*.

Además, tampoco es totalmente exacto que el diodo deje pasar la corriente sin ningún impedimento en el sentido directo; existe una pequeña resistencia directa de conducción.

Otro límite real es el de las corrientes directa e inversa; hay un valor máximo de corriente que un diodo puede conducir sin que se destruya.

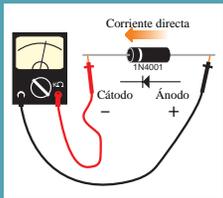
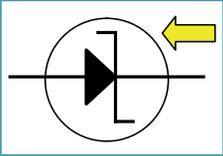
Por último, para que el diodo empiece a conducir, la tensión tiene que superar un cierto umbral, aproximadamente 0,9 V para los diodos de silicio.

Por todo eso, la curva característica real de un diodo difiere de la ideal, y se asemeja a la de la figura de la página siguiente:

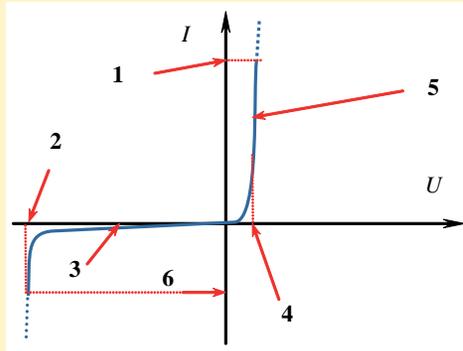
² Desde el punto de vista matemático, la gráfica de la figura no es una función de I en función de U , ni de U en función de I . Es una idealización de dos funciones: $U(I) = 0$ para corrientes positivas, e $I(U) = 0$ para tensiones negativas.



- El físico Clarence Melvin Zener (1905–1993) estudió el efecto que lleva su nombre, por el cual, si la tensión inversa es suficiente, un diodo conduce al revés. Desarrolló diodos que operan normalmente en esas condiciones, y sirven para mantener una tensión constante. Abajo, el símbolo, y el sentido normal de circulación de la corriente, opuesto al de los diodos comunes.



- Cuando se prueba un diodo con un multímetro o tésfer, hay que tener en cuenta que, con la perilla en óhmetro, y por razones constructivas, el polo positivo sale del enchufe marcado como negativo.



● CURVA CARACTERÍSTICA DE UN DIODO REAL

- 1: Corriente directa máxima admisible.
- 2: Tensión Zener, o tensión inversa de avalancha.
- 3: La pendiente de esa parte indica la pequeña conductancia inversa.
- 4: Tensión umbral de conducción directa.
- 5: Esa pendiente corresponde a la gran conductancia directa.
- 6: Corriente inversa máxima admisible.

En la figura no se han respetado las escalas de tensiones y corrientes. La conductancia inversa de un diodo es tan pequeña, que la parte negativa de la curva apenas se despega del eje horizontal.

Ejemplo. Los fabricantes de componentes electrónicos suministran datos que publican como *hojas de datos*, o *datasheets*. De una de ellas se obtuvo la siguiente información:

- el diodo 1N 4.004 tiene una tensión inversa que se garantiza en 400 V, permanentes o repetitivos. Admite picos ocasionales inversos de 480 V; soporta una tensión eficaz alterna de 280 V (su valor de pico es de $280 \text{ V} \times \sqrt{2} = 400 \text{ V}$). Admite una corriente directa promedio de 1 A; y picos ocasionales de 30 A. Trabaja bien en el rango de -65 a $+175$ °C. Tiene una tensión umbral de conducción directa, típica, de 0,95 V, y máxima garantizada, de 1,1 V. El promedio de esa tensión directa en un ciclo, es de 0,85 V. La corriente inversa, con la tensión inversa máxima garantizada de 400 V, es de 10 microampere a la temperatura 25 °C, y de 50 microampere a 100 °C.³

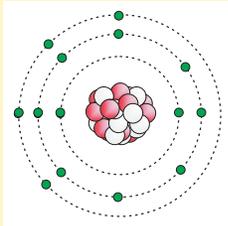
La tensión directa de conducción, para los diodos más comunes (que son los de silicio) está comprendida entre 0,6 y 1,2 V, según sus características constructivas. Para tensiones menores, el diodo se comporta como un aislante; por eso, para saber si funciona uno, hay que probarlo con tensiones mayores que la directa de conducción; a veces la de una pila es insuficiente.

● Teoría elemental del díodo semiconductor

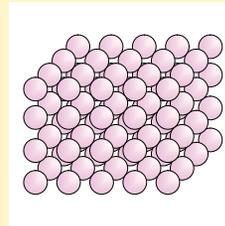
La explicación del funcionamiento de un diodo pertenece al campo de la física cuántica, que requiere instrumentos matemáticos y conceptuales más avanzados que los de este libro. Pero sigue igualmente una descripción parcial.

³ La corriente inversa depende mucho de la temperatura, por eso es posible usar un diodo como termómetro.

El silicio es un elemento químico que, como el germanio y el selenio, tiene cuatro electrones en su capa más externa, cuando harían falta ocho para que fuera estable como un gas noble (en este caso el argón, de número atómico 18).



● Izquierda, átomo de silicio, con 14 neutrones, 14 protones y 14 electrones. Derecha, cristal cúbico de silicio.



En un cristal cúbico de silicio, cada átomo está rodeado por cuatro vecinos (arriba, abajo, izquierda, derecha, adelante y atrás), y comparte con ellos los electrones externos; así cada uno completa ocho.

Un campo eléctrico externo arranca electrones de algunos átomos; éstos quedan con huecos de electrones, de carga positiva, que atraen electrones vecinos de otros átomos, los que se alojan en los huecos; y así, aunque los protones permanezcan en su sitio, los huecos se van a otros átomos, como se traslada hacia atrás un claro entre los coches, cuando avanzan uno a uno, en una congestión de tránsito.

Con eso, sólo tenemos un material algo conductor. Pero si cuando se fabrica el cristal se agregan pequeñas cantidades de arsénico, antimonio o fósforo, que tienen cinco electrones en su capa externa, en la red cristalina quedan electrones sobrantes. Esa operación se llama dopado; y el material resultante, silicio N. Recíprocamente, si en la fabricación de otro cristal se agregan pequeñas cantidades de aluminio, indio o galio, que tienen tres electrones en su capa externa, entonces sobran huecos, y se obtiene silicio P.



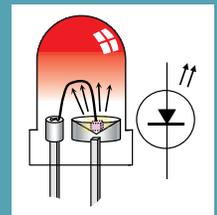
● Diodo semiconductor compuesto por un cristal P y uno N, unidos.

En un átomo aislado, o casi aislado, como el de un gas, los electrones tienen permitidos ciertos niveles separados de energía, como lo indican las líneas de la figura, y les son prohibidas las energías intermedias. En un sólido, en cambio, donde los átomos están más cerca unos de otros, la energía de un electrón puede tener valores continuos dentro de ciertas bandas separadas, con una banda intermedia de energías prohibidas, como lo representan los cuadros de la figura, donde el inferior es la *banda de valencia*, y el superior, la de *conducción*. En los metales, esas bandas se solapan, por eso conducen bien la corriente. En los aislantes, las bandas permitidas están muy alejadas, y no conducen; y en los semiconductores, la banda prohibida



- La tensión directa, o umbral, de un led, es de más de 2 V. Entonces, con una sola pila de 1,5 V, no enciende; y con dos en serie, se arruina.

La figura muestra una forma correcta de probar un led, con una tensión mayor que la directa, y con un resistor en serie; por ejemplo, 9 V y 1.000 Ω . La pata más larga es el ánodo, o terminal positivo.



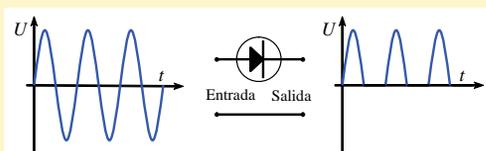
- Un led se compone de un cristal de arseniuro de galio (los hay de otras sustancias, orgánicas e inorgánicas), soldado sobre un cátodo cóncavo, que hace de espejo. Lo toca un bigote metálico soldado al ánodo. Con lupa, se pueden ver algunos detalles constructivos. A la derecha, su símbolo.

es estrecha, y los electrones pueden pasar de una banda a otra con un salto pequeño de energía.

La unión PN actúa como una barrera de energía pequeña en un sentido, y de energía mayor en el opuesto; y en eso se basa la conducción en un solo sentido.

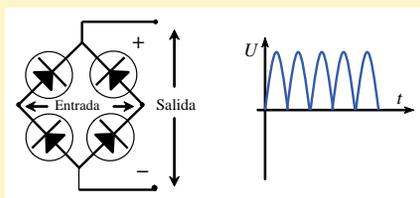
● Rectificación de corriente

La intercalación de un diodo en serie alcanza para que una tensión alterna, formada por semiciclos de las dos polaridades, resulte en una tensión de una única polaridad, aunque eso no alcance para calificarla de continua (una tensión continua debería ser aproximadamente constante, en condiciones fijas de uso).

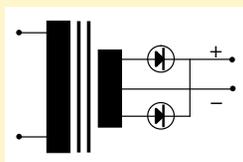


● **Rectificador de media onda, que usa un solo diodo.**

Para aprovechar los dos semiciclos, se pueden usar cuatro diodos, que en esa aplicación constituyen un *rectificador de onda completa de puente de diodos*.

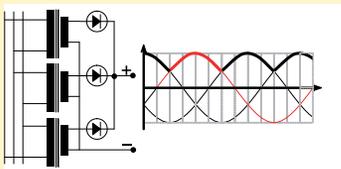


● **Puente rectificador. En cada medio ciclo conducen dos diodos opuestos, mientras los otros dos impiden el paso de la corriente.**



Una manera de conseguir el mismo efecto con sólo dos diodos, es usar un transformador cuyo secundario tenga un punto medio, como muestra el capítulo anterior para los diodos de vacío. Ahora representamos más simbólicamente el transformador.

A veces se dispone de tensión trifásica;⁴ entonces es posible conseguir una mejor rectificación. La línea gruesa representa la tensión de salida en función del tiempo.



● **Rectificación trifásica de media onda, también llamada de tres pulsos por ciclo.**

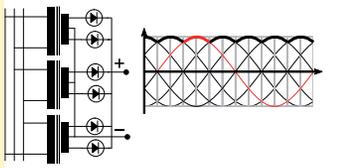
⁴ El capítulo 5 da detalles sobre esa clase de alimentación.



- Puentes rectificadores monolíticos, cada uno con cuatro diodos encapsulados juntos. La tensión alterna se conecta entre los dos terminales indicados ~~, y la tensión rectificada sale por los contactos + y -.
- Un monolito es un monumento de una sola piedra.



- Rectificador de seis pulsos, de 3 × 380 V de entrada, y salida de tensión casi continua, de 24 V y 4.000 A. Sumergido en aceite, disipa el calor por radiadores. Se usa en la industria electroquímica; por ejemplo, para platear cobre, o para anodizar aluminio.



- Rectificación trifásica de onda completa, o de seis pulsos por ciclo. La tensión de salida es casi continua.

● El rizado, o *ripple*

En algunas aplicaciones, como en el caso de las máquinas comunes de soldadura de arco que se usan en los talleres, no hace falta una tensión realmente continua; la curva que la representa en función del tiempo puede estar bastante arrugada, porque sólo interesa que el arco se mantenga encendido, y para eso es suficiente con que la tensión no se anule en ningún momento.

En otros casos, como el de la alimentación de equipos de computación o amplificadores de sonido, se pretende una salida muy continua; porque la componente alterna produciría zumbidos, y otros efectos indeseables, como el reinicio sorpresivo de una computadora.

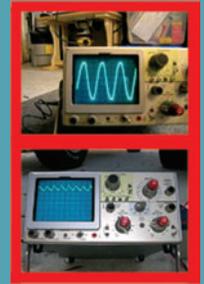
El cociente entre el valor eficaz⁵ de la componente alterna, y el valor promedio de la continua se conoce como la relación de ondulación, o de rizado, y más popularmente en el ambiente técnico, como *ripple*, su nombre en inglés.

TIPO DE RECTIFICADOR	PULSOS POR CICLO	RIZADO, O <i>RIPPLE</i> (%)
Monofásico, de media onda	1	121,1
Monofásico, de onda completa	2	48,3
Trifásico, de media onda	3	15,8
Trifásico, de onda completa	6	4,2

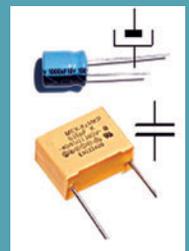
● Filtrado

Para reducir el rizado, o componente alterna, se puede conectar un capacitor en paralelo con la salida. Este elemento acumula carga durante los máximos, y la entrega durante los valles o mínimos de tensión, y actúa entonces como un amortiguador de las variaciones, o filtro de la componente alterna.

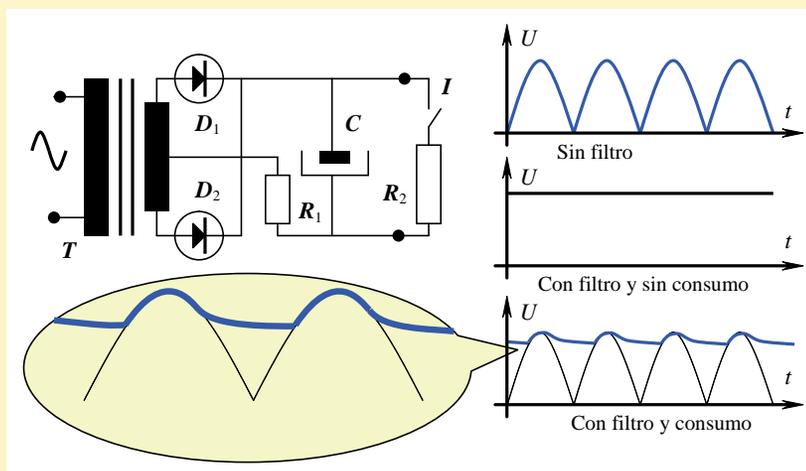
⁵ El valor eficaz de una tensión alterna, mencionado en los capítulos 3 y 5, es aquella tensión continua que tendría el mismo efecto energético que la alterna en cuestión. Por ejemplo, una tensión que varíe de manera sinusoidal entre -311 V y $+311\text{ V}$, hace que un calefactor alimentado con ella, caliente lo mismo que si se lo conectara a 220 V de tensión continua; entonces el valor eficaz de una tensión alterna de 311 V de cresta, es de 220 V . Para una tensión que varíe de manera sinusoidal en el tiempo, la relación entre el valor de cresta y el valor eficaz, es igual a la raíz cuadrada de dos.



- Rizado en la salida de un rectificador de onda completa, mostrado en la pantalla de un osciloscopio. Arriba, la tensión alterna sin rectificar.



- Capacitor electrolítico de 10.000 microfarad y 10 volt , y uno de poliéster, de tamaño similar, de sólo $0,15\text{ microfarad}$, aunque de 280 V ; y sus símbolos. Para igual prestación, los capacitores electrolíticos son de tamaño mucho menor. Pero sólo admiten una polaridad (un electrolito es un líquido conductor).



- El transformador T , de secundario con punto medio, provee la tensión alterna, rectificadora en onda completa por los diodos D_1 y D_2 . El capacitor de filtro, C , amortigua las variaciones de tensión. El resistor R_1 , de baja resistencia, protege los diodos de la elevada corriente inicial de encendido o arranque. Cuando se conecta el resistor de consumo R_2 , al accionar el interruptor I , aparece un rizado menor que el que habría sin el capacitor.

La relación de rizado, o *ripple*, cuando hay capacitores de filtro presentes, para el caso de un rectificador de media onda, se puede calcular así, con muy buena aproximación:⁶

$$U_{Rpp} = \frac{U_c}{2fRC} \quad U_{Ref} = \frac{U_{Rpp}}{2\sqrt{3}}$$

En esas fórmulas, U_c es la tensión alterna de cresta; f , su frecuencia; U_{Rpp} es la amplitud de la tensión de rizado, o sea su valor de pico a pico; R es la resistencia del consumo que se conecta a la salida del rectificador; C es la capacitancia del capacitor de filtro; y U_{Ref} es la tensión eficaz de rizado, menor que la de pico a pico. Para un rectificador de onda completa, la frecuencia se debe multiplicar por dos; o, con mayor generalidad, por la cantidad de pulsos positivos que hay en cada ciclo.

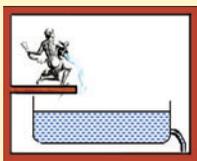
● Analogía hidráulica

A veces una comparación hidráulica ayuda a comprender intuitivamente una idea eléctrica que se nos hace difícil por ser poco familiar.

⁶ La aproximación consiste en considerar que la descarga del capacitor a través de la resistencia del consumo, comienza en el mismo instante en que la tensión alterna alcanza su valor de cresta. Pero en rigor, y como se ve en la figura de detalle de la página anterior, la descarga comienza apenas después, cuando la pendiente de caída de la sinusoide iguala el valor $U_c/(CR)$.



- La bocha hueca de la flauta india, y la bolsa de la gaita gallega atenúan las variaciones de caudal del soplo de los músicos, y brindan un sonido más uniforme. Así operan, con el rizado o ripple, los capacitores de filtro de los rectificadores.



Ganimedes⁷ va y viene de una fuente, y vierte de golpe su ánfora en la tina cada vez. Pero la capacidad del tanque hace que, a la salida, se disponga de un flujo casi uniforme.

● Fuentes reguladas

Los rectificadores tratados hasta el momento utilizan *componentes pasivos*, como diodos, resistores y capacitores. Pero hay otros de muy bajo rizado y gran estabilidad de la tensión de salida frente a variaciones grandes del consumo. Son las *fuentes reguladas*, muy útiles en los laboratorios y talleres, porque se las puede poner en cortocircuito sin que la corriente exceda un valor que se fija libremente con una perilla. Esos circuitos suelen usar transistores, o amplificadores operacionales;⁸ estos últimos se consideran elementos activos, porque requieren una alimentación auxiliar.



● A la izquierda, un kit para una fuente regulada sencilla. Se individualizan los cuatro diodos del rectificador de onda completa, el capacitor electrolítico de filtro, y un transistor (que se trata en el capítulo 13). A la derecha, un sencillo trabajo con un puente monolítico, o integrado, de cuatro diodos, y un filtro; todo sujeto con pistola de encolar. Este rudimentario rectificador le sirvió al aficionado para cambiarle a una bicicleta su faro original incandescente, por uno de leds, para el que poco importa el rizado. El menor consumo de los leds alivió el pedaleo nocturno del ciclista.

● Multiplicación de tensión

Si se tienen varios capacitores, hay una manera sencilla de obtener una tensión elevada a partir de una más baja, sin usar un transformador elevador de tensión.

Se cargan los capacitores en paralelo con la fuente de tensión continua disponible; se los desconecta, y se los pone en serie. Por ejemplo, si la pila de la figura de la página siguiente es de 1,5 V, la tensión final en la serie de capacitores, es de 4,5 V.

⁷ El copero de los dioses, en la mitología griega; Aquarius en la romana.

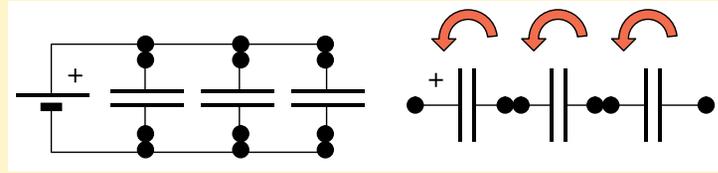
⁸ Se los trata en el capítulo 15.



● El metal adicional en la parte alta de la bombilla, ayuda a enfriar el líquido muy caliente cuando sube, y a mantener tibio el tubo durante las pausas. Cumple, por eso, una función semejante a la del capacitor de un rectificador, ya que reduce, en este caso, el rizado térmico.



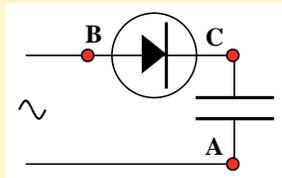
- Generador de impulsos de tensión (mencionado en el capítulo 1). Cada impulso, que dura uno o dos microsegundos, es de una tensión de 300.000 V, y de una energía de 7.500 J. Con ese aparato se prueba la aptitud de aisladores y transformadores para resistir las descargas atmosféricas. Sus tres capacitores se cargan en paralelo, y se descargan en serie a través de chispas que saltan entre las esferas.



Hay antiguos generadores de alta tensión, algunos todavía en servicio, que hacen esa maniobra por medios mecánicos. Aunque los capacitores permanecen fijos, giran sus contactos, sea a mano con la ayuda de una pértiga aislante, o con un mecanismo motorizado. Hay variantes en las que la conexión en serie se realiza mediante chispas eléctricas que saltan entre esferas, y que se encienden con la ayuda de chispas secundarias, o auxiliares.

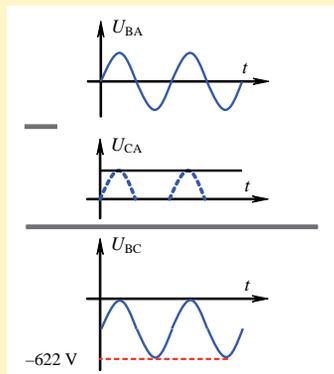
La existencia de diodos de tensiones inversas elevadas permite hoy la construcción de circuitos multiplicadores de tensión, sin la necesidad de mover piezas, ni

excitar chispas. Para comprender su principio de funcionamiento es útil prestar atención al funcionamiento de un simple rectificador de media onda, en particular a las tensiones entre los puntos A, B y C. Supongamos que alimentamos un rectificador con 220 V de tensión alterna. El capacitor de filtro, si no hay ningún consumo, se



carará con la tensión de pico o de cresta de los 220 V ca, o sea con 311 V de tensión continua. Entonces, entre A y B hay 220 V eficaces de tensión alterna; y entre A y C, 311 V de tensión continua. ¿Qué tensión habrá, entonces, entre los extremos del diodo, B y C?

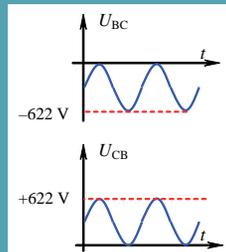
Esa tensión es igual a la diferencia entre las dos anteriores.⁹ $U_{CA} - U_{CB} = U_{BC}$, Gráficamente:



cuando a la primera de las gráficas le restamos la segunda, obtenemos la tercera (restar la segunda equivale a bajar todo 311 V).

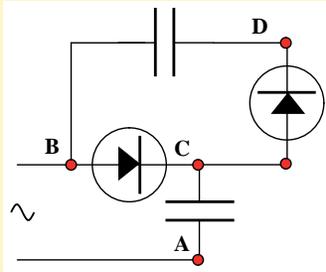
La tensión entre los extremos del diodo tiene, entonces, un valor de pico igual a -622 V, con el extremo B negativo con respecto a C.

Eso es una gran noticia, porque significa que, con un segundo diodo, podemos cargar un segundo capacitor; y así tendremos duplicada la tensión inicial.



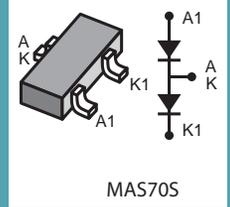
- La tensión de un punto con respecto a otro, es opuesta a la tensión del segundo con respecto al primero (nótese la permutación de subíndices en la tensión U). El punto C es positivo con respecto al punto B.

⁹ Si eso no fuera evidente, las tensiones se pueden pensar, analógicamente, como si fueran diferencias de altitud entre ciudades. Por ejemplo, Tilcara está 1.805 metros por encima de Córdoba; y Cafayate, 1.273 metros por encima de Córdoba. Eso significa que Tilcara es 532 metros más alta que Cafayate.



Ahora el capacitor conectado entre los puntos B y D tiene una tensión continua de 622 V.

No conformes con haber duplicado la tensión, y con la intención de triplicarla, podemos agregar más diodos y capacitores. Se consigue así elevar la tensión en 622 V por cada par de capacitores.

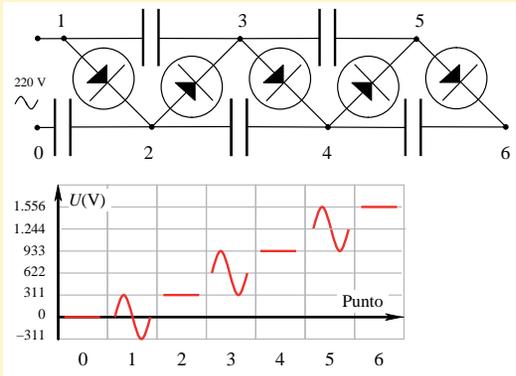


MAS705

- Del mismo modo en que se fabrican puentes integrados de cuatro diodos, para usarlos como rectificadores, hay también pares de diodos encapsulados en serie, llamados diodos dobladores de tensión.

● Diodos en cascada multiplicadores de tensión

El circuito anterior, con dos diodos y dos capacitores, se conoce como *doblador de tensión*. Si se usan muchos diodos y capacitores, el circuito se llama *multiplicador de diodos*, *multiplicador en cascada*, o *generador de Marx*.¹⁰



- Generador de Marx, y representación, en función del tiempo, de las tensiones en cada uno de sus puntos, con respecto al cero.

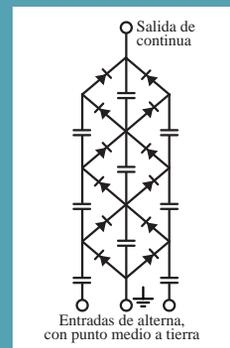
Tomemos como referencia de tensiones, o tensión nula, el punto cero del circuito. El punto 1 tiene 220 V eficaces de tensión alterna con respecto a cero (+311 y -311 de cresta). El punto 2 tiene una tensión continua de +311 V. El 4, la suma que resulta de la alterna de 220 V, con el doble de la continua de +311 V; y así sucesivamente. Salvo el primer capacitor, que debe soportar sólo 311 V, los demás se cargan todos a 622 V. Y los diodos soportan todos, igualmente, 622 V de tensión inversa de cresta.

Con esa conexión se consigue, en teoría, elevar la tensión indefinidamente; pero con los siguientes límites prácticos:

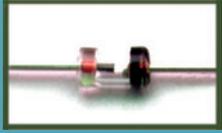
- en el análisis del circuito se supuso que no hay cargas o consumos, y que por eso los capacitores llegan a adquirir completamente la tensión de cresta de la tensión alterna con la que se los alimenta a través de su respectivo diodo. Pero tanto los



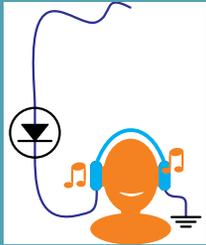
- Generador de Marx de onda completa. Para alcanzar la tensión máxima, es más rápido que el de media onda. Abajo, su circuito.



¹⁰Esa conexión fue ideada por el Erwin Otto Marx en 1924. El apellido de ese ingeniero electricista es común en Alemania, no se relaciona con el del más famoso Karl Marx, el economista y político autor de *El capital*.



- Diodo de germanio 1N100A, de 2,7 mm de diámetro, 100 V de tensión de cresta inversa 250 mA de corriente directa, 1 V de tensión directa y 1 M Ω de resistencia inversa. Su buena respuesta a las variaciones rápidas de tensión lo hace útil para detectar, sin pilas, ondas de radio, con sólo un cable que sirve de antena, y auriculares de telefonía. Hay circuitos más avanzados, para separar las estaciones.



- Truco para saber si funciona el led infrarrojo de un control remoto. Se lo mira a través de la pantalla de una cámara digital, que es sensible a las ondas de 0,88 micrones que emiten esos diodos.

capacitores, como los aisladores que los sostienen, y el aire que los rodea, permiten una cierta fuga, ya que no son aislantes ideales; y aunque esa pérdida sea pequeña, alcanza para que la tensión crezca sólo hasta un límite.

- los diodos tienen, también, una débil conducción inversa que hace que los capacitores se descarguen un poco a través de ellos.
- por último, la propia instalación tiene que tener un tamaño adecuado para resistir las grandes tensiones generadas.

Los multiplicadores en cascada tienen muchas aplicaciones; la más común es la de los generadores de diez mil o veinte mil volt para los televisores y monitores de tubos de rayos catódicos. También se emplean en las pistolas de pintura electrostática, y en generadores de iones para desinfección, limpieza y erosión de superficies previa al pintado.

PROPUESTAS DE ESTUDIO

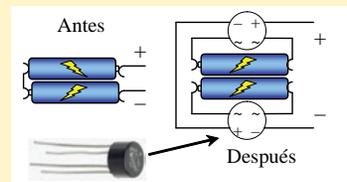
12.1. ¿Cómo se podría proteger, con diodos y un fusible, un voltímetro diseñado para medir tensiones comprendidas entre cero y medio volt, para que no se queme en el caso de que se le aplique, por error, una tensión mucho mayor?

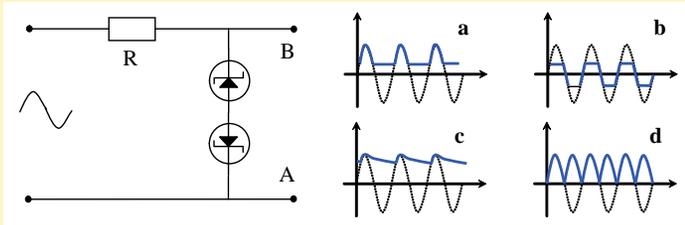
12.2. Además de los diodos semiconductores tratados en este capítulo, hay muchas otras clases: *varicap*, o de capacitancia variable; fotodiodos; diodos túnel, o Esaki; diodos Schokley, Schottky, y otros. Busquen, por favor, información sobre alguno de ellos, y resuman su funcionamiento y aplicaciones.

12.3. Una cierta lámpara incandescente de 220 V requiere una corriente de medio ampere; una fluorescente compacta, o de bajo consumo, de la misma iluminación, cien miliampere, y una de leds equivalente, treinta miliampere. ¿Qué gasto bimestral representa cada una, encendida ocho horas diarias, si el kilowatt hora cuesta quince centavos?

12.4. Para que un aparato alimentado con pilas funcione independientemente de la posición en que se las coloque en el receptáculo, alguien modificó el circuito serie simple, e intercaló rectificadores de onda completa. Pero encontró que eso no sirve. El aparato con pilas nuevas funciona como si las tuviera ya muy gastadas. ¿A qué se debe ese efecto?

12.5. ¿Cuál de los gráficos representa mejor, en función del tiempo, la tensión entre los puntos A y B del circuito de diodos Zener y resistores, alimentado con tensión alterna?





● Otras fuentes de estudio e información

- Sugerimos buscar en Internet con las palabras: diodo, led orgánico, ripple, radio, cuatro capas, y nuevos diodos.
- Este sitio explica cómo construir un primitivo y sencillo receptor de radio. <http://galenaxq2dwo.blogspot.com>
- Electrónica básica. Libro en soporte digital de un curso de la Euskal Herriko Unibertstatea, la Universidad del País Vasco. Autor, Andrés Aranzabal Olea; director del proyecto, Carmelo Alonso González. El capítulo de diodos contiene muchos ejemplos y aplicaciones.
http://www.sc.ehu.es/sbweb/electronica/elec_basical/

Transconductancia

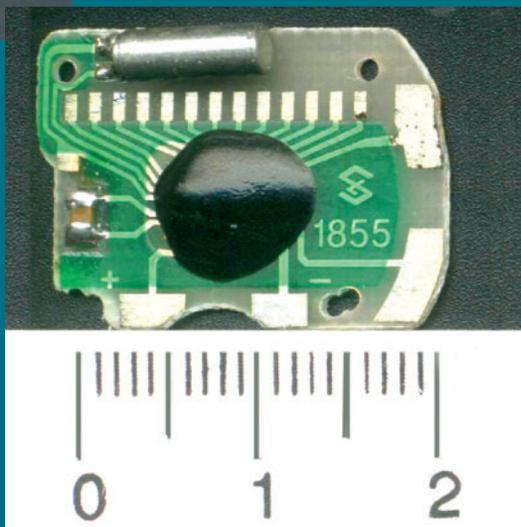


- El primer triodo amplificador cristalino de la historia, o *transistor*, construido en los laboratorios Bell en 1947, pesaba más de medio kg.

Estaba formado por tres cristales de silicio de diez gramos cada uno, de dos clases diferentes, apoyados unos contra otros, y unidos a gruesos alambres de conexión eléctrica. Al lado, su símbolo.

Cuando se hace circular una débil corriente por uno de los alambres, la unión de dos de los cristales se vuelve muy conductora.

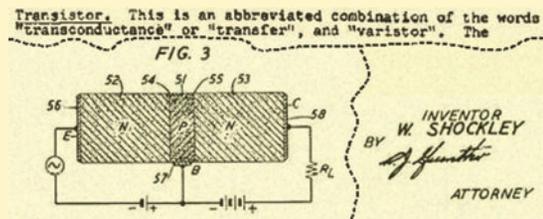
- Los transistores actuales son muy pequeños, como los de este circuito de un reloj de cinco pesos. Arriba, el cristal de cuarzo, cuyas vibraciones miden el tiempo. Entre + y – va la pila. Sobre los trece contactos alineados, se apoya una pantalla de cristal líquido. A la izquierda se conecta la alarma; y a la derecha, los botones de mando. La gota de cemento protege de la luz y de la humedad más de diez mil diminutos transistores.



Transconductancia

En un memorándum del 28 de mayo de 1948, que aún se conserva, un empleado de la Bell Telephone Laboratories Incorporated, pidió a sus compañeros de trabajo que votasen cómo preferían llamar el cristal que acababan de desarrollar el año anterior, que conduce la corriente entre dos contactos cuando recibe una pequeña señal eléctrica a través de un tercero. Les propuso que eligieran entre *triodo semiconductor*, *triodo de estado de superficie*, *triodo de cristal*, *triodo sólido*, *iotatrón* y *transistor*, y comentó las ventajas e inconvenientes de cada nombre. La palabra sólido les daba la idea de algo imponente y voluminoso, y lo que habían inventado era, en cambio, pequeño, como la letra griega iota. Pero *iotatrón* les sonaba a *tiratrón*, *betatrón*, y otros aparatos grandes de la época.

Se decidieron por *transistor*, contracción de *transconductancia*, o transferencia, y varistor.¹ El transistor se comporta como un resistor, pero su resistencia depende de la señal que recibe de un tercer electrodo, el de control.



● Un fragmento del histórico memorándum, y otros de la patente estadounidense 2.569.347, de la invención del transistor.

Es posible demostrar que si se agrega un nuevo resistor a un circuito ya existente y compuesto, exclusivamente, por resistores, la variación de la conductancia² entre cualquier par de puntos de ese circuito, nunca es mayor que la conductancia del elemento que se agrega.

Por ejemplo, si añadimos un resistor de 1Ω entre los puntos C y D del circuito, la conductancia entre los puntos A y B cambia del valor inicial de $0,05 \text{ S}$, al nuevo de $0,0090196 \text{ S}$. La variación de conductancia entre A y B, debida a ese agregado, es de $0,00490196 \text{ S}$, que no supera la conductancia agregada, de 1 S . Y eso ocurre

¹ Un varistor es un resistor variable, cuya resistencia disminuye mucho cuando la tensión supera cierto valor. Es útil para proteger equipos delicados de tensiones excesivas momentáneas. Para el mismo uso, hay capacitores cuya capacitancia aumenta mucho a partir de cierta tensión, llamados varicaps. (Muchos llaman varistores a los varicaps.)

² Recordemos que la conductancia, en siemens, es la inversa de la resistencia, en ohm. Las resistencias en serie se suman, lo mismo que las conductancias en paralelo.

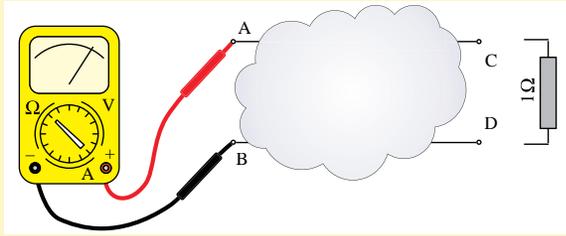


- Los investigadores estadounidenses William Shockley, Walter H. Brattain y John Bardeen, de los Laboratorios Bell, recibieron el premio Nobel de Física en 1956, por su invención del transistor de contacto en 1947, y el de juntura en 1951.



- Varistor V275LA40AP, para protección de aparatos electrónicos. Diámetro, 20 mm; tensión de trabajo, 250 V ca; la de límite, 500 V ca. Admite picos de 6,5 A, y absorbe una energía de hasta 23 J.

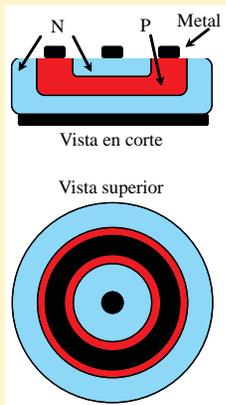
siempre, no importa qué combinación de conexiones se realice, siempre que sea de elementos pasivos que no aporten energía; que no haya, por ejemplo, un amplificador de triodo.



B del mismo cuerpo, se mide un aumento de la conductancia mayor de 1 S, y mucho mayor. Su valor es cincuenta o cien veces más grande que la conductancia de entrada. El multímetro pasa de indicar una resistencia infinita, o de un valor muy alto (eso equivale a una conductancia nula, o casi nula), a marcar, por ejemplo 0,05 Ω, correspondientes a 20 S.

Ese efecto, observado más de cuarenta años antes en los triodos de vacío, se llamó, igual que entonces, conductancia de transferencia, o transconductancia.³ Su principal aplicación fue, inicialmente, y al igual que la de los triodos, la de amplificar señales eléctricas: por ejemplo las de un micrófono, o las ondas de radio captadas por una antena.

Los transistores originales eran, como los actuales, de cristales de selenio y de silicio, dopados para obtener materiales P y N.⁴ El primer modelo histórico se basaba en una punta de contacto de un material sobre otro. Pocos años después se construyeron los *transistores de juntura*, en los que los materiales P y N, y el metal con los que hacen contacto, están muy íntimamente unidos. Las junturas admiten más corriente que las puntas de contacto.

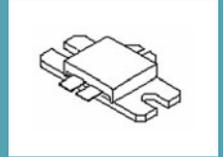


● Disposición de los materiales P y N, y los metales de contacto, en un transistor de juntura de los llamados NPN, abreviadamente N. Abajo hay una placa llamada *colector*. Depositado sobre ella, material N. Sobre éste, material P. Sobre el P, más material N. Y encima de éste, un disco de contacto, el *emisor*. Sobre el material P se deposita un anillo metálico, la base del transistor.

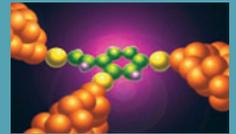
³ En el capítulo 11, p. 135, se define la transconductancia del triodo de vacío.

⁴ El capítulo anterior describe los materiales P y N, resultado del dopado de los cristales con diversos elementos químicos.

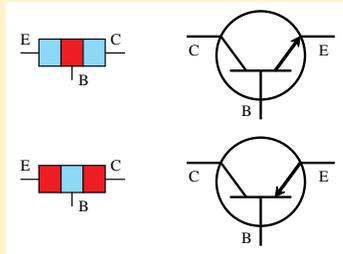
El cristal de los Laboratorios Bell no cumplía ese teorema. Inventaron un objeto tal, que si entre dos puntos C y D se le conecta un resistor de 1 Ω, cuya conductancia vale 1 S, entre los puntos A y



- Transistor de potencia TPV8100B, usado en transmisión. Es de polaridad N, disipa 215 W, maneja tensiones de 40 V, y corrientes de 12 A. Mide 26 mm.



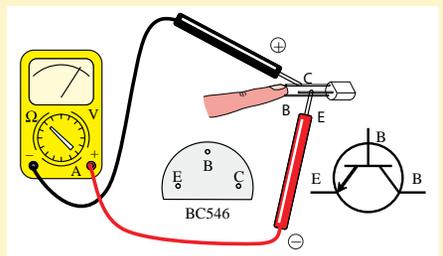
- El límite inferior del tamaño de un transistor es hoy el de una sola molécula. En la Universidad de Arizona experimentan con una molécula de benceno (C₆H₆), a la que consiguieron unirle tres conductores, uno de ellos de control. El aparato se llama QUIET (tranquilo), por las iniciales en inglés de *transistor de efecto de interferencia cuántica*. Se podría usar para almacenar información (la representación es artística).



● Esquemáticamente, un transistor se puede simbolizar como un sandwich triple, o con los iconos normalizados de la figura. Los transistores N se representan con la flecha del emisor saliente; y los P, con la flecha entrante. Su funcionamiento es el mismo, y sólo cambia la polaridad (recordemos que el sentido convencional de la corriente eléctrica es de positivo a negativo).

La figura muestra cómo experimentar con la transconductancia de un transistor cualquiera, por ejemplo uno BC546, de polaridad NPN (o N), un BC547, o BC550, similares. Esos transistores son de usos muy variados, comunes en los locales de venta, y de los más baratos; cuestan sólo centavos.

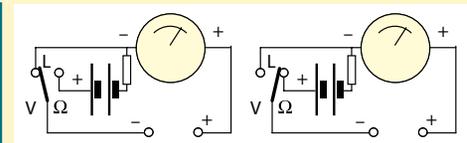
Para experimentar sirve cualquier transistor. Pero en algunos comercios de varios empleados y ventas muy organizadas, les incomoda que uno pida un transistor cualquiera, sin especificar su código, porque les lleva mucho tiempo consultar los manuales para una venta de escasa importancia. Para facilitarles la tarea se puede aclarar que queremos uno de 40 ó 50 V, de unos 100 mA, y de encapsulado TO-92.



● Con la llave del multímetro en 10.000 Ω, se conectan las puntas al emisor y al colector. La aguja indica, al principio una resistencia muy elevada. Pero al apoyar el dedo entre la base y el colector, el instrumento marca 1.000 Ω, lo que no sucede cuando se pone el dedo, directamente, entre las puntas.

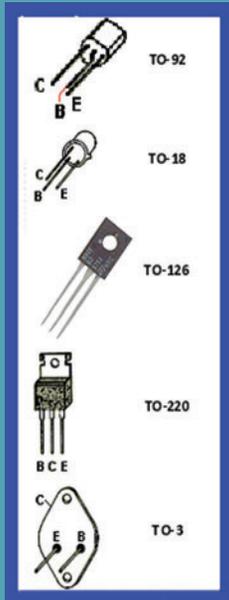
El aparente error de signos de polaridad en la figura, no es tal. En muchos multímetros, cuando se los usa para medir resistencias, el positivo aparece en el borne marcado como negativo. La figura de abajo explica el porqué.

● Con la llave L en la posición V, el instrumento mide tensiones continuas. En Ω, mide resistencias, pero el positivo de la pila aparece en el borne marcado como negativo.

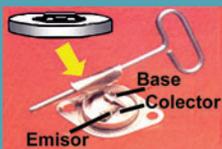


Esa contradicción entre la polaridad indicada en el enchufe, y la que se observa en la correspondiente punta de prueba, es fuente de confusión para los aficionados y aficionadas. Algunos, para tener presente la polaridad correcta, invierten la conexión de las puntas, para que la roja sea la positiva.

Si un fabricante de multímetros quisiera evitar ese efecto, debería usar una llave de selección de contactos de más pisos; más voluminosa y cara, sin que su



● Algunos de los distintos tipos de encapsulado de transistores. Los más grandes, metálicos, son para potencias grandes, y se montan sobre disipadores de aluminio, con una grasa especial conductora del calor. Las letras TO significan *transistor outline*, o croquis de transistor. Abajo: transistor por dentro.



beneficio sea realmente importante, porque la mayoría de los usuarios emplea el óhmetro sólo para medir resistencias, y no para probar transistores. Para esta función, los multímetros algo avanzados tienen uno o dos zócalos especiales para enchufar los transistores, según su polaridad. Su factor de amplificación se lee directamente en la pantalla.



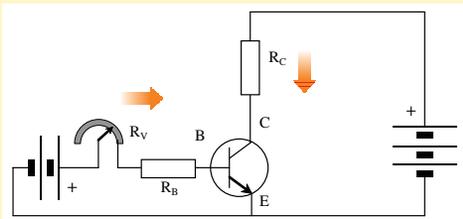
● **Multímetro con zócalo de prueba de transistores, con contactos repetidos, útiles para no tener que doblar las patas, según el orden en que estén dispuestos el emisor, la base y el colector.**



● Los resistores variables de cursor deslizante se conocen como *potenciómetros* en el comercio. Los hay helicoidales, de unas diez vueltas, llamados *helipot*. A los más chicos les dicen de preajuste, y más comúnmente, *presets*.

● Curvas características de un transistor. Coeficientes alfa y beta

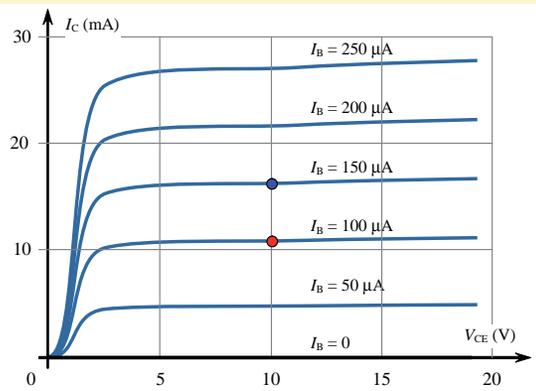
Las curvas características de los transistores facilitan el diseño, el uso y la reparación de equipos electrónicos. El circuito de la figura, aunque carece de aplicación práctica, sirve para determinarlas,⁵ o para comprender su significado.



Con la batería de la izquierda y un resistor variable a voluntad, R_V , se hace circular una corriente a través de la juntura base-emisor. Eso hace que circule una corriente mayor entre el colector y el emisor. Esta corriente, I_C , depende de la tensión de la batería de

la derecha, de la resistencia del resistor colocado en serie con el colector, R_C , y de la corriente de base, I_B .

Por ejemplo, cuando la tensión entre el colector y el emisor es de 10 V, y la corriente de base es de 100 μA , la corriente que pasa por el colector vale unos 11 mA (punto rojo en la figura). Si la corriente de base sube a 150 μA , la



⁵ En la práctica, y salvo en laboratorios de enseñanza, se usa muy poco ese método manual de tomar los datos para el trazado de las curvas características. Hay aparatos que hacen eso automáticamente, y muestran el resultado en una pantalla.



● Curvas características de un transistor, trazadas, automáticamente, en la pantalla de un osciloscopio. Arriba, en conducción plena, o saturación; abajo, sin conducción, o corte; en el centro, el punto de operación normal, en el cual el transistor es sensible a la señal de entrada.

Por la presencia del resistor R_C , cuando aumenta la corriente de colector, disminuye la tensión entre el colector y el emisor; eso lo representa la recta azul, o recta de trabajo del transistor.



- El circuito descrito a la derecha detecta el movimiento de un bolígrafo frotado contra la ropa. También se puede experimentar la conducción de la corriente a través de la llama de un encendedor. Y, con contacto directo, se detectan grados muy pequeños de humedad en papeles y maderas. El sencillo aparato es sensible a los campos eléctricos de las líneas aéreas.



- Farol de exterior. Por economía, se enciende sólo cuando el sensor infrarrojo detecta la presencia humana. El foco es de tanta potencia (500 W), que conviene que no lo maneje, directamente, un transistor, sino un relé electromecánico, cuyo clic se oye cuando actúa. La bobina del relé lleva un diodo, para protección del circuito.

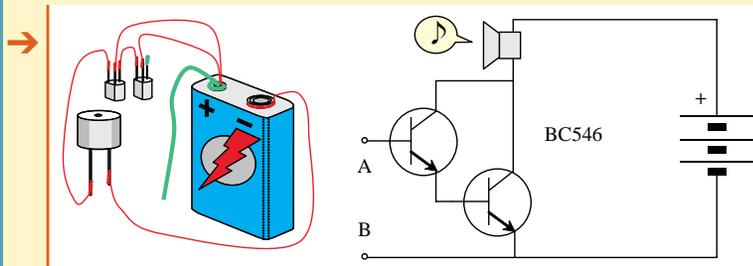
corriente de colector asciende a unos 16 mA (punto azul). La diferencia de corrientes de base es de 50 μ A, mientras que la diferencia de corrientes de colector es de 5 mA, ó 5.000 μ A. Entonces, la ganancia de corriente, si se usara ese transistor como amplificador, sería de un factor cien. Ese factor se llama el *coeficiente beta* (β) del transistor. De modo análogo, se define un coeficiente alfa (α), como el cociente entre la variación de la corriente de colector, y la variación de la corriente de emisor.

Si se tiene en cuenta que la corriente de emisor es igual a la suma de las corrientes de base y de colector, resultan las siguientes relaciones:

$$\alpha = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_E} \quad \beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} \quad I_E = I_C + I_B \quad \alpha = \frac{\beta}{1 + \beta} \quad \beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$$

Los transistores se pueden conectar uno a continuación de otro, y así multiplicar las ganancias. El circuito de la figura, ideado por Sidney Darlington en 1950, tiene tanta ganancia, que detecta la proximidad de un cable de corriente alterna sin necesidad de establecer contacto con él.

Se usan dos transistores N cualesquiera, una batería de 9 V, y un zumbador, o *buzzer*, con oscilador incorporado. Si se toma uno de los cables verdes con la mano

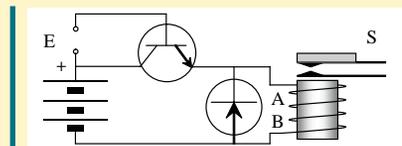


y se acerca el otro a un cable de un artefacto, sin necesidad de pelarlo ni de tocarlo, el aparato suena.

Carga inductiva en circuitos con transistores

A veces, se usan transistores para accionar un relé,⁶ cuyos contactos manejan corrientes y tensiones que serían excesivas para el transistor. En ese caso es necesario poner un diodo en paralelo con la bobina del relé, para evitar que aparezcan tensiones muy elevadas como consecuencia de las variaciones rápidas de la corriente que pasa por la bobina, cuya autoinducción es importante.⁷

- E:** entrada de señal, o conexión de una gran resistencia. **S:** contactos de salida. Sin en diodo, cuando la corriente disminuye rápidamente, en la bobina del relé se inducirían tensiones elevadas.



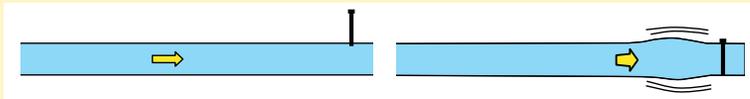
⁶ El funcionamiento de un relé se describe en el Cap.8.

⁷ La autoinducción se trata en el Cap. 8.

Una manera de entender la función de ese diodo de protección, es imaginar que la corriente cae a cero bruscamente. Entonces se genera una fuerza electromotriz de autoinducción, cuyo sentido es opuesto al de la variación de la corriente: el extremo *B* de la bobina del relé, se hace positivo con respecto al extremo *A*. En ese caso, el diodo conduce, y limita la tensión a menos de un volt. Sin el diodo, pueden aparecer miles de voltios, y dañarse el transistor.

Símil hidráulico con la bomba de ariete

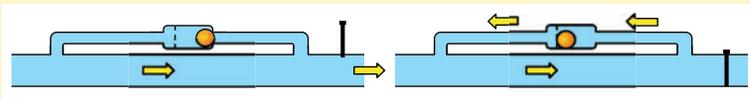
Otra manera de captar intuitivamente la función del diodo de supresión de tensiones excesivas, es comparar ese efecto con uno similar en un circuito hidráulico. Imaginemos un caño largo horizontal por el que circula agua velozmente; y que, en cierto instante, alguien cierra, bruscamente, la esclusa.



La consecuencia de esa maniobra, por la inercia del líquido, es la generación de una gran presión, especialmente, si el tubo es largo, y la velocidad alta.

Ese efecto se conoce como *golpe de ariete*, y era causa de daños en instalaciones de agua mal diseñadas. Pero también tiene aplicaciones útiles, para bombear agua en ríos rápidos: Se deja que el agua tome velocidad en un tubo sumergido en el lecho del curso de agua, se tapa rápidamente el extremo de adelante, y se aprovecha el golpe de presión para subir el agua a un tanque. Pero aquí nos interesa comparar ese efecto hidráulico, con el eléctrico.

Una manera de evitar la presión excesiva cuando se cierra bruscamente la compuerta, es poner una válvula de sentido único, como indica la figura.



En la condición normal de conducción de agua, la válvula de un solo sentido está tapada, y por el brazo paralelo no hay circulación. Cuando se cierra la compuerta bruscamente, la presión en ese sitio hace que la válvula de un solo sentido se abra y permita la circulación del agua hacia atrás, con eso, se alivia la presión, y el caño no se esfuerza. El agua sigue circulando durante un breve tiempo, por inercia, hasta que las pérdidas detienen el líquido. Pero el caudal de salida cesa en el mismo instante en que se cierra la compuerta.



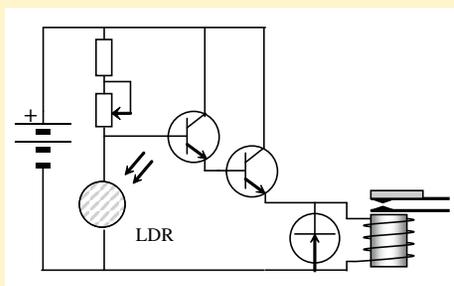
- Ariete es el diminutivo de aries, el carnero en latín, y el nombre del tronco para derribar las puertas de las fortalezas. Los antiguos adornaban la punta con cuernos de carnero, porque creían que así el arma cobraría la fuerza con la que los machos de oveja topan con sus contrincantes en la disputa por hembras y territorio. Todavía hoy, algunos cuelgan cuernos en sus vehículos, para que les den suerte en los choques.



- Para energías altas, los diodos resultan insuficientes para limitar las tensiones excesivas. Los descargadores de gas limitan la tensión a valores convenientes, como 100 V para un módem, o 350 V para un televisor. El de la figura, de un centímetro, se conecta a los dos polos de la línea, con el centro a tierra.

De modo similar, en el circuito electrónico, el diodo de supresión de tensiones excesivas, normalmente, no conduce; y cuando la corriente cesa de súbito, la fuerza electromotriz que aparece en la bobina del relé hace que la corriente siga circulando a través de ella y del diodo, en círculo cerrado, hasta que las pérdidas por la resistencia eléctrica la debilitan, y la corriente cesa. El relé queda tomado, o en contacto, por un breve tiempo después de que el transistor dejó de conducir. Vuelve a su posición de reposo con una fracción de segundo de retardo.

En esta comparación, el caudal de agua se identifica con la corriente eléctrica, la compuerta que corta el caudal, con el transistor que interrumpe la corriente; y la presión grande en el caño y entre los dos lados de la compuerta, con la tensión elevada en la bobina y entre el emisor y el colector del transistor.



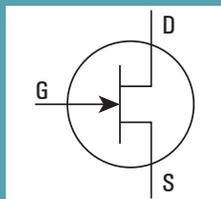
● **Circuito de encendido automático de una luz al caer la noche, basado en una LDR (light dependant resistor), o fotorresistor, cuya resistencia varía con la intensidad de luz que recibe. El resistor variable de cursor, arriba, permite ajustar la sensibilidad. Nótese el diodo en oposición, para proteger los transistores de las tensiones grandes que podría generar la bobina del relé cuando la corriente varíe rápidamente, por ejemplo cuando caiga luz sobre el aparato.**

La protección de los componentes de un circuito electrónico contra las tensiones excesivas que puedan sufrir, es un problema de solución difícil, al punto de que los fabricantes de equipos suelen poner de manera explícita en sus garantías, que éstas no cubren los daños sufridos como consecuencia de descargas atmosféricas, anomalías en el suministro eléctrico, caída de cables de energía sobre los telefónicos o de señal, o tensiones de pico producidas por la parada de grandes motores. Los aparatos más expuestos a esos daños son las computadoras, los reproductores de discos de imagen y sonido y, especialmente los módem, a pesar de que tienen varistores y descargadores.

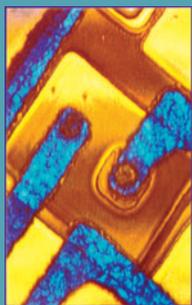
La experiencia industrial sostenida, y la atención de un importante historial de fallas, a veces conducen a diseños razonablemente confiables, y a la fabricación de aparatos que resisten las tensiones excesivas, o que limitan la reparación al reemplazo de un fusible.

● Teoría elemental del transistor

En el capítulo 12 se describió el diodo semiconductor como la unión de dos cristales del mismo elemento químico, por ejemplo silicio, cuyos átomos tienen



- Los FET (iniciales, en inglés, de *transistores de efecto de campo*) tienen un principio de funcionamiento diferente al de los transistores de unión. La conducción entre la fuente (S) y el drenaje (D) se produce por el mero campo eléctrico de la compuerta (G), sin que circule corriente por ella.



- Transistor de un micrón de tamaño (caben mil en un milímetro). En el medio, el emisor; alrededor, la base; al costado, el colector. Alrededor, más transistores. Para construirlo, se usan medios fotográficos, fotoquímicos, y de deposición de materiales evaporados al vacío.

cuatro electrones exteriores. Uno de los cristales se dopa con arsénico, antimonio o fósforo, de cinco electrones externos, y el otro con aluminio, indio o galio, de tres electrones externos, y así resulta la unión de un cristal con exceso de electrones, N, y otro con defecto de ellos, P.

Para cierto rango de tensiones, esa unión conduce la corriente en un solo sentido, de P a N (del ánodo al cátodo), como en una válvula termoelectrónica.

En un transistor de juntura hay tres cristales: emisor, base y colector. Los extremos son de la misma polaridad; N en la figura.

Si se polariza de manera inversa la unión de la base y el colector, esa unión, naturalmente, no conduce.

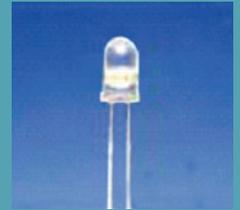
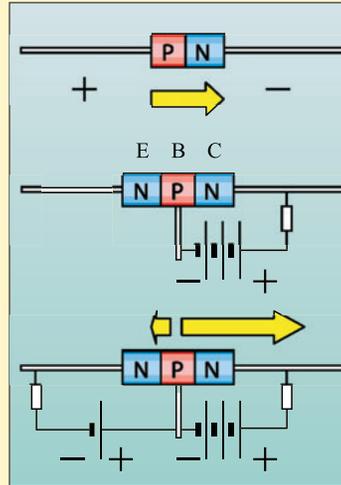
Pero si después se polariza en forma directa la otra unión, la de la base y el emisor, ésta sí conduce; se comporta como un diodo en conducción directa.

La base atrae y libera el sobrante de electrones del cristal N del emisor; esos electrones pasan al colector, que está polarizado, positivamente, con respecto a la base, y a una tensión mayor que la que existe entre el emisor y la base.

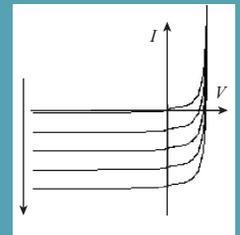
El potencial positivo de la base con respecto al emisor hace que los electrones del emisor puedan superar la barrera o salto de energía que los mantenía en ese electrodo como si estuvieran en un pozo, y pasen a una región en la que el colector los pueda atraer.⁸

El funcionamiento del transistor parece semejante al de un triodo de vacío; pero en su caso influye más, marcadamente, el carácter *cuántico* de la conducción.

La mecánica cuántica, nacida en 1916 a partir de los trabajos de Niels Bohr, Max Planck, Erwin Schrödinger y Werner Heisenberg,⁹ establece que una partícula no puede absorber, ni emitir, cualquier valor de energía; tiene que transferirla en paquetes, llamados *cuantos*. La energía de los cuantos es proporcional a la frecuencia de la partícula. Un hecho de la cuántica es que todas las partículas tienen fre-



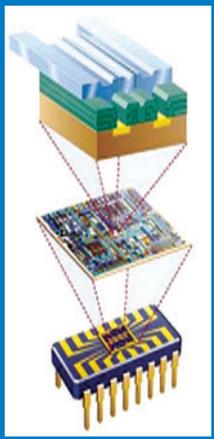
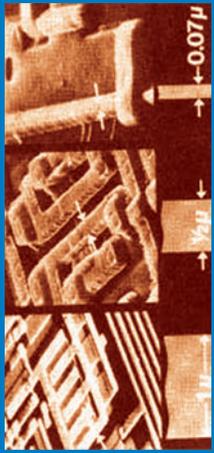
- Los diodos son sensibles a la luz, pero muchos están encapsulados en medios opacos. En cambio los leds, naturalmente, tienen encapsulado transparente; entonces se puede experimentar fácilmente con ellos. Una de sus propiedades es que la conducción directa varía con la iluminación. Otra, es que generan una pequeña tensión eléctrica, por los que se los puede usar (con un rendimiento pésimo) como celdas fotovoltaicas.



- Un led genera más de medio volt cuando le da la luz. Cuando se lo ilumina, su curva característica se desplaza hacia abajo.

⁸ Tony R. Kuphaldt propone esta analogía: Una persona ubicada donde hay viento, pero no bastante para arrancar los pétalos de una flor, sopla estos y los desprende, con lo que el viento los arrastra. Del mismo modo, la base positiva del transistor desprende los electrones del emisor N, y deja que el colector los atraiga.

⁹ Esos científicos nacieron, respectivamente, en Dinamarca, Alemania, Austria, y nuevamente Alemania. El entonces alemán Albert Einstein se oponía a los principios y filosofía cuánticos, especialmente en las primeras épocas de esa teoría, cuando las explicaciones de los fenómenos parecían contradictorias, y recurrían al azar ("¡El Señor no juega a los dados!", exclamaba, indignado). Sin embargo, cinco años después mereció el Premio Nobel por haber hallado una explicación *cuántica* del efecto fotoeléctrico, por el cual los fotones que arrancan electrones del cátodo de una celda fotoeléctrica, tienen una energía proporcional a la frecuencia de cada una de esas partículas de luz.



cuencia, como las ondas. Y, en rigor, no hay partículas y ondas diferenciadas; todo lo que existe tiene frecuencia, y gana o pierde energía siempre de a saltos. Esa audaz idea, después muy corroborada, chocó con la intuición y la costumbre, revolucionó la física, e influyó en el pensamiento filosófico general, al deducirse de ella que no hay causas ni efectos absolutos.

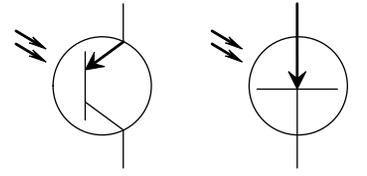
● Transistores de diferentes tipos

Desde 1947, cuando se inventó el transistor, hasta 1951 cuando se otorgaron las primeras patentes comerciales, había no más de diez tipos diferentes de transistores, según fueran de contacto o de juntura, de silicio o de germanio, o de polaridad P o N. La variedad actual es tan grande, que ni los especialistas las conocen en su totalidad, o siquiera en una gran parte, porque salen al mercado permanentemente nuevos tipos. Siguen algunos ejemplos; el capítulo siguiente menciona otros.

● Fotodiodos y fototransistores

Tanto los diodos como los transistores son, normalmente, sensibles a la luz. El efecto se consideró inicialmente un problema de interferencia en el buen funcionamiento del componente, hasta que se le halló utilidad, y se lo usó en reemplazo de las fotocélulas y los fotorresistores, con algunas ventajas.¹⁰ El fototransistor tiene más sensibilidad que el fotodiodo.

● **Símbolos del fototransistor y el fotodiodo. En los modelos más comunes, el fototransistor tiene la base inaccesible. El efecto principal de la luz es aumentar su conducción.**



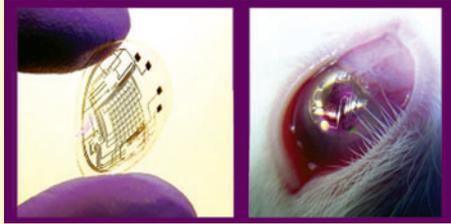
● Transistores emisores de luz

Tal como lo hacen los leds (diodos emisores de luz), los transistores emisores de luz, o *tels*, emiten luz cuando conducen, pero a diferencia de los diodos, admiten muy débiles señales de comando a través de sus bases. Eso simplifica la conec-

¹⁰Las LDR encapsuladas en plástico suelen ser sensibles a la humedad; además van perdiendo sensibilidad con el tiempo, y tardan varios segundos en recuperar su estado inicial de escasa conducción, después de haber estado expuestas a una luz intensa. Los fotodiodos y fototransistores, en cambio, tienen una mayor velocidad de respuesta, y son más estables.

● Microcircuito como el de la primera página, pero sin la gota de cemento. Arriba, ampliaciones. El grosor de los contactos de los transistores es de unos 50 nanómetros, aproximadamente el de 500 átomos (un micrón equivale a mil nanómetros; y mil micrones, a un milímetro).

ción de las pantallas de imagen, reduce el calibre de los conductores, y permite la realización de varias funciones adicionales, entre ellas la memoria de la imagen, tal como ocurre con los transistores de la memoria de una computadora.



● **Circuito impreso con transistores emisores de luz que generan imágenes enfocadas sobre la retina, desde una lente de contacto colocada en el ojo de un conejo con fines experimentales.**

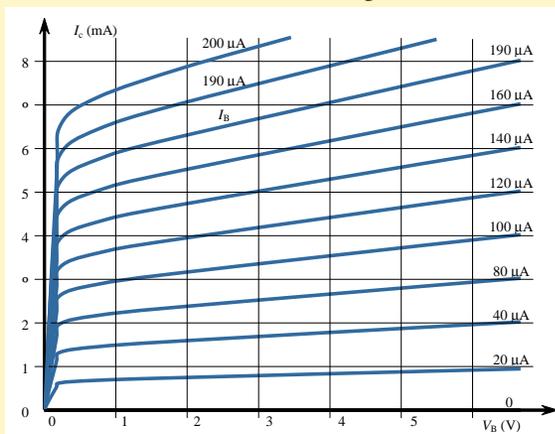
● Transistores de alta tensión

Sin aplicaciones muy difundidas hasta el momento, hay transistores que trabajan con tensiones de hasta 10 kV entre el colector y el emisor.

El desarrollo de nuevos tipos de transistores se orienta, principalmente, en esta época, a las comunicaciones, la computación, el almacenamiento de datos, su procesamiento, y el de las señales eléctricas y ópticas. Lo que se demanda y se busca en estos años, es mucha velocidad y pequeño tamaño.

PROPUESTAS DE ESTUDIO

13.1. ¿Cuánto vale, aproximadamente, el coeficiente beta del transistor cuyas curvas características son las de la figura?



13.2. ¿Es posible que dos transistores tengan el mismo coeficiente beta, y diferentes coeficientes alfa? Justificar

13.3. Antes de que se inventaran los triodos de vacío y los transistores, se consiguieron producir y detectar ondas electromagnéticas, u ondas de radio. Averigüen por otros medios cómo se consiguió eso y cuándo sucedió este hecho.

13.4. Una noticia de origen dudoso afirma que, en un laboratorio consiguieron fabricar un microprocesador para computadora con una capacidad de almacenamiento de datos de un terabyte, y una frecuencia de procesamiento de un terahertz (el prefijo tera significa un billón, o 10^{12}). ¿Será eso posible, al menos teóricamente? Como pista para dar una respuesta, consideremos que un byte equivale a ocho bits; que para almacenar un bit hacen, falta al menos, dos transistores; que el tamaño mínimo de un transistor es el de un átomo (10^{-10} m), y que las señales eléctricas, como cualquier otra, tienen como límite de velocidad la de la luz en el vacío, 3×10^8 m/s.

13.5. ¿Qué función cumple el resistor fijo en serie con el resistor variable, en el circuito de encendido nocturno de la página 160? Como pista para hallar una respuesta, se puede considerar que la corriente de base que soporta un transistor sin deteriorarse, tiene un límite dado por el fabricante.

● Otras fuentes de estudio e información

- Sugerimos buscar en la Red con las palabras transistor, nuevos, transconductancia, dopaje, dopado, base, colector, emisor, compuerta, drenaje (o sumidero) y fuente.
- Este sitio ofrece una teoría elemental del transistor, con gráficos animados:
http://www.profesormolina.com.ar/tutoriales/curso_enica2/curso2.htm#16
- Gray, Paul E. *Principios de electrónica: electrónica, física, modelos y circuitos electrónicos*, Reverté, Barcelona, 1971. En Libros Google se puede hojear una parte.

Componentes



- Iluminador, con 144 diodos emisores de rayos infrarrojos de un micrón de longitud de onda, llamada radiación infrarroja cercana. Esa fuente de radiación invisible se usa para las cámaras de TV de entradas de edificios, y de salas de hospitales.

La radiación permite ver quien llama, o cuidar pacientes mientras duermen, sin causarles incomodidad con luces intensas.

Se alimenta con una batería o una fuente de 12 V, de la que toma una corriente de medio ampere. Cuando alguien se mueve delante, la parrilla se enciende automáticamente, porque incluye un sensor pasivo que detecta los rayos infrarrojos que emite el cuerpo humano, de nueve o diez micrones de longitud de onda, llamados rayos infrarrojos lejanos.

A tres metros de distancia, el aparato ilumina una zona de tres metros de diámetro. En la esquina de abajo a la derecha, la cámara.

Muchos de esos componentes son discretos, y se consiguen sueltos en el comercio; otros, como la cámara, y el detector pasivo de movimiento, son integrados.

- La venas traslucen mejor con rayos infrarrojos cercanos, que con luz visible ordinaria.



Foto: Dean W. Armstrong

Componentes

0: Negro
1: Marrón
2: Rojo
3: Anaranjado
4: Amarillo
5: Verde
6: Azul
7: Violeta
8: Gris
9: Blanco



Dorado: $\pm 5\%$
Plateado: $\pm 10\%$
Sin banda: $\pm 20\%$

- Código de colores de cuatro bandas para resistores. La primera banda representa la primera cifra, la segunda banda, la segunda cifra; la tercera banda, la cantidad de ceros que se agregan; la cuarta banda coloreada indica la tolerancia. El resistor de la figura es de $22\ \Omega \pm 10\%$.



- Antiguamente, los resistores se identificaban con el mismo código actual de colores, pero en vez de bandas el orden de lectura era: cuerpo, cabeza y punto. En la figura, un resistor de $27\ \Omega$. Cuando no tenía punto, se suponía que era del mismo color que el cuerpo; en este caso, si faltara el punto violeta, el resistor sería de $22\ \Omega$.

Un componente es toda pieza o elemento de un circuito o aparato electrónico, que se pueda separar del resto y tenga una función genérica. A veces se les dice *componentes discretos*,¹ para dejar en claro que son separables, los proveen sueltos y no están integrados con otros.

Un componente discreto es, por ejemplo, un resistor, un diodo o un transistor, entre muchos otros. Un componente integrado sería un amplificador, o bien el circuito procesador de un reloj, el de una computadora, o un par de transistores en conexión Darlington (descrita en el capítulo anterior).

La ventaja de los componentes discretos es la libertad de diseño que ofrecen, porque se pueden usar en muchas combinaciones, para armar circuitos de muy variados usos. Los componentes integrados, en cambio, sirven para menos funciones y, a veces, como en el caso del reloj, para una sola. Pero son más pequeños, y su costo es menor que el del conjunto de componentes discretos necesarios para cumplir igual servicio.

Entre el resistor y el procesador de la computadora hay muchos casos intermedios. En algunos, se integran pocos componentes, para lograr funciones más especializadas que las de los componentes discretos, pero todavía amplias. Los diseñadores y fabricantes determinan qué nuevas integraciones se producen para reemplazar componentes discretos por los integrados. Las primeras invenciones o desarrollos se basan en elementos separados, pero cuando alcanzan una fabricación masiva, como la de televisores, radios y teléfonos, se tiende a la integración.

Los casos que se presentan en este capítulo son sólo algunos. Los fabricantes publican las hojas de datos de los productos; y cuando son nuevos, suelen proporcionar ejemplos de aplicación.

● Resistores

Un resistor es un componente cuya función principal es la de oponerse al paso de la corriente eléctrica, o la de generar calor y es el componente que más se usa

¹ *Discreto* significa separado; y es lo opuesto de continuo (*la materia, la energía y la carga eléctrica son discretas*). Se aplica también a las personas que saben distinguir lo bueno de lo malo, o son reservadas en sus actos y dichos. A *discreción* significa librado al buen juicio de cada uno.

en la electrónica y la electrotecnia. Los hay de los tamaños más diversos, desde un metro de altura y de fundición de hierro, para el freno de trenes y tranvías, hasta los de tamaño microscópico de los circuitos integrados. Hay resistores de alambre, de carbón macizo, de carbón depositado en superficies, de metales, y de materias sólidas y líquidas. Los resistores más comunes en circuitos de tamaño intermedio, son los de carbón.

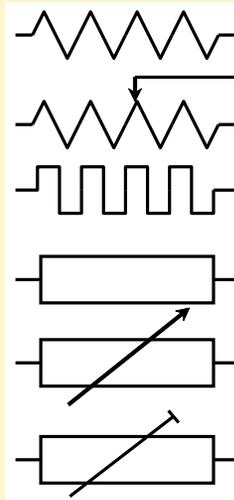
Un resistor se caracteriza por su resistencia, por la tensión máxima que se le puede aplicar sin que salten chispas entre sus extremos, por la potencia que puede disipar sin destruirse, y sin exceder la temperatura permitida por el diseño, por la precisión (o tolerancia) del valor de la resistencia, y por su variación con la temperatura.

Aunque se venden resistores de, prácticamente, cualquier resistencia, conviene adaptar los diseños a los valores normalizados, que son: 1,0; 1,2; 1,5; 1,8; 2,2; 2,7; 3,3; 3,9; 4,7; 5,6; 6,8; 8,2; y sus múltiplos de potencias enteras de 10. Por ejemplo, si pedimos resistores de 500 ohm, nos recomendarán seguramente que elijamos entre 470 y 560 ohm.

Los resistores más comunes tienen cuatro bandas coloreadas que indican su resistencia, y la tolerancia de ésta, como se muestra en el recuadro. La potencia máxima admisible se sabe por el tamaño. Pero hay otros códigos de identificación, que usan cinco bandas; en ese caso hay tres bandas separadas de las otras dos, que dan las tres cifras significativas. De las otras dos bandas, la primera indica la potencia de diez por la que hay que multiplicar (o lo que es lo mismo, la cantidad de ceros que se añaden); y la última banda informa la tolerancia: marrón, 1 %; rojo, 2%; verde, 0,5%.² Los resistores de alambre no usan colores, porque suelen trabajar a temperaturas más elevada que los de carbón, y virarían los colores de la pintura.

La resistencia, en los resistores de alambre, se indica con números; pero algunos fabricantes, por simplicidad, reemplazan el símbolo de ohm por la letra R; los millares los indican con la letra K; y los millones, con M; y no usan ni coma ni punto decimal. Por ejemplo, 4R7 significa 4,7 Ω ; y 4K7, 4.700 Ω .

Los símbolos de los resistores son los indicados en la figura. La línea en zigzag representa, de manera simplificada, un solenoide, es decir, un alambre bobinado alrededor de un cilindro aislante. Más abajo, el símbolo de un resistor ajustable.



² Nadie se confundiría e interpretaría esa banda verde con un cinco por ciento de tolerancia, porque si tal fuera el caso, sería ocioso suministrar tres cifras significativas.



- Resistores para tensiones elevadas. El de la izquierda es de 3,3 M Ω \pm 10%, y soporta 5 kV. La deposición de carbón en forma de hélice permite alcanzar altos valores de resistencia.



- Resistores de alambre ajustables, de brida deslizante. El contacto de la brida ajustable es más firme que el deslizante de un potenciómetro, pero también más incómodo. Estos componentes se usan cuando hay que hacer ajustes sólo una vez.

En ciertas aplicaciones de alta frecuencia, un resistor de solenoide presenta efectos inductivos importantes, que suelen ser indeseables. Se usaban, por eso, resistores de alambre en los que, en vez de estar arrollado, iba y venía en cada vuelta, para reducir la inductancia. Eso lo representa el tercer símbolo, el de la guarda griega. El cuarto, el rectángulo, es el símbolo habitual de un resistor, cuando no viene al caso aclarar si es o no inductivo, o cuando se sobreentiende que no lo será en alto grado, por ser de carbón, y no de vueltas de alambre. Más abajo, más símbolos de resistores ajustables o variables; el último indica que el ajuste se realiza con un destornillador, y no mediante una perilla, como los resistores de ajuste o *presets* mencionados en el capítulo anterior. Cuando junto al símbolo hay un número sin unidades, se supone que indica la resistencia en ohm.

La potencia que pueden disipar los resistores depende del tamaño, de la ventilación si están al aire, y de las características del medio en el que puedan estar sumergidos, o encapsulados. La tabla siguiente da la potencia máxima en aire quieto, para los tipos más comunes de resistores.



TIPO	LONGITUD mm	DIÁMETRO mm	POTENCIA W	TENSIÓN (V)	
				NORMAL	MÁXIMA MOMENTÁNEA
R 16	3,2	1,8	0,16	250	400
R 25	6,2	2,3	0,25	300	600
R 50	6,5	2,3	0,5	350	700
R100	15,0	6	1	400	1000

• Diodos emisores de infrarrojo

La radiación solar se compone de aproximadamente un 47,3% de luz natural, o radiación visible para los humanos, cuya longitud de onda está comprendida entre 0,42 y 0,70 micrones (que corresponden, respectivamente, al violeta y al rojo); un 45,7% de radiación infrarroja (IR), de longitud de onda comprendida entre 0,7 y 3,0 micrones, llamada radiación infrarroja cercana, y un 7,0% de radiación de longitud de onda menor que la de la parte visible, llamada radiación ultravioleta, o UV, que se clasifica, a su vez, en dura y blanda.³

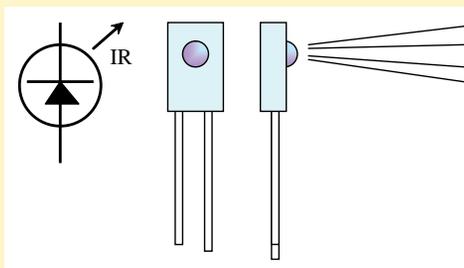
Los diodos infrarrojos, ya mencionados en el capítulo 12, emiten radiación infrarroja de longitud de onda de aproximadamente un micrón; muy cercana a la de la luz visible.

³ El Sol emite también pequeñas fracciones de otras radiaciones, que no cuentan para la precisión que estamos usando, de sólo tres cifras significativas. Las de menores longitudes de onda son la llamada radiación ultravioleta dura, los rayos X y los rayos gamma; las de mayor longitud, los rayos infrarrojos lejanos, las microondas, y las ondas de radio.

Los diodos infrarrojos se usan en controles remotos, y se los prefiere a los leds de luz visible, por la ventaja de que su radiación no se ve, entonces no incomoda, por ejemplo, en la pantalla de un televisor, cada vez que se cambia de canal, o se ajusta el volumen de sonido.

Antiguamente, se usaban para hacer barreras de radiación, que los intrusos interrumpían con su presencia, y con eso se accionaba una alarma. Su ventaja con respecto a las barreras de luz visible, era que resultaban más difíciles de detectar y de burlar.⁴

Hay diodos IR de diferentes formas y tamaños. Los más comunes son los cilíndricos. Los hay, también, rectangulares. La figura ilustra un modelo compacto, el OC240, para montar en circuitos impresos de controles remotos pequeños. Mide 5,72 por 4,45 por 1,57 milímetros, sin los alambres de conexión, que se cortan a medida. Tiene una lente frontal que concentra el haz de radiación, para que llegue más lejos sin que se debilite.



La hoja de datos de ese componente informa que la corriente máxima directa es de 50 mA; tiene una tensión máxima inversa de 2 V, con la que circula una corriente inversa de 100 μ A; y la potencia máxima es de 100 mW. La longitud de onda promedio de su radiación es de 0,890 micrones (o lo que es lo mismo, 890 nanómetros), y la mitad de la potencia la emite entre 810 y 970 nanómetros de longitud de onda. Siempre de acuerdo con la hoja de datos, la mitad de la radiación se proyecta dentro de un ángulo de 40 grados. Desde el instante en el que se lo alimenta, tarda medio microsegundo en empezar a irradiar; y la mitad de ese tiempo, en dejar de emitir desde que se lo desconecta.⁵

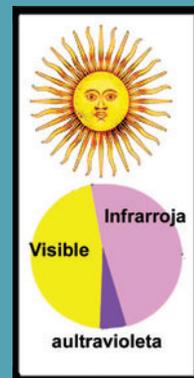
La eficiencia de los diodos IR es semejante a la de los leds, y según los modelos, vale entre 20 y 100 lúmenes por watt.⁶

El diodo infrarrojo se usa en conjunto con otro componente que detecta la ra-

⁴ Actualmente, y para esa aplicación de vigilancia, se prefieren los sensores pasivos de radiación infrarroja, que se mencionan más adelante en este capítulo.

⁵ Esos datos son importantes para saber cuál es la máxima frecuencia, o velocidad de transferencia de datos, que se puede manejar con ese diodo IR; no más de 1 MHz en este caso, porque un ciclo de una corriente de esa frecuencia dura una millonésima de segundo; media millonésima para subir, y otra media para bajar; y justo ese tiempo es el mínimo que garantizan.

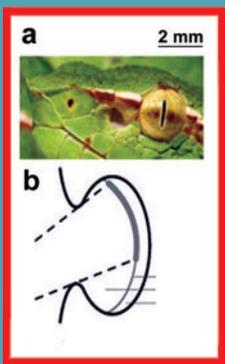
⁶ La eficiencia máxima teórica es de 683 lm/W. Un lumen es la potencia luminosa irradiada por una fuente de una intensidad de una candela (o una bujía), sobre una superficie de un metro cuadrado, ubicada a un metro de distancia. Y una candela es la intensidad luminosa de un objeto de platino de 1/64 de centímetro cuadrado de área, que se encuentre a la temperatura de fusión de ese metal, 2.046 K, ó 1.773 °C. Esa potencia es de 1/683 W, un número incómodo, y nada redondo, tuvo su origen en la facilidad experimental de mantener el platino incandescente a temperatura constante y elevada, sin que se oxide.



- Composición de la radiación solar. Nuestros sentidos perciben separadamente el calor de la luz, aunque con la luz se calienten los cuerpos, y el calor los ilumine. Quizá por eso el Sol de Mayo de nuestra Bandera, en la figura, tiene 16 rayos rectos y 16 curvos. Ese símbolo patrio proviene de la Revolución Francesa, y ésta lo tomó del reinado de Ajenatón, o Amenofis IV, de Egipto.



- Diodos emisores de rayos infrarrojos.



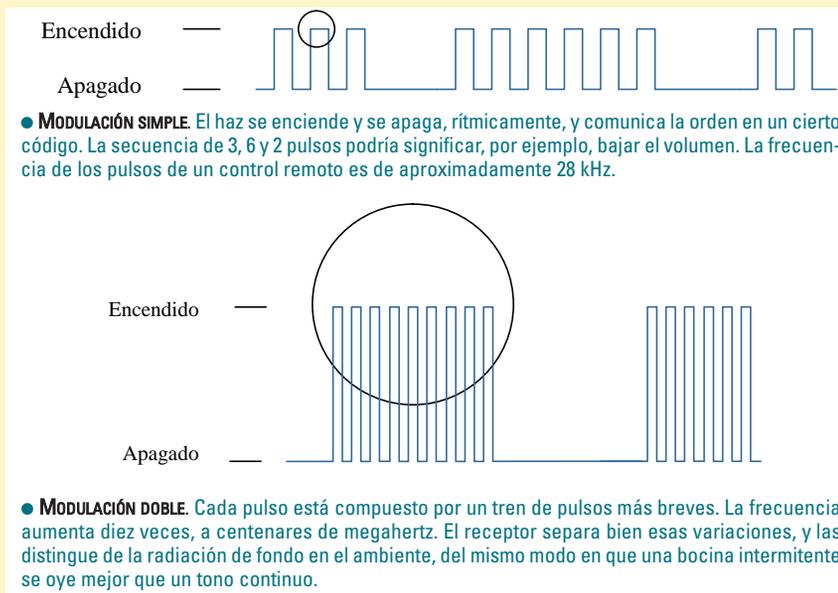
- Los humanos no vemos ondas de más de 700 nm, pero las detectamos, por ejemplo, con la cámara de un celular. Otros animales, como muchas serpientes, perciben (con órganos especiales) ondas de hasta diez micrones. (a) Pitón. (b) Su órgano sensible al infrarrojo lejano, formado por una piel separada de otros tejidos, y muy sensible al calor.



- Las pantallas al rojo de algunos calefactores eléctricos o de gas, o los hogares de leña encendidos, a veces disminuyen la sensibilidad de los detectores de rayos infrarrojos. Los folletos de instrucciones de los controles remotos suelen advertir eso al usuario, para que oriente el receptor hacia un lugar libre de radiaciones extrañas, o de espejos que las reflejen.

diación emitida, por ejemplo, un fototransistor receptor, o una fotorresistencia.

Los diodos de los controles remotos encienden de manera intermitente, para enviar sus señales en código; eso permite ejecutar centenares de órdenes diferentes, según la cantidad de pulsos, la duración de cada uno, y la separación temporal entre dos pulsos consecutivos.



Cada fabricante de controles remotos establece sus propios códigos, por lo que raramente se puede comandar un aparato con un control de otra marca. Esa falta de universalidad y armonía obedece no sólo a razones de competencia comercial, o al deseo de obligar al cliente a que compre repuestos de la misma marca. A veces hay razones técnicas fundadas para apartarse de normas o prácticas difundidas. Por ejemplo, para disminuir la interferencia de fuentes naturales de rayos infrarrojos, como el Sol y los calefactores, algunos mandos tienen una doble modulación,⁷ o entrecortado del haz.

● Fototransistores

A lo anticipado en el capítulo anterior, agregamos ahora detalles. Un fototransistor, cuando recibe luz visible o radiación infrarroja, conduce la corriente eléctrica, y cuando permanece en la oscuridad, no conduce. Un ejemplo es el BP 103,

⁷ Modular un haz de radiación significa hacer que varíe su amplitud, su frecuencia o su fase. El caso más simple de modulación es hacer guiños: encender y apagar el haz.

de encapsulado TO-18, a la derecha en la figura.

Es sensible a radiaciones de longitudes de onda comprendidas entre 420 y 1.130 nanómetros. Acepta sin daños una tensión de hasta 50 V entre el emisor y el colector,

y una corriente de 100 mA entre esos dos únicos electrodos, con la condición de que la potencia máxima no supere los 150 mW (esos datos se obtienen de la hoja de datos publicada por el fabricante, en este caso Siemens).

Si se desea que el fototransistor responda sólo ante los rayos infrarrojos, y no a los visibles, se le puede poner un filtro, que se vende en los comercios con ese fin. Esto muchas veces carece de importancia, porque los fototransistores reciben señales codificadas en secuencias de pulsos, de modo que es raro que se los pueda interferir. Pero si se los usa en circuitos que detecten haces sin modular, entonces sí conviene ponerles un filtro.



● Fototransistores, y su símbolo.



- Con un trozo de disco flexible, se puede improvisar un filtro que impide el paso de la luz visible, y deja pasar los rayos infrarrojos.

Advertencia: esa poco conocida propiedad del material del disco, es fuente de accidentes. Si se observa un eclipse de Sol a través de ese filtro, se pueden sufrir quemaduras graves de la retina.

● Fotodiodos

En el capítulo anterior se comentó la propiedad fotovoltaica de los diodos, por la cual generan tensión cuando se los ilumina. Los fotodiodos son componentes fabricados, especialmente, con ese fin, aunque resulten disminuidas sus aptitudes como rectificadores, o como emisores de luz.

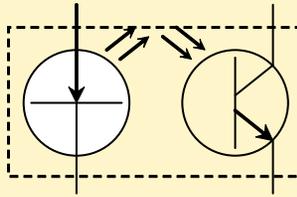
Siguen, como ejemplo, datos tomados de la hoja del fotodiodo QSD2030F, fabricado por Fairchild, encapsulado en plástico negro, pero transparente a la radiación de interés. Mide 4,95 mm de diámetro y 7,75 de altura, sin contar los alambres de conexión. Su sensibilidad máxima la presenta para la radiación de longitud de onda de 880 nm, pero es sensible al rango 700 – 1.100 nm. Tiene una capacitancia de un picofarad, y con un resistor de carga de 50 Ω responde a la luz y a la oscuridad en un tiempo menor de cinco nanosegundos. Soporta 50 V de pico inverso, y con 10 V de tensión inversa, conduce menos de 10 μ A de corriente. Con 5 V de tensión inversa y cuando se lo ilumina con una radiación de 950 nm de longitud de onda y una densidad de potencia de 0,5 mW/cm², conduce 25 μ A. Detecta la radiación que le llega dentro de un ángulo de 20 grados alrededor de su eje.





● Optoacopladores

El optoacoplador es un conjunto de un diodo emisor de luz, o led, y de un fototransistor (o bien un fotodiodo, o un fototransistor), los dos encapsulados juntos, y a salvo de la luz exterior. Cuando se hace circular corriente por el led, emite luz, que recibe el fototransistor; entonces éste conduce la corriente eléctrica.



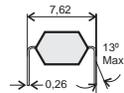
¿Qué utilidad tiene ese componente? ¿Por qué enviar una señal eléctrica a un led, hacer que la luz que emite excite un fototransistor para que conduzca, y obtener de éste, en suma, una nueva señal eléctrica? ¿No podríamos utilizar, en ese caso, directamente, la señal eléctrica de entrada, amplificada si fuere necesario?

La respuesta es que hay casos en que conviene separar o independizar dos señales eléctricas, para proteger el segundo circuito de tensiones anormales excesivas, o ruidos eléctricos, que puedan provenir del primero.

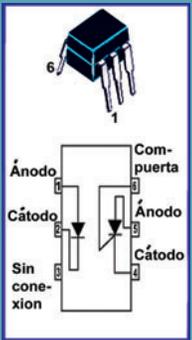
Entre la gran variedad de optoacopladores que se ofrecen en el comercio, entre ellos algunos múltiples de varias entradas, o de varias salidas, o bien, independientes, pero puestos en la misma cápsula para ahorro de sitio, transcribimos algunos datos de la hoja del ISP81X.

Su led de entrada admite una corriente directa de 50 mA, una tensión inversa de 6 V, y disipa hasta 70 mW. Su transistor de salida admite una tensión inversa de hasta 35 V, una directa de hasta 6 V, y una corriente directa de 50 mA, con una potencia de disipación máxima de 150 mW.

Amplifica la corriente de entrada en un factor 6. la resistencia de aislación entre la entrada y la salida es de más de 50 GΩ, y soporta, entre una y otra, una tensión de 5.300 volt eficaces de tensión alterna. Tiene un tiempo típico de respuesta de 4 μs, y el máximo garantizado es de 18 μs.



- Optoacoplador con ranura, para detectar el paso de objetos que interrumpan el haz luminoso, por ejemplo los dientes de una rueda de ratón de computadora.



- Hay diodos controlados que se disparan, indistintamente, con su compuerta, o mediante una señal luminosa provista por un led. Se llaman optoacopladores SCR, u optoSCR. En la figura, el 4N39 de Fairchild, de menos de 1 cm, para 200 V y 300 mA.

● Diodos controlados

Los diodos controlados, o tiristores, se conocen también como SCR, iniciales de *silicon controlled rectifiers*, rectificadores controlados de silicio.



Un diodo controlado se comporta de manera semejante a la de un diodo común, pero sólo conduce entre sus electrodos principales, el ánodo A y el cátodo K , cuando recibe una señal por un electrodo de control, la compuerta G .

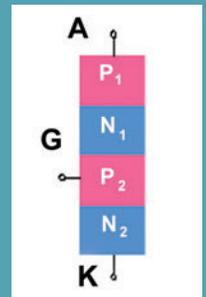
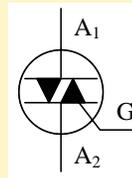
Se distingue de un transistor en tres hechos principales. Uno es que no conduce de manera proporcional a la corriente de control, sino que lo hace plenamente, o bien no conduce en absoluto, según que la señal supere o no el valor umbral de disparo. Otra característica distintiva es que, una vez que un diodo controlado comenzó a conducir, la conducción prosigue mientras la corriente no disminuya por debajo de un cierto valor de sostenimiento, aunque cese la señal.⁸ Más aún: un diodo controlado puede seguir conduciendo, aunque la tensión directa que se le aplique sea nula, si hay elementos inductivos en serie, por ejemplo la bobina de un relé, o la de un motor. Y un tercer hecho que diferencia el SCR del transistor es que también se dispara y conduce cuando se aplica bastante tensión directa; y sigue conduciendo hasta que, por un cambio en las condiciones externas, la corriente disminuya por debajo del límite de sostenimiento. Por estas razones, en vez de hablar de la conducción de un tiristor, se prefiere decir que se disparan, o se ceban, ya que la tensión directa pasa, bruscamente, del valor de la tensión de la fuente, cuando no conduce, a un valor pequeño, del orden de un volt, cuando se vuelve conductor.

● Triacs

Un triac (triodo para corriente alterna) tiene el mismo aspecto exterior que un SCR, pero controla la corriente en los dos sentidos.

Los triacs se usan en atenuadores de luces, o *dimmers*, que se comandan con una perilla desde cero al máximo, en hornos eléctricos, y en otras aplicaciones en las que se desee una regulación continua, y no de a saltos, de todo o nada, como la que proporciona un termostato consistente en un contacto que se abre y se cierra.

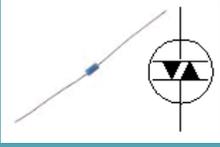
Si comparamos los tamaños de un transistor y de un triac (los dos para la misma tensión y corriente) el triac suele ser bastante más pequeño, porque como conduce o aísla, sin términos medios, entonces la potencia que disipa es pequeña.⁹



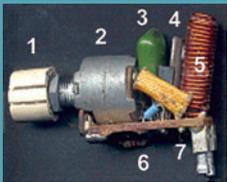
- Estructura de un diodo controlado de polaridad P. Los de la opuesta, tienen la compuerta conectada al cristal semiconductor N intermedio.

⁸ En ese aspecto, el SCR se comporta como un relé autoalimentado, tratado en el capítulo 8.

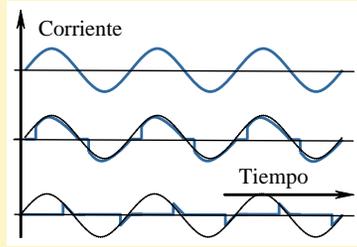
⁹ La potencia se calcula como el producto de la tensión por la corriente. Si la corriente que atraviesa el triac es elevada, pero la tensión directa de conducción es pequeña, entonces la potencia resulta moderada. En cambio, la tensión directa de un transistor entre el emisor y el colector puede alcanzar valores grandes, si la corriente de base adopta valores intermedios entre cero y la máxima de trabajo.



- Para facilitar el disparo de un triac, conviene poner, en serie con su compuerta, un *diodo de disparo*. Ese elemento, también llamado diac (diodo de corriente alterna), y *diodo de cuatro capas*, se vuelve súbitamente conductor cuando la tensión supera un umbral, y eso genera un pulso de corriente. Un diac se puede pensar como un triac sin compuerta. En la figura, un diac DB3, de tensión de disparo de 28 V admite pulsos de hasta 1 A.



- Atenuador de luz visto por dentro. El conjunto se monta en el mismo lugar que una llave común de luz. 1: perilla; 2: resistor variable. 3: capacitor. 4: triac. 5: inductor. 6: diodo de disparo. 7: contactos. Sin el inductor, el aparato interferiría otros, o la luz destellaría por influencias externas, cada vez que arranque un motor.

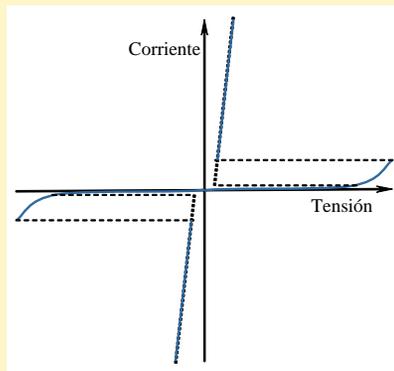


- Regulación proporcional de un triac. Arriba, conduce durante todo el período de la corriente alterna. En el medio, conducción durante un tiempo menor que el total. Abajo, conducción durante una pequeña parte de cada período.

A este tipo de control de la corriente, que consiste en permitir su paso durante parte del período de la corriente alterna, e impedirlo en el resto del tiempo, se suele llamar *control de ángulo*. El ángulo, en este caso, es el tiempo, y se le da ese nombre por similitud con el argumento de la función seno, o coseno, en trigonometría. En nuestro país, donde usamos 50 Hz, un ángulo de 360 grados equivale a un tiempo de 20 milisegundos, lo que dura un período.

Una ventaja de esta clase de regulación, en comparación con la de un sistema de todo o nada, es que se evita el desgaste de los contactos del termostato, o los del relé que comanda, si la corriente es elevada. El triac, lo mismo que los diodos controlados y los transistores, interrumpen la corriente sin hacer chispas. Y una desventaja, es que las repetidas conexiones bruscas tienen a veces efectos inductivos¹⁰ que dan lugar a la emisión de ondas de radio que interfieren otros equipos. Por esa razón, los buenos atenuadores de luz o controles de temperatura basados en triacs, tienen elementos que filtran esas interferencias; por ejemplo varistores, varicaps, capacitores o inductores.

Con un costo todavía elevado, ya hay triacs que manejan decenas de miles de volt, y varios cientos de ampere, apropiados para funciones de distribución de energía eléctrica. Se los desarrolló para reemplazar triodos de mercurio (se tiende a prohibir este metal, por su toxicidad).



- Curva característica de un triac (el dibujo no está en escala). La corriente directa es muy pequeña hasta que se alcanza una tensión elevada de disparo, y el triac conduce. Pero lo hace también con tensiones directas menores, si recibe un pulso en la compuerta.

¹⁰Recordemos que la fuerza electromotriz inducida es proporcional al cociente entre la variación de la corriente, y el tiempo en el que ocurre esa variación.

● Inductores

Los inductores¹¹ o bobinas más comunes, según su aplicación, pueden tener núcleo de aire, de hierro o de ferrita. Es posible conseguir núcleos sueltos, y armar uno mismo los inductores, si son de pocas vueltas. Su inductancia se mide en henry (H). Cuando se usa un inductor para bloquear el paso de interferencias de alta frecuencia, se los llama estranguladores; pero casi nadie habla así. En este ámbito, y en nuestro país, se usa el nombre en inglés, *choke*, aunque pronunciado como se lee en nuestra fonética. Algunos lo escriben *choque*, y no sería del todo incorrecto, si imaginamos que la radiofrecuencia choca contra ese filtro; pero no es ése el sentido original de la palabra.

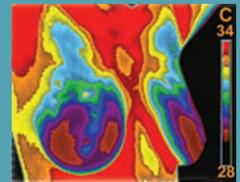


- *Chokes* de alta frecuencia. Los cuatro o cinco cables de los conectores para puertos de computadora, se enrollan unas pocas vueltas a través de las ventanas de núcleos de ferrita. La autoinducción filtra las corrientes de alta frecuencia.

● Detectores pasivos de radiación infrarroja

Los sensores infrarrojos pasivos (PIR, por sus iniciales en inglés) revolucionaron la detección del movimiento de personas, que hasta 1970 ó 1975 se hacía con complejos sistemas activos, que consistían en la emisión de una radiación (por ejemplo un haz de luz, una onda de radio o un sonido), y la detección de su rebote en el cuerpo. Los detectores pasivos, en cambio, no irradian nada, y responden a la radiación infrarroja que emite el cuerpo, de longitud de onda de menos de nueve micrones, algo menor que la de la radiación de fondo del ambiente.¹² Se los fabrica con láminas de nitrato de galio, nitrato de cesio, y fluoruros orgánicos, entre otras sustancias. Antes de su invención, las imágenes infrarrojas se debían obtener con sensores sumergidos en nitrógeno líquido, para que no detectasen su propia radiación.

El componente sensible de un sensor pasivo es generalmente un conjunto de dos cristales conectados en serie y con la polaridad opuesta, de modo que sólo detecten *diferencias* de la radiación que les llega. Están cubiertos por una lente múltiple (transparente a la radiación IR) que proyecta imágenes infrarrojas sobre las dos partes del sensor. Cuando la persona se mueve, desequilibra el balance, y aparece



- Es triste saber que parte de los motivos que impulsaron la tecnología de los sensores infrarrojos pasivos responde a aplicaciones bélicas y de vigilancia contra el delito. Pero consuela saber que, también, hay usos pacíficos, por ejemplo ayudar al diagnóstico de algunos tipos de cáncer, por las diferencias de la temperatura de la piel entre una zona y otra; apagar automáticamente una luz cuando pasa mucho tiempo sin que nadie se mueva en un ambiente, y abrir una puerta cuando alguien se acerca. En la imagen, un examen de mamas.

¹¹Muchos llaman inductancias a los inductores, y resistencias a los resistores. Es un uso admitido, pero aquí preferimos, por mayor claridad, distinguir el nombre del componente, de la magnitud que lo caracteriza.

¹²Todos los cuerpos emiten radiación electromagnética, excepto los que se encuentran a cero grado de temperatura absoluta. La longitud de onda de esa radiación depende de la temperatura a la que se encuentre el objeto, y a las características de su superficie. Por ejemplo, una brasa de carbón, a 700 °C, emite luz roja o anaranjada; el filamento de una lámpara, luz amarilla, de longitud de onda menor. Ciertas estrellas, muy calientes, emiten rayos X. Un cuerpo a veinte grados emite una radiación de unos diez micrones de longitud de onda.



- Zumbador WST-16, para soldar en circuito impreso, de 14 mm de diámetro y 16 de alto. Cuando se lo alimenta con 12 Vcc, la corriente es de 30 mA, con un nivel sonoro de 85 decibeles a un metro de distancia. Resuena a una frecuencia de 2.300 Hz. El papel adherido a la abertura lo protege de insectos y polvo durante el almacenamiento. Se basa en un disco cerámico *piezoeléctrico*, esto es, que genera electricidad cuando se lo deforma, y se deforma cuando se le aplica electricidad.



- Fotorresistor, o LDR (de *light dependant resistor*). Los dos peines metálicos entrelazados no se tocan, y entre ellos se aloja la sustancia sensible a la luz, generalmente sulfuro de cadmio. A oscuras tiene más de 100 MΩ de resistencia; a plena luz, algunos centenares de ohm.

una señal eléctrica que se amplifica. Si uno se mueve muy lentamente, el aparato no lo detecta, porque si lo hiciese, debería actuar, también, con las variaciones térmicas originadas en el movimiento relativo del Sol. En la figura anterior, el sensor PIR325.

● Módulos programables

Hay componentes que presentan un comportamiento único ante idénticas condiciones, por ejemplo, un resistor, un transistor, un capacitor o un diodo rectificador o emisor. Otros, en cambio, como un diac, o un triac, presentan un estado que, además de depender de las condiciones externas, es también una función de la historia previa del componente. Si un triac estaba conduciendo por haber recibido un pulso en su compuerta, lo seguirá haciendo; pero dejará de conducir cuando se lo desconecte por un momento. En ese sentido, es un dispositivo con *memoria*, posiblemente el más sencillo que ofrece la electrónica.

Los circuitos integrados programables (PIC) consisten en conjuntos muy grandes de semiconductores capaces de almacenar información, que en algunos casos permanece aunque se desconecte la alimentación. Tienen contactos para alimentarlos eléctricamente, y oros para el ingreso y salida de datos. Algunos detalles de su funcionamiento se verán en el capítulo 17 de introducción a las técnicas digitales. Los PIC más complejos son hoy el órgano central de las computadoras; otros más sencillos cumplen funciones menos amplias en relojes, controladores de temperatura con memoria, manejo de brazos robóticos, control de inyección de combustible en coches, sintonizadores de radio y TV, etcétera. En la figura, dos circuitos PIC 16F84, de 40 patas.



Aunque para programar uno de esos circuitos, usualmente, se emplean otros circuitos programadores, con fines de aprendizaje o experimentales es posible programarlo con sólo accionar interruptores en la secuencia correcta.

PROPUESTAS DE ESTUDIO

- 14.1. ¿Es posible reemplazar un triac por dos SCR? Justificar.
- 14.2. ¿Qué función cumple el pequeño escalón de arriba a la izquierda, en la imagen de la cápsula del optoacoplador de la página 172?
- 14.3. ¿Qué ocurre si a un sensor pasivo infrarrojo se le quita el plástico blanco

curvo que lo cubre? Si se puede hacer sin causar inconvenientes, conviene experimentarlo.

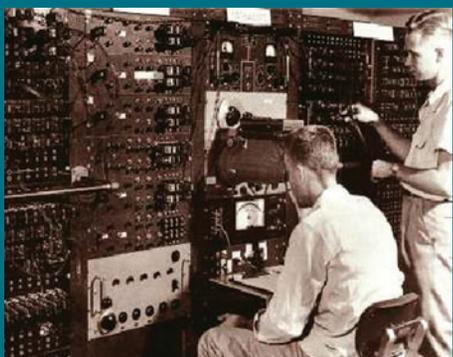
14.4. De acuerdo al código descrito en este capítulo, ¿qué colores corresponden a un resistor de $1\text{ M}\Omega$?

14.5. Una persona puso un atenuador de triac en una lámpara alimentada con 12 Vca , y le funcionó perfectamente bien. ¿Funcionará también con una batería de 12 Vcc ? Justificar.

● Otras fuentes de estudio e información

- Sugerimos buscar en la Red con las palabras componentes electrónicos, G.M. Electrónica (un comercio de Buenos Aires, con gran variedad de productos, y que publica los datos).
- Este sitio, muy conocido en el ámbito de los aficionados a la electrónica, ofrece muchos circuitos sencillos, con aplicaciones prácticas y experimentales:
<http://www.pablin.com.ar>
- Alberto Picerno, *Curso de electrónica completa*:
<http://electronicacompleta.com>.

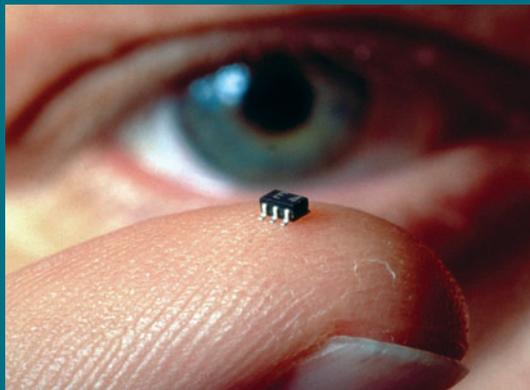
Amplificadores operacionales



- Las computadoras de 1950 eran poco útiles para el cálculo, porque eran *analógicas*, y no digitales. Para resolver un problema mecánico, se armaba un circuito eléctrico de igual comportamiento matemático, y los valores de las fuerzas, o distancias, se sabían por la medición de tensiones, o corrientes. Las operaciones analógicas las hacían unos circuitos llamados *amplificadores operacionales*. En la foto, una computadora de esa época, que manejaba las estaciones compresoras de gas de la Southern Gas Association, en Texas, USA.



- Estudio de la amortiguación de un coche con una computadora analógica Telefunken RA 741, de 1956. Tenía 23 amplificadores operacionales: 8 integradores, 11 sumadores y 4 inversores; todos de triodos de vacío.

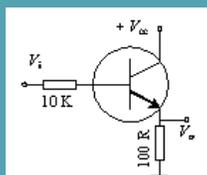


- Actualmente las computadoras son digitales: operan con números, y no con analogías eléctricas; y los amplificadores operacionales tienen otros usos. En la foto, el LMV321 de un teléfono celular.

Amplificadores operacionales



- Amplificador operacional LM741CN, de 4 a 12 V, 500 mW; entrada hasta 0,4 V; ganancia 15.000, encapsulado DIP (dual in-line package, encapsulado dual en línea), de aproximadamente un centímetro de largo.



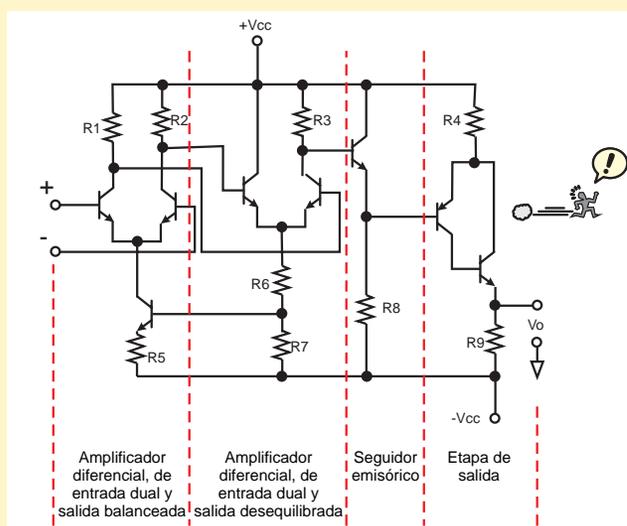
- Seguidor emisor. La tensión de entrada, V_i , es prácticamente igual a la de salida, V_o . Pero, a la salida hay más corriente disponible. Cuando entra un microampere a la base del transistor, la caída de tensión en el resistor de 10 kΩ es de 10 mV. Si el factor beta del transistor vale 100, para que la tensión de salida sufra la misma merma, se puede extraer una corriente cien veces mayor, 10 mA. Este circuito, que amplifica corriente pero no tensión, es similar al antiguo *seguidor catódico*, de triodos de vacío.

En los capítulos 11 y 13 se describieron algunos amplificadores de válvulas de vacío y de transistores, aplicados a diversos fines, por ejemplo el de convertir en sonido la señal de un micrófono, o el de encender automáticamente una lámpara cuando la luz del día deja de iluminar un fotorresistor. Esas funciones, y muchas más, se pueden hacer también con los amplificadores operacionales disponibles hoy en la industria.

Los amplificadores operacionales se inventaron para las ya obsoletas computadoras analógicas, pero su universalidad y facilidad de adaptación los hacen apropiados para cumplir muy diversas funciones, con sólo agregarles uno o dos resistores, o capacitores, según la aplicación.

Un amplificador operacional, abreviadamente AO, OA u *op-amp*, es un amplificador *diferencial*; esto es, amplifica la *diferencia*, o resta, entre dos tensiones eléctricas de entrada.

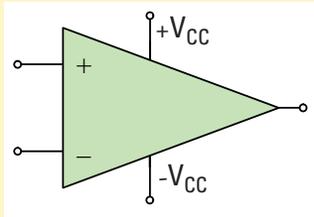
Sin ocuparnos, por ahora, de los detalles – que varían con los fabricantes y modelos – podemos ver en la figura, la composición interna de un amplificador operacional. Nótese que los símbolos de los transistores carecen de círculo, porque comparten el encapsulado.



Entre los puntos $+V_{CC}$ y $-V_{CC}$ se aplican, por ejemplo, $+12\text{ V}$ y -12 V con respecto a tierra. A la izquierda, $+$ y $-$ son los contactos de entrada. A la derecha, V_0 es la tensión de salida con respecto a tierra.

El circuito incluye un amplificador de entrada, uno adicional inmediato, un amplificador seguidor emisor, que permite obtener más corriente, y un cuarto amplificador a la salida. Esa división en etapas permite un mejor control, que el que se obtendría con sólo dos transistores.

● Símbolo del amplificador operacional



Es cómodo representar un amplificador operacional con un triángulo y cinco contactos. Dos de ellos son para la alimentación simétrica de tensión continua, por ejemplo $+12\text{ V}$ y -12 V con respecto a un punto de referencia del circuito, aunque no esté a tierra. Los dos contactos de la izquierda son los de entrada; y el de la derecha, el de salida.

En vez de $-V_{CC}$ y $+V_{CC}$ se suele indicar, con más generalidad y sin el signo, V_{CC} y V_{EE} , que se interpretan como la tensión en los colectores y la tensión en los emisores, que son positiva y negativa, respectivamente, cuando los transistores del amplificador operacional tienen polaridad N, la más común.

Las entradas $+$ y $-$ se llaman, respectivamente, *entrada no inversora*, y *entrada inversora*. Los signos $+$ y $-$ son los nombres de las entradas, y no la polaridad verdadera de las tensiones que se les apliquen.

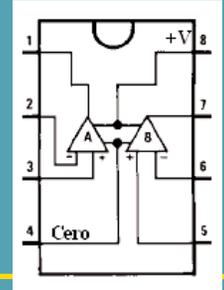
● Funcionamiento ideal

Las entradas tienen una resistencia muy elevada, idealmente infinita y, cuando se les aplica una tensión, no circula corriente, o ésta es insignificante.

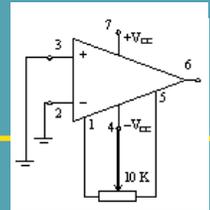
Cuando la entrada $+$ está a un potencial eléctrico mayor que el de la entrada $-$, esto es, cuando $+$ es positiva con respecto a $-$, el potencial de salida es de $+12\text{ V}$, o el valor positivo de la alimentación, si fuera diferente de 12 V .

Cuando la entrada $+$ se encuentra a un potencial eléctrico menor que el de la entrada $-$, esto es, cuando $+$ es negativa con respecto a $-$, el potencial de salida es de -12 V , o el valor negativo de la alimentación, si fuera diferente de 12 V .

Para que la salida sea siempre extrema positiva, o extrema negativa, no importa –idealmente– cuán pequeña sea la diferencia entre los potenciales de entrada. Pero



- Hay amplificadores operacionales que se alimentan con una sola tensión, y no con dos simétricas. En la figura, el componente LM358N, con dos op-amps en la misma cápsula. Tiene la ventaja de que se puede usar una sola batería como fuente, conectada entre $+V$ y cero. Pero, naturalmente, la tensión de salida está siempre comprendida entre cero y $+V$.



- Ajuste de cero de un amplificador operacional. Con las dos entradas a tierra, se ajusta el resistor variable, o potenciómetro, hasta que la tensión de salida sea nula. Después se eliminan las conexiones a tierra, y se usan normalmente las entradas.

en la práctica, la sensibilidad del circuito es limitada y, por eso, no responde a diferencias de potencial muy pequeñas.

Los amplificadores operacionales más comunes detectan diferencias de potencial de algunas millonésimas de volt.

Ya se ha dicho qué sucede cuando entre los contactos de entrada hay una tensión positiva o negativa. ¿Y si la diferencia de potencial entre + y - fuera nula? ¿Qué ocurre, en ese caso, con la salida? Lo que sucede en tal caso es que la tensión de salida mantiene el valor que tenía (intermedio entre extremos) cuando se dio la condición de igualdad de los potenciales de entrada.

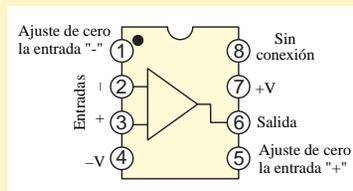
Tal como se ha descrito el funcionamiento ideal de un op-amp, su ganancia es infinita, puesto que alcanza con una diferencia arbitrariamente pequeña entre los potenciales de entrada, para que la tensión de salida salte de $-V_{CC}$ a $+V_{CC}$, o al revés. Pero en la práctica la ganancia no supera en mucho un factor de cien mil.¹

Además de los cinco electrodos principales (alimentación positiva, alimentación negativa, entrada no inversora, entrada inversora y salida), muchos op-amp tienen dos contactos adicionales para el ajuste de cero, más conocido por su nombre en inglés, *null offset*.² Ese ajuste compensa pequeñas asimetrías del circuito, que hacen que haya una pequeña tensión de salida en los casos en que, en teoría, esa tensión debería ser nula.

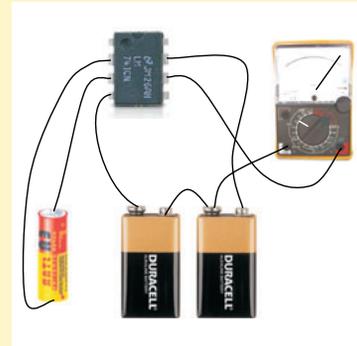
• El ejemplo más sencillo: un comparador



- Antiguo amplificador operacional de válvulas de vacío, el K2-W, de 1953. El primer aparato de ese tipo se patentó 1941 como amplificador sumador. Tenía una ganancia de 95 decibeles (un factor de tres mil millones), medía unos diez centímetros de altura, y funcionaba con 360 V en placas.



- Circuito elemental de prueba (los tamaños no están en escala).



Para probar la función más elemental de un op-amp, se puede usar un LM741CN, dos baterías de 9 V para alimentarlo, una pila de 1,5 V para probar

¹ En el caso de los amplificadores (o de sus contrarios, los atenuadores), en vez de hablar del factor de amplificación (o de atenuación), se prefiere, por simplicidad, usar su logaritmo decimal. El logaritmo decimal de 100.000 vale 5, entonces la ganancia del amplificador es de 5 bel, o lo que es lo mismo, de 50 decibeles. (5 B = 50 dB)

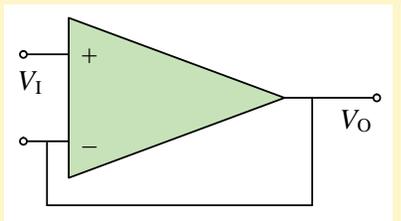
² Literalmente, corrimiento de cero.

la entrada, y un voltímetro. Cuando se conecta la pila con la polaridad indicada, el voltímetro marca +9 V. Si se invierte la conexión de la pila, la tensión que indica el voltímetro pasa a ser de -9 V. Si se quita la pila y se dejan sueltos los cables conectados a las patas 2 y 3 del amplificador, se verá cómo la aguja del instrumento tiembla. Eso sucede porque los cables sueltos captan la tensión alterna del ambiente. En los semiciclos negativos, el operacional se vuelca a +9 V de salida, y a -9V en los semiciclos positivos.

La indicación del voltímetro, con esa conexión, será siempre o bien +9 V, o bien -9 V, según que la pata 3 sea positiva o negativa con respecto a la pata 2.

Es difícil lograr que el voltímetro indique tensiones intermedias, o cero. Es suficiente con que haya veinte o treinta microvolt de diferencia de potencial entre los contactos de entrada, para que se obtenga una salida diferente de cero.

● Seguidor



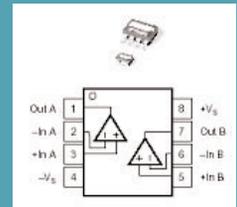
● En el circuito *seguidor*, la tensión de salida, V_O es, prácticamente, igual a la de entrada, V_I . No hay amplificación de tensión, pero sí la hay de corriente (los subíndices I y O para la entrada y la salida provienen del inglés, in y out).

Para comprender cómo funciona³ el circuito seguidor, imaginemos que la tensión de salida, V_O , crece por alguna razón, por encima de V_I . Eso significa que la entrada inversora (-) es positiva con respecto a la entrada no inversora (+). En consecuencia, y de acuerdo con el funcionamiento básico del amplificador operacional, la tensión de salida tiene que adoptar el valor $-V_{CC}$, con lo cual deja de estar, obviamente, por encima de la tensión de entrada, como acabamos de suponer.

A la inversa, imaginemos que la tensión de salida cae por debajo de la de entrada. Eso significa que la entrada inversora (-) es negativa con respecto a la otra entrada (+). En consecuencia, la tensión de salida tiene que adoptar el valor +V, con lo cual deja de estar por debajo de la tensión de entrada, como dijimos.

La única forma de que los hechos no manifiesten ninguna de las dos contradicciones extremas mencionadas, es que la tensión de salida sea igual a la de entrada. En la práctica, hay una pequeña diferencia de veinte o treinta microvolt.

³ En este desarrollo, para mayor claridad, y salvo que vengan muy al caso, omitimos representar la alimentación, el ajuste de cero, y la conexión de tierra.



- Los amplificadores operacionales de realimentación de corriente (CFB, *current feedback*) son similares a los ordinarios de realimentación de tensión, pero su resistencia de entrada es idealmente nula, en vez de ser idealmente infinita. Tienen ventajas en el rechazo del ruido en aplicaciones de alta frecuencia. En la imagen, el dual OPA2683, de hasta 110 mA de corriente de entrada.



● **HENRY LE CHÂTELIER Y HEINRICH LENZ.**

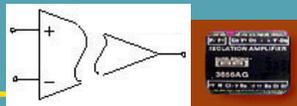
El principio de Le Châtelier, que establece que en una reacción química las concentraciones cambian de modo que se reduzca la velocidad de la reacción; y la ley de Lenz, que dice que la fuerza electromotriz inducida se opone a la variación de la corriente que la produce, son dos ejemplos de realimentación negativa.

● **Realimentación positiva y negativa**

Hay fenómenos en los que los efectos refuerzan las causas. Por ejemplo, alguien aprende un idioma, con eso puede empezar a leer libros de estudio escritos en la nueva lengua, con lo que aprende más; puede leer entonces obras más avanzadas, y así cada vez, y sin límite. Es un caso de *realimentación positiva*, donde la dificultad mayor es la de arranque.

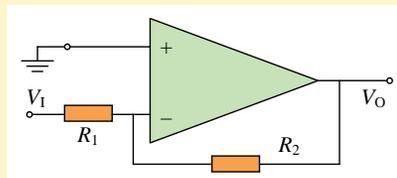
En otros procesos los efectos se oponen a las causas. Por ejemplo, alguien aprieta el acelerador del coche; aumenta la velocidad del vehículo, y la persona queda algo atrasada con respecto al coche; entonces pisa menos fuertemente el acelerador y, por eso, la velocidad no aumenta tanto como si manejara el coche por control remoto, desde un lugar fijo. Es un caso de *realimentación negativa*.

En las aplicaciones útiles de los amplificadores operacionales se usa la realimentación negativa, porque la positiva forzaría el componente hacia una salida plena, positiva o negativa. Nótese, en la figura anterior y en las que siguen, que la salida se conecta siempre a la entrada inversora, sea en forma directa como en el seguidor, o bien indirectamente, a través de resistores, u otros elementos.



● **Amplificador inversor**

En esta conexión, la salida está invertida con respecto a la entrada, y amplificada en un factor igual al cociente entre las resistencias de entrada y de realimentación, R_1 y R_2 , respectivamente.



$$V_o = -\frac{R_2}{R_1} V_i \quad (1)$$

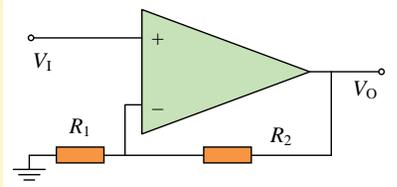
Para comprender el funcionamiento, es útil recordar que para que el op-amp entregue una tensión que no sea extrema, la diferencia de potencial entre sus entradas tiene que ser nula. Si tomamos el potencial de tierra como cero de referencia, las entradas + y - están, entonces, a potencial nulo. La tensión sobre R_2 vale V_o y la tensión sobre R_1 vale V_i . Como la entrada no toma corriente, la intensidad que circula por R_2 hacia la izquierda, tiene que valer lo mismo que la que pasa por R_1 hacia el mismo lado.

La corriente se calcula como el cociente entre la tensión y la resistencia. En-

● El símbolo representa un amplificador operacional de *aislamiento*. Se caracteriza por tener potenciales de referencia independientes en las entradas y la salida. Eso es útil para independizar las fuentes de alimentación eléctrica de los circuitos, por ejemplo en los monitores cardíacos de los pacientes. Un ejemplo de ese tipo de op-amp es el 3.656AG, que aísla hasta 8.000 V entre la entrada y la salida. El acoplamiento entre la entrada y la salida es inductivo, a través de transformadores. Mide 25×25×7 mm.

tonces, $(V_o - 0) / R_2$ vale lo mismo que $(0 - V_1) / R_1$, de lo que se deduce la fórmula (1).

● Amplificador sin inversión



$$V_o = \frac{R_2 + R_1}{R_1} V_i \quad (2)$$

Con igual razonamiento, partimos del hecho de que las dos entradas están al mismo potencial y que, ninguna de las dos, toma corriente. Entonces, los resistores están en serie; la corriente que circula por ambos es la misma, y su valor es $I = V_o / (R_1 + R_2)$.

La tensión se calcula como el producto de la corriente por la resistencia; entonces, la tensión sobre R_1 vale $I \cdot R_1$, o bien $V_o \cdot R_1 / (R_1 + R_2)$. Y como esta tensión tiene que ser igual a la de la otra entrada, V_1 , se deduce la fórmula (2) que figura a la derecha del circuito.

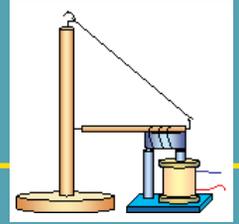
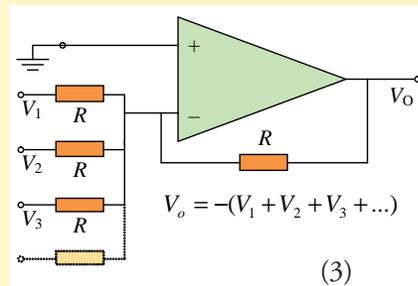
Ahora no hay inversión de polaridad, porque la señal de entrada se aplica a la entrada +, que no es inversora. El punto de unión entre los dos resistores se encuentra a un potencial intermedio entre el de salida, y el potencial cero de tierra.

Siguen más ejemplos de uso de amplificadores operacionales.

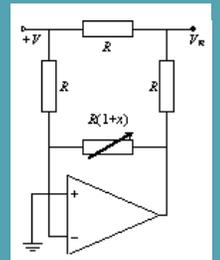
● Sumador con inversión

La tensión de salida es igual a la suma de las de entrada, pero con una inversión de la polaridad.

Un razonamiento posible para comprender el circuito, es considerar que los potenciales en + y en - son nulos, y las entradas no toman corriente. Entonces, la corriente que circula hacia la izquierda por el resistor de realimentación negativa ($I = V_o / R$) vale lo mismo que la suma de las corrientes que circulan por los otros resistores R hacia el mismo lado. Y cada una de esas corrientes valen $(0 - V_1) / R$, $(0 - V_2) / R$; $(0 - V_3) / R$, etcétera; de lo que se deduce la fórmula (3) que está junto al circuito.

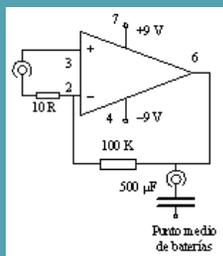


- La gran multiplicación que brinda un amplificador operacional tiene aplicaciones tan variadas, que algunas se descubrieron por azar. Si se le conecta a la entrada una bobina en cuya cercanía se desplace un imán suspendido, el dispositivo detecta vibraciones y movimientos, entre ellos los sísmicos.



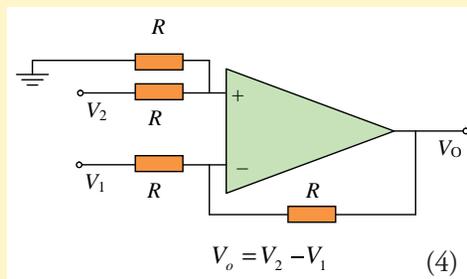
- Uso de un op-amp para obtener una tensión directamente proporcional a la variación de una resistencia que forma parte de un circuito puente (por ejemplo, un fotorresistor). La tensión de salida, V_s , vale $-V_x/2$.

● Restador



- Sencillo amplificador de sonido, o de cualquier otra señal. Usa un op-amp LM741CN, dos baterías de 9 V, dos resistores y un capacitor que impide el paso de la corriente continua. Funciona con dos audífonos, uno de los cuales hace de micrófono. Se ha usado para detectar, con cables sumergidos, señales emitidas por peces eléctricos (carece de ajuste de volumen, que se le puede hacer con un resistor de 100 kΩ variable).

La tensión de salida del circuito, V_0 , es igual a la diferencia entre las tensiones de entrada, $V_2 - V_1$. Para comprender el porqué sucede eso, consideremos que las entradas no toman corriente, entonces, los dos resistores de arriba están en serie, y el potencial de la entrada + es la mitad⁴ de V_2 . Ese potencial tiene que ser igual al de la otra entrada (de otro modo, el operacional se volcaría a una tensión extrema). Entonces, el potencial de la entrada inversora vale, también, $V_2 / 2$. Pero además, y si miramos la serie de abajo, ese potencial vale $(V_0 - V_1) \cdot R / 2R + V_1$; esto es, la diferencia de potencial entre los extremos de la serie inferior, dividida por la resistencia de esa serie (hasta ahí tenemos la corriente que circula por ella), multiplicada por la resistencia del resistor de abajo a la izquierda (hasta ahí hemos obtenido la tensión en ese resistor), más la tensión V_1 . De la igualdad $V_2 / 2 = (V_0 - V_1) \cdot R / 2R + V_1$, se deduce la fórmula (4) de la resta que acompaña ese circuito.



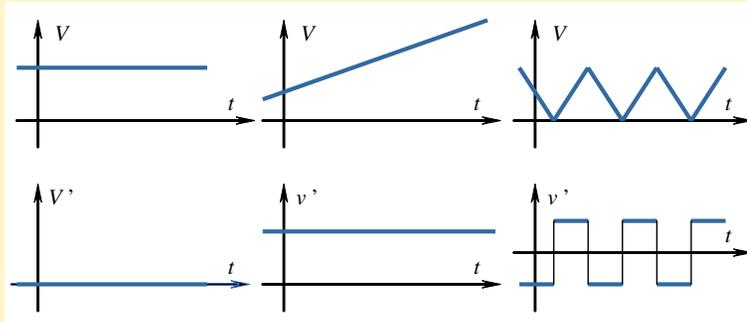
Si en los últimos ejemplos de sumador y restador, las resistencias fueran diferentes, en vez de ser iguales como se supuso por simplicidad, las fórmulas cambiarían; y eso es útil en algunas aplicaciones en las que se desea que en la suma, o en la resta, las cantidades que intervienen tengan influencias o pesos diferentes.

● Derivador, o diferenciador

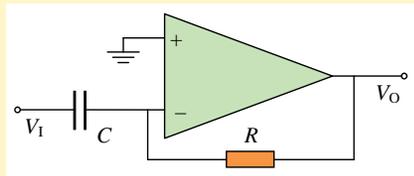
La derivada de una función matemática es otra función que indica cómo varía la primitiva. Si la primitiva es constante, la derivada vale cero; si en cambio crece, la derivada es positiva; y si la función primitiva decrece, la función derivada es, entonces, negativa. La figura que sigue muestra, arriba, tres funciones $y(t)$ y abajo, sus respectivas tres derivadas⁵, $y'(t)$.

⁴ Eso se deduce así: la corriente que circula por la serie, vale $V_2 / (R + R)$. Entonces, la tensión sobre cualquiera de esos dos resistores vale $I \cdot R = V_2 \cdot R / (R + R)$, o $V_2 / 2$.

⁵ Por ejemplo, esas tres funciones podrían ser tensiones representadas en función del tiempo. En el tercer ejemplo, el de los gráficos de la derecha (pág. 185), se supone que los vértices de arriba están algo redondeados, para que la derivada cambie de valor en tiempos muy breves, pero no instantáneos, lo que se representa con segmentos casi verticales.



Para obtener la derivada de una tensión variable en el tiempo, se puede usar el siguiente circuito.



$$V_0 = -RC \frac{dV_1}{dt}$$

Una manera de comprender cómo funciona es observar que la entrada + está a tierra, entonces el potencial de la entrada - tiene que ser nulo también. Después imaginamos que la tensión V_1 permanece constante durante mucho tiempo; eso hace que la corriente en el capacitor valga cero, ya que ese componente completó su carga, o su descarga. Entonces, la corriente en el resistor vale cero, y el potencial de salida, V_0 , es igual al de la entrada +; cero. Y justamente, la derivada de una constante es cero. La expresión $\frac{dV_1}{dt}$ se lee: *derivada de la tensión de entrada con respecto al tiempo*.

A continuación, pensemos que V_1 aumenta progresivamente. Eso hace circular una corriente de carga hacia la derecha, lo que sólo es posible si V_0 se hace negativa, ya que la tensión en + es nula. La tensión en el resistor es igual al producto de la resistencia por la corriente. Esa corriente de carga es proporcional a la capacitancia y a la tasa temporal de aumento de la tensión de entrada, que no es otra cosa que la derivada de la función.

Para derivar una función, el empleo de un amplificador operacional tiene límites prácticos. Si el capacitor es de gran capacitancia, si la resistencia de realimentación es también elevada, y surge una variación muy rápida de la tensión de entrada, entonces el op-amp se volcará a una tensión extrema,⁶ y no distinguirá ese caso de otro en el que la derivada sea aún mayor.

⁶ Se dice, cuando ocurre eso, que el amplificador operacional se satura.



- El circuito derivador se puede usar en los detectores pasivos de infrarrojo, para que actúen cuando la radiación que reciben varía con el tiempo, y no meramente cuando hay radiación, porque ésta existe siempre, emitida por las paredes y el suelo tibio. Si alguien se mueve muy lentamente delante de uno de esos detectores, el aparato no actúa.

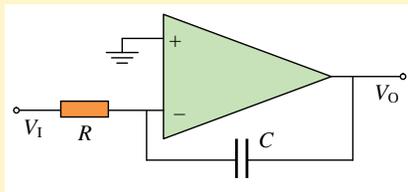
● Integrador

Integrar una función es la operación contraria a la de obtener su derivada. La integral de una función matemática $y(t)$, es otra función, $z(t)$, tal que la derivada de esta nueva función $z(t)$, es la función anterior, $y(t)$. En símbolos:

$$z(t) = \frac{dy(t)}{dt} \qquad y(t) = \int z(t)dt$$

Se lee: z es la derivada de y con respecto al tiempo, e y es la integral de z con respecto al tiempo.

Para integrar una función con un amplificador operacional, sirve el siguiente circuito:



$$V_o = V_{INICIAL} - \frac{1}{RC} \int V_i dt$$

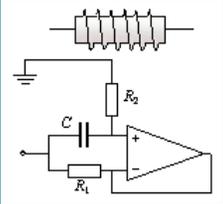
Si la tensión V_i , permanece nula, al cabo de bastante tiempo la corriente de carga (o de descarga) del capacitor será insignificante, y las dos entradas quedarán al mismo potencial nulo de tierra. La tensión de salida, en ese caso, será cualquier valor constante; por ejemplo, el que llegó a existir cuando se dio esa condición, y el mismo valor de tensión habrá ente los extremos del capacitor cargado.

Supongamos que esa tensión de salida es positiva, y de 10 V; que el resistor es de 1.000 Ω , y el capacitor, de 1.000 μF , o lo que es lo mismo, 1 μF . Puesto que la entrada $-$ tiene potencial nulo, el capacitor queda cargado con una tensión de 10 V, con el positivo a la derecha.

Si, a partir de un cierto instante, la tensión V_i se aparta de cero, y permanece constante y positiva, por ejemplo 1 V, habrá una corriente de carga del capacitor, de valor inicial igual a 1 V / 1.000 Ω , ó 1 mA. Esa corriente hace cambiar la carga del capacitor.⁷ Al cabo de un segundo, la carga transferida será de una milésima de coulomb, y la tensión del capacitor disminuirá en 1 mC / 1 mF = 1 V. El capacitor presenta, ahora, una tensión de sólo 9 V, cuando hace un segundo tenía 10 V.

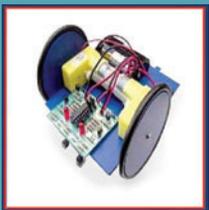
Como el potencial de la entrada del op-amp sigue nula, eso significa que la salida V_o tiene que haber cambiado de 10 V a 9 V.

⁷ Recordemos la definición dada en el capítulo 1: 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. Y tengamos presente, también, que la carga eléctrica es igual al producto de tensión por la capacitancia.



- El circuito de la figura simula un inductor, a pesar de que sólo tiene un capacitor y dos resistores (además del amplificador operacional). Desde la entrada, se comporta como una inductancia $L = R_1 R_2 C$ en serie con una resistencia R_1 .

Una característica de los inductores es que si se les aplica tensión, la corriente comienza a crecer desde cero, y se estabiliza en el valor $I = U/R$. Este circuito ocupa mucho menos lugar que un inductor real, de bobina.



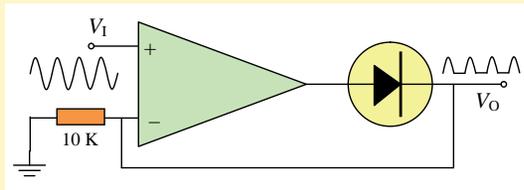
- Robot didáctico impulsado por un motor a pilas, que sigue una línea trazada en el suelo. Está hecho con un circuito integrado de varios amplificadores operacionales.

Si, transcurrido ese segundo, la tensión de entrada V_I volviera a valer cero, la tensión de salida se quedaría fija en 9 V. Si V_I volviera a valer 1 V, V_O volvería a decrecer, al ritmo de un volt por segundo. Y si la tensión de entrada adoptase otros valores, la de salida decrecería, o crecería, según la polaridad de la tensión de entrada, a un ritmo dependiente del valor de la tensión de entrada.

El límite práctico de este circuito integrador es la tensión de alimentación. Cuando el capacitor la alcanza, ya no puede seguir acumulando más carga, y el circuito deja de integrar.

● Rectificador de muy baja tensión

En el capítulo 12, página 141, se comentó que los diodos semiconductores comienzan a conducir sólo después de que se supera una tensión umbral de directa del orden de un volt; es imposible, entonces, sólo con esa clase de diodos, rectificar tensiones alternas menores, pero los amplificadores operacionales brindan una solución.

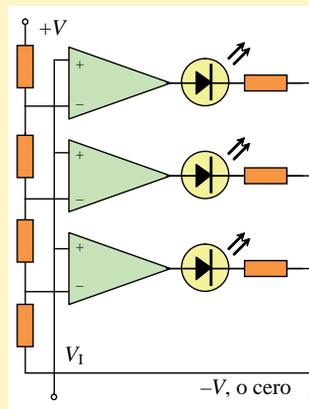


● Cuando la tensión de entrada es positiva, aunque sea pequeña, la salida crece hasta superar la tensión directa del diodo y, recién entonces, hay realimentación.

● Indicador de barras

Para indicar diferentes niveles de tensión, temperatura, sonido, u otra variable, sin usar instrumentos costosos, son muy comunes los indicadores de barras. Se puede armar uno con el circuito de la figura; y si se usa el amplificador operacional LM324N, se aprovecha que tiene cuatro op-amp en la misma cápsula de 14 patas, para ocupar muy poco sitio.

La cadena de resistores polariza cada entrada inversora con una tensión diferente. A medida que aumenta la tensión de entrada V_I , y cada entrada directa supera el potencial de la entrada inversora, la salida de cada op-amp se vuelca al extremo positivo, y se enciende el led correspondiente. Si se desea la función inversa, se polarizan las entradas al revés.



- Antes de armar el indicador de barras descrito, conviene saber que hay integrados como el KA284, para 15 miliampere, y el KA285, para 7 mA, que ya vienen preparados para la función de indicar un nivel de sonido en una escala logarítmica, en decibelios.

Sirven para encender hasta cinco leds; se alimentan con una tensión de 3 a 16 V, y miden 23 × 6 × 6 mm.

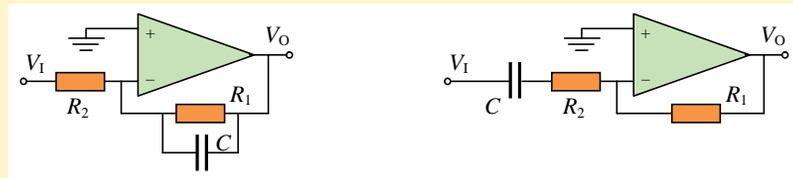


- Indicador de nivel de sonido, con cuatro barras de leds para tonos bajos, medios, altos y muy altos. Se lo conoce como *vúmetro* (de VU, unidad de volumen, en inglés). En algunos modelos baratos, los led encienden de a pares; o cada led asoma por dos ventanas, para que parezca que hay el doble de niveles.

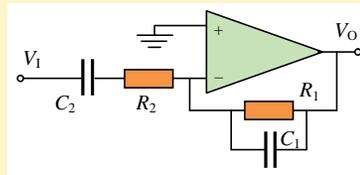
● Filtros

A veces hay que permitir el paso de la corriente de cierta frecuencia, e impedirlo si es de otra; por ejemplo para separar las señales cuando por una misma línea se envían la voz del teléfono, de una frecuencia entre 50 y 50.000 Hz, y el servicio de Internet de banda ancha, de más de 100.000 Hz.

Hay *filtros pasivos* que cumplen esa función, formados por resistores, capacitores e inductores. Los op-amp permiten construir *filtros activos*, llamados así porque necesitan de una fuente externa de energía; pero tienen la ventaja de que se puede hacer un mejor control. Según la frecuencia que dejan pasar, los filtros se llaman pasaaltos, pasabajos, pasabanda, etcétera.



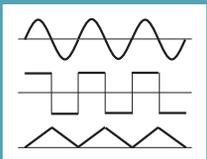
● Izquierda, filtro pasabajos; derecha, pasaaltos. La frecuencia límite, en hertz, vale, en el primer caso, $1/(2\pi R_1 C)$; y en el segundo, $1/(2\pi R_2 C)$, con las resistencias expresadas en ohm, y las capacitancias en farad (F).



● Filtro pasabanda, de frecuencias límites $1/(2\pi R_1 C_1)$; y en el segundo, $1/(2\pi R_2 C_2)$.

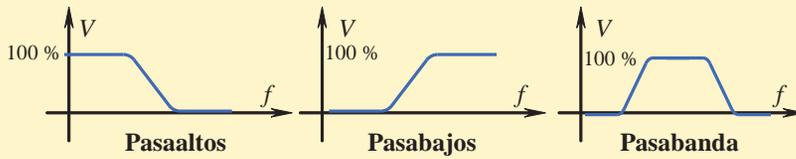
La diferencia entre las dos frecuencias límite es el ancho de banda. El cociente entre la frecuencia central y el ancho de banda se conoce como el factor Q, o factor de calidad del circuito. Cuanto más estrecha es la banda, mayor es el factor de calidad.⁸

Las frecuencias de límite no son nítidas ni estrictas; el filtro comienza a filtrar desde antes de alcanzarse el límite, y deja pasar algo de señal una vez transpuesto, como lo indican las siguientes figuras.



- Una de las muchas maneras de obtener una tensión variable en forma de onda dentada, a partir de una sinusoidal, es aplicar ésta a un comparador, y la salida del comparador, a un integrador.

⁸ El factor Q de calidad se refiere a la cuán selectivo es un circuito para responder a una única frecuencia, o una banda estrecha alrededor de la frecuencia central. Es una calidad de sintonía. En cambio, cuando se habla de banda ancha para la conexión a Internet, lo deseable es que pasen simultáneamente frecuencias diversas, correspondientes a varios canales de comunicación simultáneos de los diferentes usuarios. En este otro contexto, la buena calidad del servicio consiste en que la banda de frecuencias de comunicación sea amplia, y no estrecha.



PROPUESTAS DE ESTUDIO

15.1. (Advertencia- Esta pregunta presenta una dificultad para que la resuelvan los estudiantes, o para que disfruten si la descubren y no caen en ella.)

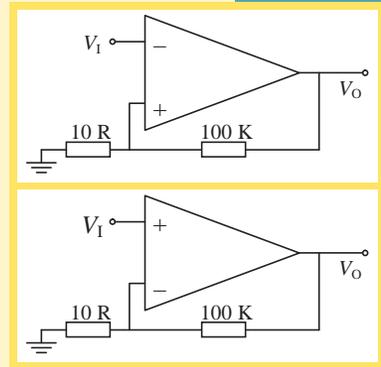
Se sabe como dato que en el op-amp de la figura, alimentado con +12 V y -12 V, la tensión de entrada vale $V_1 = -0,001$ V. ¿Cuánto vale la tensión de salida V_0 ?

15.2. Con los mismos datos, ¿cuánto vale ahora la tensión de salida V_2 ?

15.3. ¿Y si V_1 valiera 0,003 V?

15.4. ¿Cómo harían un sumador de tensiones sin inversión de la polaridad? Justificar

15.5. ¿Cómo se debería conectar un op-amp para hacer un circuito integrador que no invierta su salida, como ocurre con el descrito en este capítulo? Justificar

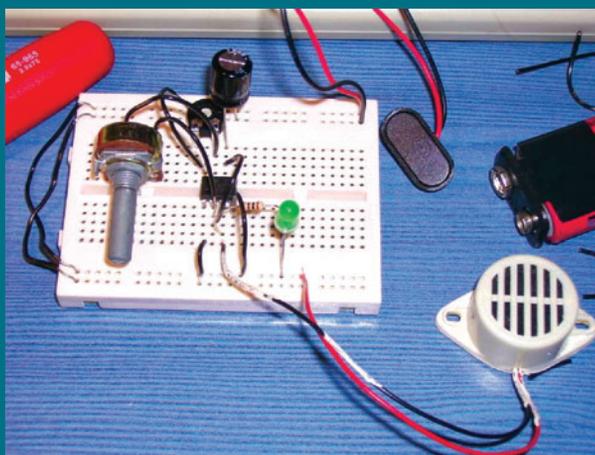


• Toda función analógica que realice un amplificador operacional, la puede hacer también un procesador numérico, y esto es lo que conviene cuando la operación es compleja, por ejemplo en el Segway, bicicleta paralelo impulsado con baterías, que responde a órdenes de manejo dadas por los movimientos instintivos del cuerpo humano en equilibrio. El aparato, inventado en 2001, aún es muy caro, en comparación con el servicio que brinda.

• Otras fuentes de estudio e información

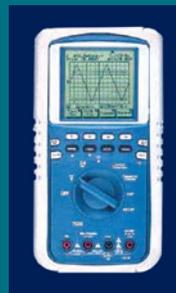
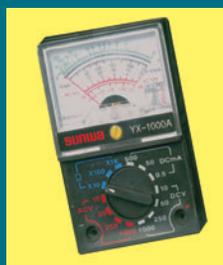
- Sugerimos buscar en la Red con las palabras amplificadores operacionales, op-amp, filtros activos, y generador de funciones.
- En estos sitios hay, respectivamente, un excelente capítulo sobre amplificadores operacionales, que forma parte de un curso de Tony R. Kuphaldt. (Está en inglés.), un buen curso en castellano, y datos de un sismógrafo de aficionado:
http://www.eng.cam.ac.uk/DesignOffice/mdp/electric_web/Semi/SEMI_8.html
http://www.ifent.org/temas/amplificadores_operacionales.asp
<http://pages.prodigy.net/fxc/>
- Jung, Walter G. *Amplificadores operacionales integrados; circuitos prácticos*, Paraninfo, Madrid, 1991. Este libro está en la Biblioteca de la Universidad Tecnológica Nacional, Medrano 951, Buenos Aires.
- http://gwenaelm.free.fr/Physique/Cadrel/index_capes_mpp.html

Herramientas de experimentación



- Hacer las cosas y probar si funcionan –casi nunca exactamente del modo esperado– es el método normal de trabajo, no sólo en electrónica, sino en cualquier otra tecnología compleja. El circuito de la foto, destinado a una alarma casera de tsunamis, incluye una batería, un convertidor de tensión, un amplificador operacional, un potenciómetro de ajuste de sensibilidad, un led, un zumbador, y menudencias. Amplifica la señal que genera la oscilación de un imán que cuelga dentro de una bobina. Está montado en un *protoboard*, o tablero de conexiones experimentales, en el que los componentes se enchufan en vez de soldarse, lo que facilita los cambios, hasta quedar conformes con el prototipo.

- El multímetro, o téster, es la herramienta electrónica más usada en el diseño y la reparación. En la figura, uno analógico, que venden a quince pesos en algunos kioscos, y otro más avanzado, de trescientos pesos, digital y con pantalla gráfica, especializado en el diagnóstico de fallas de encendido e inyección electrónica de combustible de los coches.



- Abajo, soldador de estaño de 50 W, un soporte de espiral para proteger la mesa de las quemaduras, aleación de estaño y plomo de bajo punto de fusión, y una jeringa que se dispara con un resorte para absorber el metal fundido. Se usa, principalmente, en reparaciones, porque para el armado de los circuitos,



la soldadura se suele hacer con una ola que se genera en una cubeta de estaño fundido, sobre la que se coloca la placa del circuito impreso con las patas de los componentes ya puestas en los agujeros. Sin embargo, los prototipos, o circuitos especiales de bajo volumen de producción, se suelen armar con esta útil herramienta. Al lado, un soldador de nitrógeno caliente (mejor que el aire, porque no oxida) para soldar componentes muy pequeños, llamados de montaje de superficie.

Herramientas de experimentación

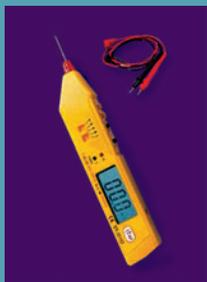
• El multímetro

Seguramente, en todo hogar hay un martillo, una pinza y un destornillador, herramientas útiles para reparaciones e instalaciones diversas. Es menos frecuente que haya un multímetro, o téster, salvo que viva allí algún aficionado, o aficionada a la electrónica. Más que la supuesta especialización o complejidad de esa herramienta, influye en eso, simplemente, la tradición. Hay, o hubo, cinco generaciones que vieron aparatos eléctricos, tres o cuatro que los usan; dos generaciones que dependen fuertemente de la electricidad, y sólo una que puede adquirir instrumentos de medición y control a un precio popular. Un multímetro digno vale hoy lo mismo que un martillo,¹ y sirve para medir tensiones alternas y continuas, corrientes continuas, y resistencias. Un instrumento de costo diez veces mayor, mide también corrientes alternas, capacitancias, inductancias, temperaturas y continuidad;² y prueba, además, transistores.

Los multímetros se clasifican en analógicos y digitales. La parte principal de los primeros es un instrumento de aguja, de corriente continua, que en muchos casos indica el fondo de escala cuando circula una corriente de $50 \mu\text{A}$ (cincuenta millonésimas de ampere) o cuando se le aplica una tensión continua de $2,5 \text{ V}$. De esto deducimos que la resistencia interna de ese instrumento de aguja es de $(2,5 \text{ V}) / (50 \mu\text{A}) = 50 \text{ k}\Omega$.

Para resumir esos datos, se suele decir que el instrumento tiene una resistencia de veinte mil ohm por volt.

Algunos multímetros tienen instrumentos de características diferentes a las dichas; por ejemplo indican cien microampere a fondo de escala, o tienen otra resistencia interna. Los digitales suelen amplificar las señales con energía auxiliar



- Multímetro digital de bolsillo de 500 V , $20 \text{ M}\Omega$, con retención de lectura, de veinte centímetros de largo, tres de ancho y uno de grosor.



- Multímetro analógico y digital de 600 V y $20 \text{ M}\Omega$, con 7 funciones y 28 rangos.

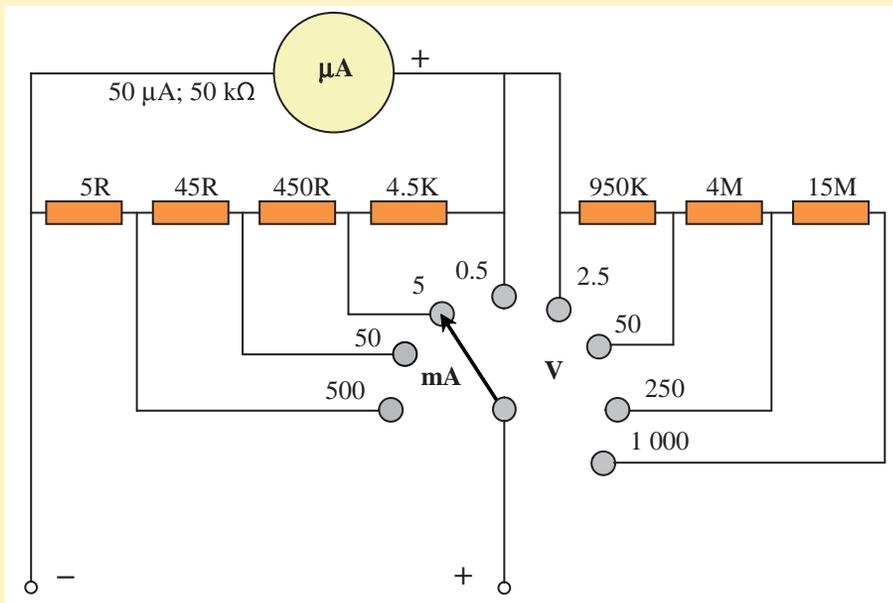
¹ Se supone que el manejo de un martillo es instintivo y congénito, como lo notamos en los movimientos que hace un bebé con los objetos que alcanza; aunque, naturalmente, durante la vida se aprendan destrezas, como la de tomarlo por el extremo del mango para no sufrir vibraciones, golpear con más precisión y disminuir los riesgos de daño personal. En cambio, el manejo de un multímetro muy poco tiene que ver con los instintos, y requiere aprendizaje; eso explica su menor popularidad.

² Según los diferentes ámbitos técnicos, se dice que entre dos puntos hay *continuidad*, si no están aislados entre sí; o si la resistencia entre ellos es baja. Muchos multímetros tienen incorporado un zumbador, que emite un pitido cuando se unen entre sí las puntas de prueba del aparato, o cuando se intercala entre ellas algo que tenga una resistencia de menos de 100 ó 200Ω .

proveniente de pilas, y en su operación como voltímetros tienen, generalmente, una resistencia mayor que la de los instrumentos analógicos.

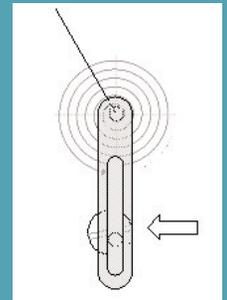
En el capítulo 13, y para mostrar cómo se aplica la polaridad correcta en la prueba de un transistor, anticipamos una descripción simplificada de la conexión interna de un multímetro, con una llave de dos posiciones para medir tensión y resistencia. La mayoría de los multímetros tienen, en cambio, una llave selectora de funciones de catorce posiciones, o más, cada una de las cuales corresponde a una función y un rango de medición diferente, por ejemplo: tensiones continuas y alternas de cero a 10, 50, 250 y 100 V; y resistencias en tres escalas diferentes, en las que las lecturas se multiplican por los factores 10, 100 y 1.000.

La figura muestra parte de la conexión interna típica de un multímetro.



● Conexiones internas de un multímetro para la medición de corrientes y tensiones continuas (la simbología internacional omite los espacios entre caracteres, y usa el punto decimal en vez de nuestra coma: 0.5 por 0,5 y 2.5 por 2,5). La R significa ohm; K, miles; y M, millones.) Con la llave en la escala de 1.000 V, la resistencia del multímetro es de $20 \text{ M}\Omega$; en la de 250 V, de $5 \text{ M}\Omega$; en la de 50 V, de $1 \text{ M}\Omega$; y en la escala directa (la de 2,5 V) la resistencia es de $50 \text{ k}\Omega$. En todos los casos es de $20.000 \Omega/V$; de ahí la utilidad de ese parámetro.

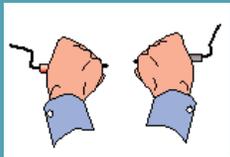
Para medir tensiones alternas, se usan otras posiciones de la llave selectora (que no están representadas en la figura), y un diodo rectificador en serie con uno de los bornes de entrada. Puesto que la tensión directa del diodo es del orden de un volt, los instrumentos analógicos sin amplificación miden con mucho error las tensiones alternas bajas, y no suelen incluir la medición de corriente alterna. Para



● Muchos instrumentos de aguja tienen una bobina que se mueve en el campo magnético de un imán. Cuando pasa corriente por la bobina, a través de cables muy delgados y flexibles, aparecen fuerzas electrodinámicas de giro. Cuando la corriente cesa, un resorte antagónico de espiral retorna la bobina a su posición inicial. El ajuste mecánico del cero se hace desde afuera, con un destornillador, a través de un excéntrico que gira levemente el extremo fijo de la espiral.



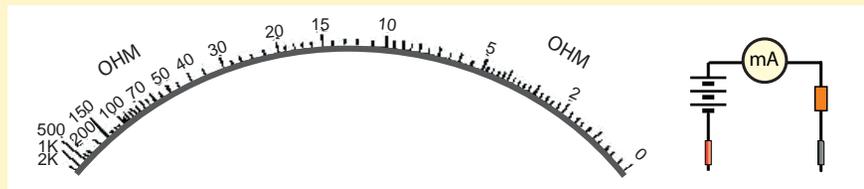
- Por tradición, hoy se usa más la magnitud resistencia (en ohm) que su recíproca, la conductancia (en siemens). Hay instrumentos de escala de conductancia casi lineal, con divisiones muy regularmente espaciadas. Cinco mili-siemens corresponden a doscientos ohms, y la menor división, de 0,1 mS, a 10 kΩ.



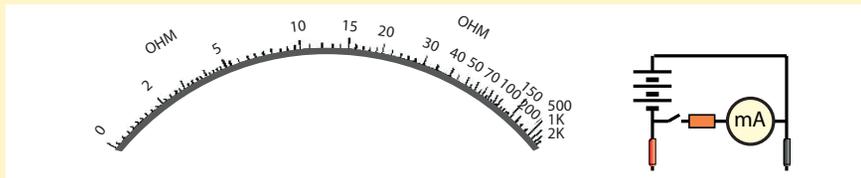
- Casi todos los multímetros, aun los más sencillos, pueden medir la resistencia del cuerpo humano entre las manos húmedas (entre 10 y 100 kΩ); o, al menos, la aguja se mueve al tocar las puntas.

entender la razón, consideremos, por ejemplo, que para medir 200 mA ca con una precisión razonable, se necesitaría generar una caída de tensión bastante mayor de 1 V, que es la tensión que se pierde como caída en el diodo rectificador. Si se usaran, entonces, 10 V, esa tensión se restaría de la que hay entre los extremos del elemento a través del cual circula la corriente alterna que se desea medir, y que en muchos casos es de pocos voltios. La conexión del multímetro alteraría considerablemente el circuito, y hasta haría que deje de funcionar. La medición de corriente alterna es una función que sólo resuelven los multímetros que amplifican la señal, sean analógicos o digitales.

La medición de resistencias usa la energía de una pila interna. La escala en esta función es muy alineal. Tiene, generalmente, el infinito a la izquierda, que se ajusta mecánicamente, igual que el cero de las demás funciones; y el cero a la derecha, ajustable con un potenciómetro, con las puntas de prueba unidas entre sí.



- Escala de medición de resistencias de un multímetro analógico; en este ejemplo, desde cero, a la derecha, hasta dos mil ohm a la izquierda (hay aparatos de mayor sensibilidad). Las resistencias mayores no se aprecian bien, porque la corriente que circula es pequeña y casi no desvía la aguja. El extremo izquierdo de la escala no tiene número, y a veces se pone ahí el símbolo de infinito, ∞. A la derecha, el circuito simplificado.



- Escala de resistencia con cero a la izquierda, en un multímetro equipado con óhmetro paralelo, *shunt* o baipás. Al conectar un resistor entre las puntas de prueba, la corriente que atraviesa la batería aumenta, pero la del microamperímetro disminuye. Cuando no se lo utiliza, hay que apagarlo con el interruptor, para que no se descargue la batería. Para medir resistencias bajas, el óhmetro paralelo es preferible al óhmetro serie.

En la medición de tensión o corriente alterna, los multímetros más avanzados miden el valor eficaz. Para eso integran el cuadrado de la tensión (o de la corriente, según el caso) durante un período, calculan el promedio, y obtienen su raíz cuadrada. Los multímetros más sencillos, en cambio, como tienen un diodo rectificador, miden el valor promedio aritmético, y en algunos casos en que se incluye

un capacitor, sólo el valor de cresta. En ambos casos, la escala está corregida bajo la suposición de que la forma de onda es sinusoidal, lo que no siempre se cumple con exactitud; eso introduce errores del orden del 5 %.

• Medición de la tensión en decibeles

El bel es la unidad de las escalas logarítmicas; y el decibel, un submúltiplo. Del mismo modo en que en un metro hay diez décimetros, diez decibeles equivalen a un bel.

Cuando una magnitud es diez veces mayor que otra, se dice que la supera en un bel. Por ejemplo, si un amplificador multiplica por diez la potencia de entrada, tiene una ganancia de un bel; si la multiplica por cien, la ganancia es de dos bel; y si la salida es mil veces mayor que la entrada, el amplificador es de tres bel, o treinta decibeles. En general, la ganancia, en bel, es el logaritmo decimal del factor de multiplicación. Y en decibeles, diez veces ese logaritmo.

En sonido, el nivel de cero decibel se estableció en 10^{-12} W/m^2 (un billonésimo de watt por metro cuadrado), densidad de potencia correspondiente, aproximadamente, al sonido más débil que percibe el oído humano promedio.

Por razones históricas relacionadas con el calibre del alambre de las líneas telefónicas, y con las unidades inglesas de longitud, se estableció que el cero decibel eléctrico corresponde a una potencia de 1 mW, desarrollada en una resistencia de 600 Ω . Eso corresponde a una tensión de 0,775 V eficaces.³ Cuando un voltímetro marca 0,775 V, indica entonces, convencionalmente, cero decibel. Si la tensión es diez veces mayor (7,75 V), la potencia es cien veces mayor, esto es, dos beles (ó 20 dB) más alta.

Para medir la tensión en decibeles con un multímetro, se utiliza la escala correspondiente; en el caso de esta figura, la roja inferior.

Se ve en la escala que el cero decibel corresponde a 0,775 V de tensión alterna; y 20 dB, a 7,75 V. Abajo a la derecha, una leyenda recuerda la definición convencional; 0 dB: 1 mW 600 Ω . La tabla instruye cómo hacer la lectura según qué escala de tensión alterna se utilice. Si se usa la de 10 Vca, se lee directamente, sin sumar nada (*Add 0*). Si se emplea la escala de 1.000 Vca de alcance, como esa tensión es 100 veces mayor que la anterior, la potencia es entonces 10.000 veces



- El cero decibel (o nivel de referencia de intensidad sonora) es independiente del sonido de un parlante que desarrolle 1 mW de potencia. El concepto de decibel es muy amplio, y se aplica a cualquier factor de multiplicación o de atenuación, aunque sea más conocido el del sonido. Hay decibelímetros que miden el nivel de señal en los cables de TV, otros la ganancia de amplificadores, etcétera. En la foto, un decibelímetro de comunicaciones, y otro de sonido.

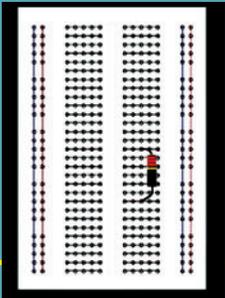
³ A partir de las relaciones $P = U \cdot I$, $y R = U/I$, se obtienen $U = \sqrt{P \cdot R}$, $y P = U^2/R$, donde U es la tensión, en volt; R es la resistencia, en ohm; I es la corriente, en amper; $y P$ la potencia, en watt.



- Detector de cristal líquido, sin pilas



- Buscapolos electrónico con pilas, díodos luminosos, zumbador y selector de sensibilidad.

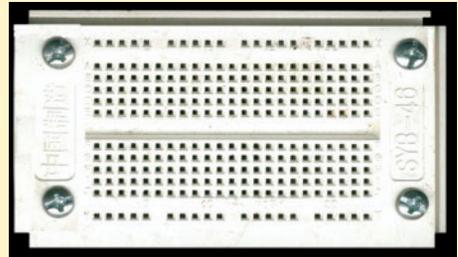


- El modelo de breadboard SYB-46 de Cixi Wanjie (China) tiene 270 contactos agrupados como se ve en la figura, y acepta calibres de alambre de 29 a 20 AWG, o de 0,286 a 0,812 mm de diámetro (el capítulo 6 se refiere a esa norma estadounidense de calibres de alambre).

mayor, porque a resistencia constante, la potencia depende del cuadrado de la tensión. Un factor de 10.000 corresponde a 4 bel, o 40 decibeles. Entonces, y como dice la tabla, si se lee en la escala de 1.000 Vca, a lo que indique la escala roja de decibeles, hay que sumarle 40 dB (Add 40). Si se mide de cero a 250 Vca, la tensión leída es 25 veces mayor que 10 V. El logaritmo decimal de 25×25 es 2,796, aproximadamente 2,8 bel, o 28 dB, que es el número rojo anotado a la derecha de 250.

● El tablero de prototipos

Esta útil herramienta de experimentación y desarrollo es más conocida por su nombre en inglés, protoboard, o breadboard. Consiste en un conjunto de enchufes agrupados en hileras, detrás de una superficie perforada con agujeros en forma de embudo, en los que se insertan las patas de circuitos integrados, transistores, resistores, leds, y cualquier componente con alambres de conexión normalizados, de aproximadamente medio milímetro de diámetro. Los enchufes están conectados en grupos. Hay tableros muy pequeños, para circuitos sencillos de aficionados, y otros con miles de enchufes, y fuentes de alimentación eléctrica incorporadas, para desarrollos profesionales. La velocidad de experimentación es muy grande, porque no se pierde tiempo en soldar y desoldar. Pero el circuito definitivo debe soldarse, para evitar falsos contactos causados por la oxidación en ambientes húmedos.



● Aplicaciones del buscapolos electrónico

En el capítulo 1 se describió el uso de un buscapolos electrónico (de los que se compran en ferreterías y casas de electricidad, y funcionan con pilas) para experimentar con cargas de inducción electrostática; y el 13 mostró cómo construir uno sencillo. Hay muchos modelos disponibles de buscapolos o detectores de tensión. Los hay sin pilas, con indicadores de cristal líquido, que aunque tienen una pantalla de dígitos, su funcionamiento es analógico:

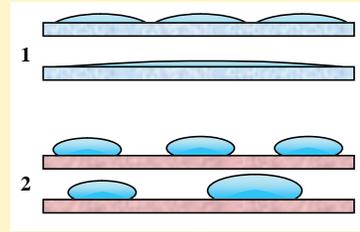


- Sensible buscapolos parecido a los tradicionales, pero con un diodo luminoso en vez de lámpara de neón. Lleva dos pilas, un carbón de seguridad limitador de corriente, y dos transistores.

cuanto más intensa es la señal, más números aparecen, y más intensamente marcados, sin que ninguno indique con exactitud la tensión, sino apenas su orden de magnitud. Estos aparatos, que hoy se consiguen por dos o tres pesos, aparecieron en el comercio hace apenas quince años, a pesar de que se los podía fabricar desde mucho antes; ése es un indicio de la popularización de la electricidad y la electrónica. Con los de pila y sonido se pueden medir —o estimar— resistencias muy altas, del orden de $10^{11} \Omega$.

Si se apoya la punta de prueba de un buscapolos sonoro sobre un vidrio y se toca el vidrio con la otra mano, el buscapolos no suena; pero sí lo hace cuando se echa el aliento sobre el vidrio y se condensa agua; y sigue sonando hasta que el agua se evapora, proceso que se puede acelerar si se abanica con un cuaderno. En cambio, los plásticos no conducen, aunque se les eche aliento y se los salpique, porque el ángulo de acuerdo entre el agua y el sólido es agudo en ese caso; en otras palabras, el vidrio se moja más que el plástico.

- 1.- Vidrio mojado con el agua condensada del aliento. El ángulo de acuerdo es obtuso; las gotas se tocan cuando crecen y forman una lámina continua conductora de la electricidad.
- 2.- Un plástico también condensa, pero el ángulo agudo de acuerdo entre el sólido y el líquido hace que si se tocan dos gotas, se forme una más grande desconectada de las demás; el agua entonces no conduce entre puntos distantes.

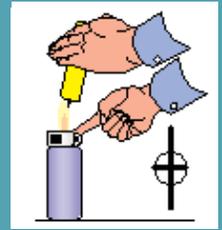


El papel parece aislante al probarlo con este método, pero muchas hojas de cuaderno agrupadas se muestran conductoras. Una sola hoja de papel conduce cuando le echamos el aliento, pero difícilmente se seque espontáneamente; hay que ayudarla con una llama; o, en más tiempo, con el calor del cuerpo.

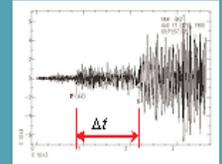
Una llama conduce, y no los gases fríos. Por eso cuando una nave espacial regresa a la atmósfera, durante unos minutos no hay comunicación posible con Tierra, porque el trasbordador envuelto en aire ionizado queda tan aislado de las comunicaciones, como un teléfono inalámbrico envuelto en papel de aluminio.

Una propiedad curiosa de las llamas es que conducen más hacia un lado que hacia el opuesto; ese efecto rectificador se usa en sensores de llama piloto de algunos hornos industriales, porque es más seguro que el de bulbo térmico que vemos en estufas y calefones.

Si se trazan líneas con lápiz de grafito en un papel, se comprueba cómo conducen, y es curioso el efecto de módem o exploración digital en el sonido entrecortado que se oye cuando deslizamos el sensor a lo largo de un renglón escrito en lápiz. Lo mismo se observa en ciertas bolsas de plástico con un diseño de rejilla conductora, en las que envuelven plaquetas de computadoras para protegerlas de la estática.



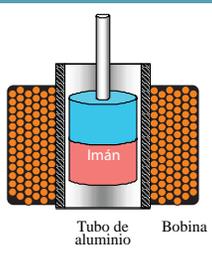
- Las llamas conducen la corriente eléctrica en un sentido, más que en el opuesto, efecto útil para el control de pilotos de hornos. Este efecto, mencionado en el capítulo 11 como rectificación de llama, se puede experimentar fácilmente con un buscapolos electrónico sonoro, y un encendedor. El aparato suena cuando la llama da en la punta de prueba, pero no si se toma ésta con la mano, y se aplica la llama al otro contacto del buscapolos.



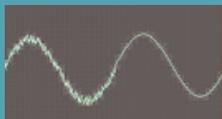
- La magnitud de un terremoto en la escala de Richter se obtiene con la fórmula de abajo, en la que A es la amplitud de las ondas en centímetros, y Δt , el tiempo que transcurre entre la llegada de las ondas longitudinales, P, y las transversales, S. La segunda fórmula da, aproximadamente, la aceleración del terreno.

$$M = \log\left(\frac{A}{1 \text{ cm}}\right) + 3 \log\left(\frac{8\Delta t}{1 \text{ s}} - 2.92\right)$$

$$\log(a/1 \text{ cm.s}^{-2}) = \frac{M}{3} - \frac{1}{2}$$



- La amortiguación mecánica del sismógrafo puede ser de aceite, o para mayor higiene, de aire, si las arandelas se mueven con muy poca holgura en el recipiente. Otra manera de amortiguar los movimientos es hacer que el imán deslice dentro de un tubo de bronce o aluminio. El movimiento induce corrientes de efecto magnético opuesto al movimiento. Un exceso de frenado puede disminuir la sensibilidad.



- Los factores grandes de amplificación son, al principio, fuente de sorpresas o efectos curiosos. Es que se amplifica, no sólo lo que se pretende (en este caso la señal inducida en la bobina), sino también la inducción de aparatos eléctricos cercanos. Es importante, a veces, la conexión a tierra, el filtrado con capacitores en paralelo, y el blindaje. En la foto, una señal ruidosa, y enseguida filtrada, en un osciloscopio.

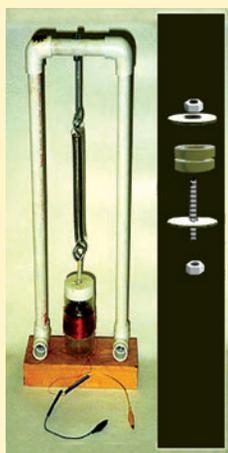
El campo eléctrico de una pantalla de TV se nota mucho, y se detectan las variaciones de brillo de la imagen.

● Sismógrafo electromagnético

Si se mueve una bobina en las cercanías de un imán, o éste con respecto a aquélla, en la bobina se induce una fuerza electromotriz. Para hacer un sismógrafo, se mantiene el imán suspendido (colgado de un hilo, o flotante), de modo que cuando el terreno se sacude por el terremoto, el imán se queda quieto, y se produce un movimiento relativo entre el imán y la bobina. La fuerza electromotriz generada se amplifica y se conecta a un registrador gráfico, o a un convertidor analógico digital que entregue los datos a una computadora, para hacer cálculos con ellos y presentar los resultados en forma de registro gráfico. En aparatos más sencillos, las oscilaciones se pueden ver en la aguja de un multímetro; y aun sin eso, se puede disparar una alarma sonora, o encender una luz.

Un sismógrafo es entonces, esencialmente, una pesa colgada. Su período de oscilación tiene que ser bastante mayor que el de las oscilaciones sísmicas, de una o dos por segundo. De otro modo, cuando el aparato siga oscilando cuando el sismo finalice, interpretaremos erróneamente sus movimientos.

El sismógrafo lateral mencionado en el capítulo 15 satisface muy bien la condición dicha. Bien ajustado, y con tornillos de nivelación en la base, se puede conseguir un período de oscilación de un minuto, o más. Pero el que sigue, aunque no cumple eso, es más fácil de hacer, y de llevar de un sitio a otro.

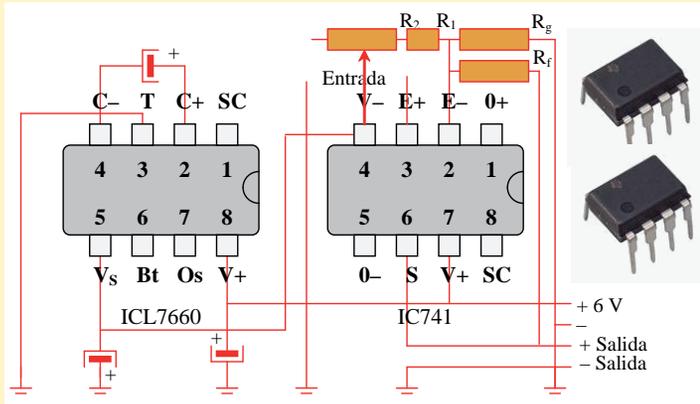


- Sismógrafo portátil, hecho con un bastidor de caños de plástico de media pulgada,⁴ adheridos, un resorte blando, y uno o dos imanes de parlante sumergidos en un recipiente con aceite, para la amortiguación. Alrededor se arrollan unas 300 vueltas de alambre de cobre esmaltado. El aparato es sensible a oscilaciones verticales del suelo, como las de muchos terremotos, y las originadas en el tránsito de personas y vehículos. Abajo, una variante de mayor período de oscilación, con un resorte fuerte, una pesa de gimnasio, y un imán que cuelga dentro de un carrete de alambre tal como lo venden, por lo que no hay que bobinar.



⁴ Las medidas inglesas son las que prevalecen, todavía, en los comercios argentinos y estadounidenses.

La figura muestra la conexión, que se puede realizar en un protoboard pequeño, como lo muestra la primera página de este capítulo.



La parte principal del circuito es un amplificador operacional IC741. Con el fin de usar una sola batería, y no dos simétricas, se emplea también un convertidor de tensión ICL7660. Este circuito integrado se alimenta con +6 V (máximo, 10 V), y entrega -6 V.

Siguen los significados de los símbolos y abreviaturas: +6V, entrada de batería; 0+ y 0-, ajuste de cero; E+ y E-, entradas del amplificador operacional; V+ y V-, alimentación del op-amp; S, salida del op-amp; SC, sin conexión; C+ y C-, positivo y negativo del capacitor; T, tierra; VS, tensión de salida del convertidor; Bt, baja tensión del convertidor (aquí no se usa); Os, oscilador del convertidor (tampoco se emplea en este circuito). $R_1 = 47 \Omega$; $R_2 = 1 \text{ M}\Omega$; $R_f = 180 \text{ k}\Omega$; $R_g = 2,2 \text{ k}\Omega$. Con $22 \text{ k}\Omega$, la ganancia se divide por 10; y con 220Ω , se multiplica por 10. Los tres capacitores son de $10 \mu\text{F}$ cada uno, polarizados, o electrolíticos.

Entre la pata 3 del IC741 y tierra (entrada), se conecta la bobina del sismógrafo; y entre la pata 6 y tierra (salida) se pone un multímetro, un zumbador, o un led con un resistor en serie, para que indiquen las oscilaciones.

El sismógrafo es muy sensible, y con modelos similares hubo aficionados que detectaron no sólo sismos, sino también ensayos nucleares en la época de la llamada guerra fría, entre 1947 y 1991, cuando abundaban esas pruebas militares.

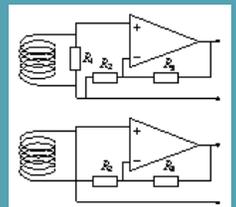
● Diseño de circuitos asistido por computadora

Las ideas que tenemos de la realidad no son tan complejas como el mundo material; por eso las simulaciones de casos en computadoras muchas veces se apartan, considerablemente, de la realidad. Sin embargo son muy útiles, porque permiten



● Antiguamente los sismos se evaluaban con la escala de Mercalli, basada en los efectos destructivos, los que, naturalmente, dependen de la calidad de la construcción. La escala de Richter, más objetiva, también tiende a su reemplazo por otra, la del *momento sísmico*, que considera, además de lo que marca el sismógrafo, el área de la rotura, y la elasticidad de la roca.

Los sismos suelen ser destructivos a partir de la magnitud 6, aunque en países de construcciones muy reforzadas, como el Japón, los daños son menores. En la foto, daños por el terremoto de magnitud 8 en Pisco, Perú, 2007, con mil muertos.



● Dos variantes más sencillas de amplificador para el sismógrafo. Según el número de vueltas de la bobina, anda mejor uno, u otro. R_1 reduce el ruido eléctrico que la bobina capta del ambiente.

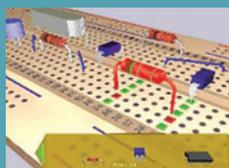
hacer muchas pruebas en poco tiempo, y sin gastos, de modo que la experimentación posterior con prototipos resulta más orientada a los fines prácticos.

Mencionamos aquí dos ejemplos opuestos (en tamaño, edad y potencia) de software de uso libre, que se puede descargar gratuitamente de la Red, el *Electronic Workbench* y el *Quick Field*.⁵

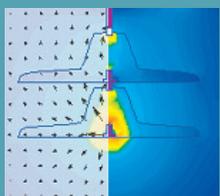
El primero, de *Interactive Image Technologies LTD*, canadiense, en su versión de 1981, ocupa sólo 0,5 MB (megabyte); incluye aplicaciones analógicas y digitales, y funciona tanto con el sistema operativo DOS, como con Windows. Una columna de la pantalla ofrece elementos para arrastrar y poner en el circuito: resistores, capacitores, inductores, transistores, amplificadores operacionales, transformadores, generadores, pilas, diodos rectificadores, luminosos, Zener, amperímetro, voltímetro, osciloscopio de dos canales de doble trazo en colores diferentes (para representar gráficamente la tensión en dos puntos del circuito a la vez), y otros elementos.

La figura siguiente muestra un circuito sencillo con un amplificador operacional en conexión inversora, al que se le aplica, a la entrada, una tensión alterna de 1 kHz y 1 V de tensión de cresta, o amplitud.⁶ El lazo de realimentación negativa del operacional es de 250 k Ω , y la resistencia de entrada, de 25 k Ω ; entonces el factor de multiplicación es de diez; y justamente la tensión a la salida, indicada por el voltímetro, es de 7,071 V eficaces, cuyo valor de cresta, o amplitud, vale $\sqrt{2} \times 7,701 = 10$ V, exactamente diez veces la amplitud de entrada.

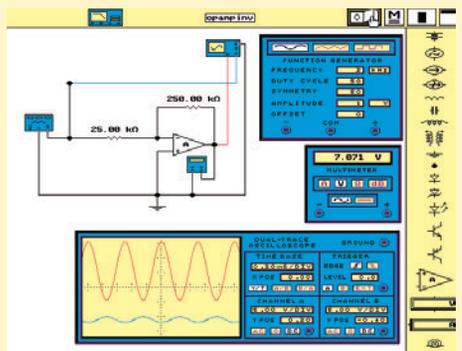
Los cables que van al osciloscopio se identifican en rojo y azul, en correspondencia con los trazos en la pantalla.



- Protoboard simulado por el programa Multi-Sim, que permite a los estudiantes cometer muchos errores iniciales, y aprender de ellos, sin destruir material, un poco antes de hacer las verdaderas prácticas.



- Simulación del servicio de una cadena de aisladores de porcelana. A la derecha, las zonas de diferente intensidad de campo eléctrico. A la izquierda, las flechas indican la dirección y el sentido del campo en cada punto y un dado instante.



- Aspecto del *Electronic Workbench*, o banco virtual de pruebas. El dedo sobre el interruptor, arriba, inicia la simulación. A la derecha, los elementos disponibles, entre ellos un punto de ramificación de conexiones. Si se cometen errores gruesos de diseño (cortocircuitos, falta de tierra), el programa lo advierte.

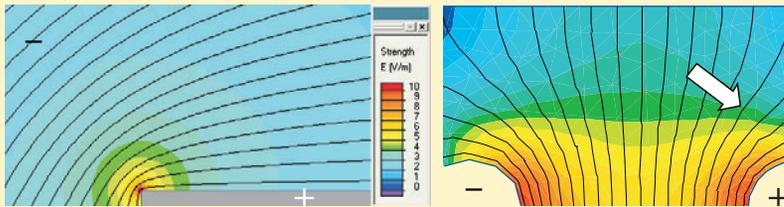
⁵ Esos programas (uno de ellos muy antiguo) son bastante avanzados. Hay numerosas variantes en Internet, muchas de las cuales sólo se ofrecen gratuitamente durante períodos de prueba, para que los posibles compradores vean si el producto les sirve. Después esos programas se paralizan, y sólo se pueden seguir usando si se los compra.

⁶ A veces, a la tensión de cresta de una tensión sinusoidal se le dice *semiamplitud*, en vez de amplitud, para que no se confunda con el valor de pico a pico, que es el doble.

● Software para el estudio de circuitos y campos

El Quick Field 5.6 para estudiantes⁷ es un avanzado programa de cálculo gratuito y libre, de uso muy sencillo. Hay una versión profesional que se compra, y que difiere de la de estudio sólo en la precisión de los resultados. Para permitir la descarga del programa, el proveedor pide los datos del solicitante; pero no los verifica, ni impone un registro; tampoco envía propaganda después.

El programa, de un tamaño de más de 36 MB, además de resolver circuitos, ofrece una planilla cuadrículada para que el usuario trace la geometría del problema que le interesa, e imponga las condiciones de contorno. Finalizado eso, el programa divide el área en zonas triangulares, cuyos vértices se llaman nodos, y en fracciones de segundo resuelve un sistema de tantas ecuaciones como nodos existan, y presenta los valores gráficamente. También es posible poner el cursor en el punto en el que interese conocer el módulo o las componentes de la inducción magnética, del campo eléctrico, o del potencial, y los valores aparecen escritos.



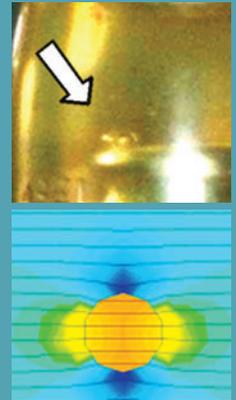
● Imágenes del Quick Field. Izquierda, esquina metálica en aire. El campo eléctrico es máximo cerca del borde. Derecha, esferas conductoras de 25 cm de diámetro, separadas medio metro; una a tierra, y la otra a 10.000 V. Las líneas unen puntos del mismo potencial; por ejemplo, la equipotencial señalada corresponde a 7.500 V. En colores, la intensidad del campo eléctrico, unos 30 V/mm cerca de las esferas, y 15 V/mm en el medio.

El programa acepta simetrías de traslación y de rotación, calcula capacitancias, y tiene en cuenta la permitividad de los diferentes medios. Es útil para el diseño de piezas sometidas a tensiones elevadas, y para estudiar la conducción térmica y eléctrica a través de cuerpos de diferente forma, tamaño y conductividad.

PROPUESTAS DE ESTUDIO

16.1. ¿A cuántos decibels de tensión equivalen 220 V? (pueden obtener la respuesta por dos métodos diferentes; uno es hacer el cálculo, y el otro consiste en extraer el dato de la escala del multímetro reproducida en este capítulo, sin hacer cuentas).

⁷ Una o dos veces por año, la compañía Tera Analysis publica una nueva versión mejorada del Quick Field. Las destinadas a estudiantes son gratuitas, y de uso libre.



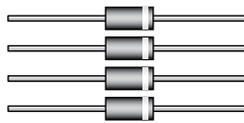
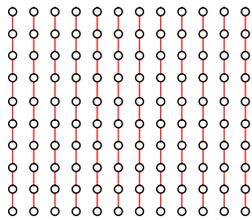
● Burbujas de aire atrapadas en un aislador de plástico. Abajo, estudio realizado con el Quick Field 5.4 para estudiantes. En el aire, el campo eléctrico es más intenso que en la resina, como lo indica el programa con un color diferente, y por el hecho de que las líneas de igual potencial están ahí más apretadas. En teoría, el aumento está dado por $3\epsilon/(2\epsilon+1)$, donde ϵ es la permitividad relativa de la resina; en este caso, 3.



● Pantalla digital que simula ser analógica. Permite una apreciación visual rápida de una magnitud, sin interpretar números.

16.2. ¿Cómo dispondrían, en un breadboard, o tablero experimental de conexiones como el de la figura, los diodos y el capacitor, para cargar éste con la salida de un rectificador de onda completa? (se pueden cortar y doblar los alambres como convenga).

16.3. Se conecta un resistor de $1\text{ M}\Omega$ a uno de los bornes de una batería de 9 V , y con



ese resistor en serie, se le mide la tensión con un multímetro de $20\text{ k}\Omega/\text{V}$. ¿Cuánto marca ese multímetro, respectivamente, en las escalas de 2, 5, 10, 25 y 250 V ?

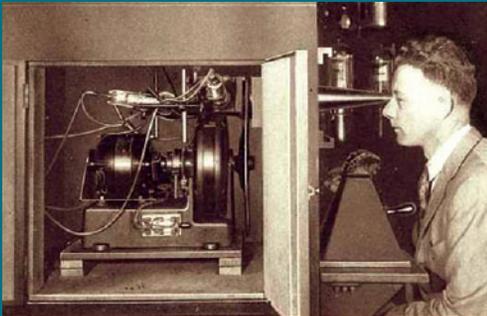
PARA INVESTIGAR

1. ¿Cómo se podrían filtrar las vibraciones causadas por el tránsito, en un sismógrafo con amplificación eléctrica?
2. A pesar de que las pantallas digitales parecen dar la misma información que los indicadores de aguja, o aun mayor, muchos prefieren los instrumentos analógicos, sean multímetros, relojes, diales de sintonía, u otros aparatos. ¿Cuál se puede imaginar que sea la razón de esa preferencia?

• Otras fuentes de estudio e información

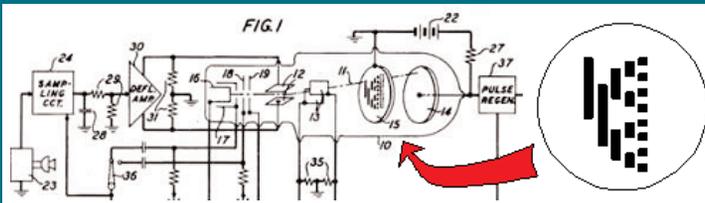
- Sugerimos buscar en la Red con las palabras instrumentos de electrónica, medidores, CAD (diseño asistido por computadora), simulación, y protoboard, o breadboard, virtual.
- En estos sitios está la antigua versión 2a para DOS del simulador de circuitos Workbench. (En Vetusware hay que registrarse para obtener el archivo). Es un archivo muy pequeño, de apenas medio megabyte.
 - <http://www.mediafire.com/download.php?mqmmmwdjgmj>.
 - <http://vetusware.com/download/Electronic%20Workbench%202.0a/?id=3940>.
- El Quick Field se puede descargar de <http://www.quickfield.com>.
- En <http://www.cs.york.ac.uk/netpro/bboard/jbreadboard.html> hay una apliqueta (o *applet*) Java en línea, que simula un breadboard, o protoboard, con el que se pueden armar circuitos, y probarlos, sin necesidad de descargar un programa.
- Curso de electrónica, de nivel intermedio: <http://www.aprenderelectronica.tk>.
- Experimentos de electrónica, Scatrón–Dinova. Es un kit muy elemental, para fines, principalmente, recreativos, con material de experimentación y un manual muy breve. A pesar de que es un juguete, hay profesionales que lo recuerdan como una fase importante y temprana de sus estudios y práctica.
- Gerrish, Howard H., *Experimentos de electrónica (Enseñanza de conceptos modernos)*, Limusa, México, 1969.

Introducción a las técnicas digitales



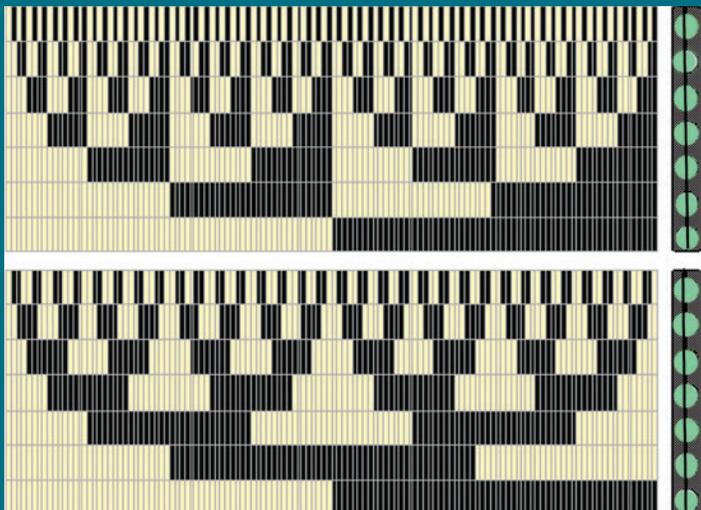
● Frank Gray, investigador de los Laboratorios Bell, e inventor de una de las formas de transmitir señales de TV en colores, patentó el primer aparato de telefonía digital, para disminuir el ruido y las interferencias, además de permitir la codificación de comunicaciones privadas. La voz registrada por un micrófono genera una señal eléctrica, de la que se obtienen frecuentes muestras periódicas. Cada muestra de señal desvía verticalmente el haz de un tubo de rayos catódicos, el que además tiene un barrido horizontal regular. Según la altura a la que el haz electrónico incide sobre una placa perforada, el

chorro de electrones se entrecorta de manera diferente, y así se generan pulsos en código, que se transmiten, se interpretan en destino, y con esa información se reconstruye el sonido.



● Fragmento de la patente 2632058, de Frank Gray, Estados Unidos de América, 1953.

● *Abajo:* Detector numérico de desplazamiento. En cada posición de la barra de siete fototransistores, algunos reciben luz y otros no; se sabe entonces en cuál de las 128 líneas verticales se encuentra la barra detectora. Tiene el inconveniente de que el paso de una línea a la contigua, a veces implica el cambio de estado de varios renglones a la vez, y si esos cambios no suceden simultáneamente, surgen señales falsas de posición. Abajo, variante inventada por el mismo investigador, llamada en su honor el *código Gray*. En la transición de una línea vertical a la contigua, sólo cambia de estado un renglón a la vez, y no aparecen señales falsas, aun cuando el trazado pueda ser algo impreciso.



Introducción a las técnicas digitales



● Analógico y digital

El funcionamiento de un aparato es *analógico* si la variación continua de una magnitud ocasiona una variación, también continua, de otra magnitud diferente. Por ejemplo, el termómetro de aguja de un horno responde a los cambios continuos de una magnitud, la temperatura, con variaciones continuas de la posición angular de la aguja. En cambio, un aparato es *digital* si las variaciones continuas de una magnitud ocasionan *saltos* de otra. Por ejemplo, en el termómetro clínico de la figura, el cambio progresivo de la temperatura ocasiona que, en la pantalla, un número salte al que le sigue.



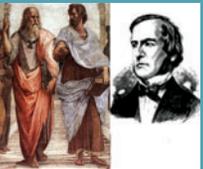
Hubo una época en la que el pensamiento digital fue un estorbo para la ciencia. Aristóteles de Estagira (384–322 aC) clasificaba los cuerpos en cálidos y fríos, graves y leves, móviles y quietos, húmedos y secos, de una manera *binaria*, con sólo dos posibilidades opuestas. Galileo Galilei¹ (1564–1642), en cambio, rechazó esa filosofía, y distinguió *grados continuos* de temperatura, de velocidad, de peso. El pensamiento de Aristóteles era digital; el de Galileo, analógico; y con él pudo avanzar más en el conocimiento de su época. Pero en el siglo pasado las cosas cambiaron por completo. Los triodos de vacío, transistores, amplificadores operacionales y compuertas lógicas, permitieron hacer miles de millones de operaciones numéricas por segundo, aproximar con gran precisión cualquier cantidad continua a números, operar con ellos, y obtener resultados más veloces, precisos y útiles que con métodos analógicos.

Las compuertas lógicas, que se tratarán enseguida, aplican casi sin cambios la lógica formal, inventada por Aristóteles hace 23 siglos.²

¹ Muchos coinciden en señalar a ese sabio italiano como el iniciador de la ciencia moderna; y que por eso, en vez de llamarlo por su nombre, Galileo, habría que referirse a él por su apellido, Galilei, como se estilaba con los investigadores e investigadoras modernos.

² *Todos los hombres son mortales; Sócrates es hombre; por lo tanto, Sócrates es mortal.* La frase se emplea en los cursos elementales de lógica, como forma concreta de la propiedad Todo **q** es **r**, todo **p** es **q**. Por tanto, todo **p** es **r**. Ese lenguaje lo introdujo Aristóteles, discípulo de Platón, quien a su vez lo fue de Sócrates.

● *Digital* viene de dígito: número, o cifra; pero también dedo; porque se los usa para contar. *Cálculo* es una operación con números, y también significa piedra. Lo mismo pasa con las *cuentas* de un collar o de un ábaco. Todos esos nombres ponen de manifiesto el carácter discontinuo de los números naturales (1, 2, 3, ...), en los que se basa la electrónica digital. Arriba, la cuenta $3 \times 9 = 27$. Foto: Pete Ganzel.



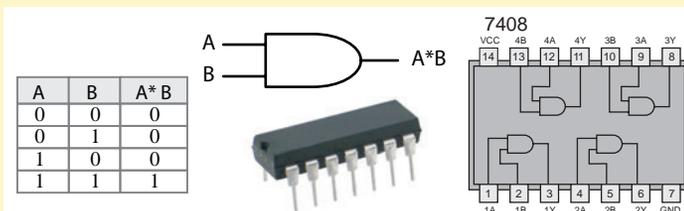
● La base de la lógica de Aristóteles fue la clasificación de las afirmaciones en verdaderas o falsas, sin medias tintas. George Boole (1815–1864) formalizó la idea con signos y ecuaciones, que se conocen como *operadores booleanos*, y el álgebra de Boole.

● Compuertas lógicas

Imaginemos que un ascensor automático debe esperar veinte segundos en la planta baja del edificio, para que bajen y suban los pasajeros. Pero si ya colmó su capacidad, es innecesario que espere, porque perdería tiempo; entonces puede partir. Y aun con el tiempo vencido, y si hay sitio, un sistema detector podría darse cuenta de que se aproxima un pasajero a paso vivo; entonces lo podría esperar, o ignorarlo si la cabina está llena. Por otra parte, si nadie subió todavía, sería inútil que el ascensor arranque cumplido el tiempo de espera, porque viajaría vacío y en vano; salvo, naturalmente, que lo llamen desde arriba. A todo esto, si alguien aprieta el botón de alarma, o impidió el cierre de la puerta, se debería suspender la partida. Esas siete condiciones, entre otras posibles, se dan por sí o por no, y no por grados, y requieren un procesamiento *lógico binario*. Es ahí donde intervienen circuitos con compuertas lógicas.

Las compuertas lógicas son variantes de amplificadores operacionales, cuya salida, en vez de entregar una tensión que puede variar entre $+V$ y $-V$, sólo puede valer o bien cero, o bien $+V$, y nunca un valor intermedio.³ La compuerta lógica es el caso más simple de circuito digital, porque sólo puede adoptar dos estados, llamados pasivo y activo, no y sí, o cero y uno. Las compuertas más comunes son las AND, NOT, NAND, OR, NOR y XOR.⁴ Por simplicidad, en lo que sigue se omite representar la alimentación auxiliar, y se dibujan sólo las entradas y la salida.

COMPUERTA AND

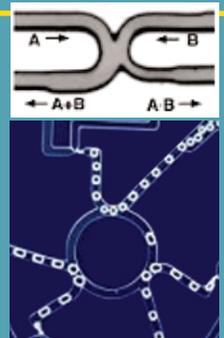


● **Circuito integrado DM7408, del fabricante Fairchild, con cuatro compuertas AND en la misma cápsula. Mide dos centímetros de largo, y se alimenta con $5V \pm 5\%$.**

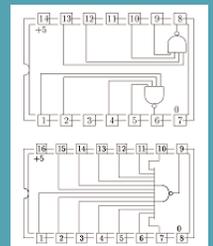
Como lo indica la tabla, la compuerta AND presenta una salida nula cuando la tensión en cualquiera de las entradas (o en ambas) es, también, igual a cero, y una salida máxima cuando las dos entradas reciben tensión. La conjunción $A*B$ se lee *A y B*, y también se representa como $A.B$, AB , $A \times B$ y $A \wedge B$.

³ Actualmente se establece, por norma, que los circuitos lógicos se alimenten con una tensión de 5 V.

⁴ Esos nombres en inglés, que se han adoptado como internacionales, son los de la conjunción copulativa (*y*) la disyuntiva (*o*), sus negaciones, y la conjunción disyuntiva excluyente: o bien esta afirmación, o bien aquella otra; pero no ambas.



● Para hacer compuertas lógicas se pueden usar circuitos integrados, relés, válvulas de vacío y hasta *fluidics*, o unidades fluidicas, tubos por los que circulan gases o líquidos. En la imagen, una compuerta fluidica que computa el valor AND y el OR. Abajo, una variante con burbujas. La fluidica es una tecnología de aplicaciones semejantes a las de la electrónica, de menor velocidad que ésta, pero también útil en la industria.



● Hay compuertas de más de dos entradas. En la figura, el circuito integrado LS20, con dos compuertas NAND de cuatro entradas cada una, y el S133, con una compuerta NAND de trece entradas.

COMPUERTA NOT

Esta compuerta, la de negación, invierte la señal lógica. Cuando a la entrada hay tensión, a la salida no la hay, y viceversa. El símbolo \bar{A} se lee *no A*, y se escribe también como $\sim A$, y \bar{A} .

A	\bar{A}
0	1
1	0



COMPUERTA NAND

Es la combinación de una compuerta AND y una NOT. El único caso en que su salida vale cero, es cuando están activas las dos entradas.



A	B	$\overline{A*B}$
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

COMPUERTA OR



A	B	A + B
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

Como lo muestra su tabla lógica, o tabla de verdad, la compuerta OR, o de conjunción inclusiva, tiene su salida activa, cuando es activa al menos una de las entradas. $A + B$ se lee *A o B*, y también se representa como $A \vee B$.

COMPUERTA NOR

El pequeño círculo a la salida de la compuerta, representa la negación, lo mismo que la raya sobre las letras. La compuerta NOR sólo entrega salida cuando no hay ninguna entrada activa.



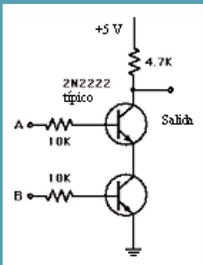
A	B	$\overline{A + B}$
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0

COMPUERTA XOR

La X representa el carácter excluyente de la disyunción. $A \Delta B$ se lee *o A, o B*, y también se escribe $A \oplus B$. La salida se activa cuando se alimenta una u otra entrada, pero no cuando están las dos ausentes, ni cuando están las dos presentes.

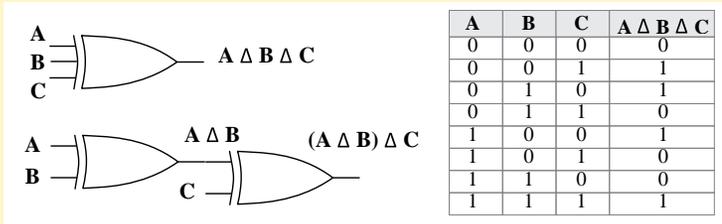


A	B	$A \Delta B$
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0



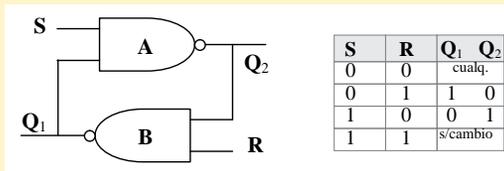
- Compuerta NAND, hecha con dos transistores. Cuando los dos conducen al recibir corriente en sus bases, conectan la salida a tierra. En otro caso, la salida es de 5 V.

Si una compuerta XOR tiene más de una entrada, la salida es 1 cuando el número de entradas activas es impar. Para ver por qué es así, podemos interpretar la disyunción de manera asociativa: $A \Delta B \Delta C = (A \Delta B) \Delta C$.



• El flip-flop

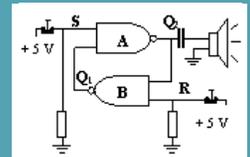
El flip-flop, o multivibrador biestable, es un circuito cuyos antecedentes se remontan al siglo XIX. Cumple la misma función que el relé autoalimentado descrito en el capítulo 8, ya que su estado, además de depender de las condiciones presentes (si hay o no tensión en R o en S), también depende de su historia.



Se lo puede hacer con dos compuertas NAND, como indica la figura. En su estado normal, se mantienen alimentadas desde afuera las entradas S y R , esto es, se ponen en el estado 1. Si Q_1 estuviera en 1, eso significa que Q_2 tiene que estar en 0, y todo cuadra. Pero con el mismo argumento, si Q_1 estuviera en 0, entonces Q_2 tiene que estar en 1, y todo sería coherente también. El circuito admite, entonces, dos estados posibles y estables. Para pasar de uno al otro se debe poner a cero momentáneamente la entrada correspondiente. Por ejemplo, un cero en R fuerza un uno en Q_1 , con lo que Q_2 cae a cero; entonces cuando R vuelva a su estado normal, uno, el circuito quedará en el mismo estado: $Q_1 = 1$ y $Q_2 = 0$. Si después se pone a cero momentáneamente la entrada S , aparece tensión en Q_2 , con lo que se apaga Q_1 . Cuando la entrada S vuelve a su valor normal, que es 1, el circuito queda en el mismo estado, $Q_1 = 0$ y $Q_2 = 1$, opuesto al anterior. Esa propiedad hace del flip-flop el circuito más sencillo capaz de almacenar información, en este caso binaria, porque equivale a un cero o un uno. La entrada S se llama *set*, y la R , *reset*, de poner y reponer, en inglés.

Almacenar o un cero o un uno se considera un *bit* de información. Ocho bits son un *byte*, también llamado *octeto*.

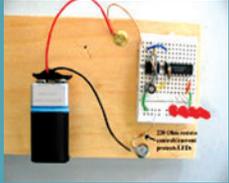
Para que un flip-flop responda a pulsos de tensión, y no a sus interrupciones, se lo puede diseñar con entradas inversoras, que se representan con un pequeño



- El *flip-flop* se inventó en 1928 con el nombre de *disparador de Eccles y Jordan*. Su nombre popular se empezó a usar en 1930, y significa *chancletas*, por el ruido que hace ese calzado contra el pie y el suelo, semejante al que emite un parlante conectado a la salida del circuito, cada vez que se pulsa una interrupción de entradas (el capacitor bloquea la corriente continua).



- Algunos interruptores de perilla, cuando se los acciona, hacen contacto si antes no lo hacían, y desconectan en caso opuesto, en una función conocida como *toggle*, o balanceo, la misma que cumplen los flip-flops del tipo JK.



- Contador binario de cuatro bits, armado por Jorge Flores, de Lima, Perú, con una batería, un integrado 4.520, un reloj 555, un capacitor y tres resistores. Cada vez que se acciona un pulsador improvisado con una chinche y papel de aluminio, los leds indican el avance de la cuenta binaria, desde 0, con todos los leds apagados, hasta el 15, con todos encendidos. El agregado de un integrado 555, da pulsos de reloj que hacen que el contador marche solo.

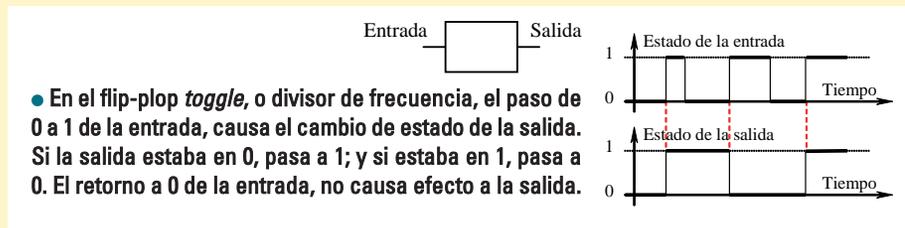
círculo de negación en el esquema. Para entradas sin invertir, el flip-flop se puede armar con compuertas NOR.

FLIP-FLOP CON RELOJ

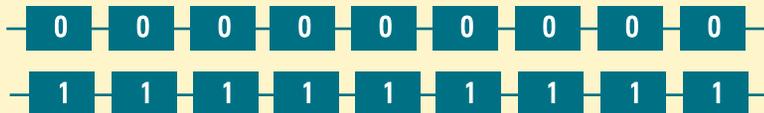
En muchas aplicaciones, relacionadas con la transmisión y procesamiento de datos, se desea que varios circuitos conmuten a la vez y no con demoras diferentes que den lugar a errores; y cada circuito no cambie de estado ante cualquier señal que le llegue por sus entradas, sino sólo si éstas arriban en el intervalo de tiempo en que les es permitido ingresar. Esos flip-flop tienen electrodos adicionales de habilitación y de reloj, en los que ingresan señales que representan el cero o el uno, (ó *L* y *H*, de *low* y *high*), de modo que el circuito sólo reacciona si las señales de entrada ingresan durante el valor alto de la señal de reloj, o de la señal de permiso, o enable.

OTROS TIPOS DE FLIP-FLOP

Hay una gran variedad de circuitos biestables para el almacenamiento de la información: JK, SR, D, T, etcétera. Uno interesante es el flip-flop basculante, más conocido por su nombre en inglés, *toggle*, cuyo estado cambia con las señales que recibe por una sola entrada. Si está inactivo y recibe la señal, se vuelve activo; si la señal se anula, queda activo, sin cambios; si viene una nueva señal, se desactiva, y si esa señal desaparece, permanece inactivo. Por su funcionamiento, se lo llama *divisor de frecuencia*.



Consideremos varios *toggles* en cadena, como muestra la figura. Si inicialmente estaban todos en 0, cuando se introduce un 1 a la entrada del primero, el segundo conmutará a 1; eso hará que el tercero también pase a 1, y así hasta el último, como una fila de dominós.



Si a continuación se conmuta varias veces la entrada del primero, cada uno de los flip-flop que siguen cambiará de estado con la mitad de la frecuencia del primero, la cuarta parte, la octava, y así sucesivamente.

Supongamos que, después de varias conmutaciones de la entrada del primer elemento, se llega a este estado:



A partir de todos los flip-flop en el estado 1, para que el primer elemento pase a 0, hay que aplicarle un pulso. Para que pase a 0 el segundo, hacen falta dos pulsos en el primero. Para que el tercer elemento pase a 0, se necesitan cuatro pulsos a la entrada del primero; y así sucesivamente. Como el séptimo está, ahora, en 0, eso significa que hubo, por lo menos, 2^6 pulsos de entrada, o sea, 64. Además, como el quinto está en 0, hay que sumar 16; más 4 y 2, respectivamente, por el tercero y el segundo; en total, 86 pulsos positivos a la entrada del primer flip-flop. Vemos entonces en esa cadena de *toggles* una primitiva manera de contar cantidades.

En la práctica, y para que los valores significativos sean los unos y no los ceros, se usan flip-flop de entrada inversa, que conmutan cuando la entrada pasa de 1 a 0. El flip-flop de entrada es el de la derecha de la serie, para que la cifra menos significativa quede de ese lado, igual que en la numeración, donde las cifras de mayor valor son las que están más a la izquierda. Ésa es una numeración *binaria*, porque consta de sólo dos símbolos, o estados, de cada dígito, en este caso el 0 y el 1.

0	0	0	0	0
0	0	0	0	1
0	0	0	1	0
0	0	0	1	1
0	0	1	0	0
0	0	1	0	1
0	0	1	1	0
0	0	1	1	1
0	1	0	0	0
0	1	0	0	1
0	1	0	1	0
0	1	0	1	1
0	1	1	0	0
0	1	1	0	1
0	1	1	1	0
1	1	1	1	1
1	0	0	0	0
1	0	0	0	1
1	0	0	1	0
1	0	0	1	1
1	0	1	0	1
1	0	1	0	0
1	0	1	1	0
1	0	1	1	1
---	---	---	---	---



- Una cifra binaria es como un flip-flop de entrada inversa. Cada vez que la cifra pasa de 1 a 0, obliga a la cifra de la izquierda a cambiar su valor. Por ejemplo, en el lugar señalado por la flecha, la última cifra pasó de 1 a 0, entonces la penúltima conmuta; y como lo hace de 1 a 0, la antepenúltima también conmuta; pero como lo hace de 0 a 1, ahí termina el cambio.

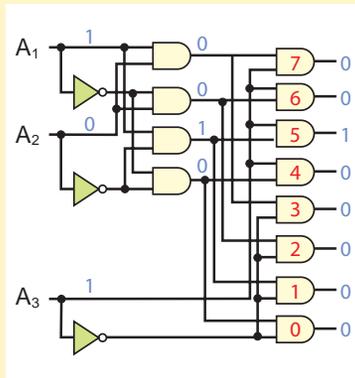
● Conversión de numeración binaria a decimal

Como vemos, es sencillo, electrónicamente, contar una cantidad de pulsos en el sistema binario de numeración, y conseguir que un flip-flop vuelva al estado inicial cada cantidad de 2, 4, 8, 16 ó 32 pulsos, o cualquier potencia entera de dos. Es algo más difícil conseguir que un circuito vuelva al estado inicial cada vez que recibe diez pulsos, que es lo que se usa para contar en base diez. Se necesita que el circuito de cada cifra admita diez estados diferentes, que podemos llamar 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 y 0; y hacer que cada vez que ese elemento pase del estado 9 al 0, obligue al de al lado a cambiar al estado siguiente a aquél en el que se encuentra; por ejemplo, si estaba en 4, que pase a 5; y si estaba en 9, que pase a 0.

Una de las formas de transformar un número binario en uno decimal es la de la figura, tomada de <http://logica-digital.blogspot.com>, de Armando Martínez. El circuito, con once compuertas AND y tres compuertas inversoras, convierte números binarios de tres cifras, desde el 000 hasta el 111, en un número decimal de una sola cifra, desde el 0 hasta el 7.



- Usamos numeración decimal, porque tenemos diez dedos en las manos. Sin embargo, existieron culturas que numeraban con base 6, 12, y otras, o que combinaban la numeración decimal con las de otras bases. Aún hoy, se venden huevos y facturas por docena, y no por decena, ni por kilogramo.



A pesar de su apariencia intrincada, el circuito no es difícil de interpretar. Por ejemplo, para que la compuerta 7 tenga salida, tienen que estar alimentadas sus dos entradas. Una de ellas es la tercera cifra binaria, A3. La otra entrada de la compuerta 7 es la conjunción de las cifras binarias A1 y A2. En síntesis, el binario 111 equivale al decimal 7.

Para que se active la cifra decimal 6, tiene que estar activa la entrada A3, que es la más significativa del número binario, y equivale a un 4.

Y además, tiene que darse la conjunción entre A2, que vale 2, y la negación de A1, que vale 1. En resumen, $6 = 4 + 2$, sin que intervenga el 1. En la práctica, para convertir números binarios en decimales, se usan circuitos integrados ya diseñados para esa función.

Los contadores decimales intervienen sólo en la presentación de la información a los humanos, o para recibirla de éstos. Si no fuera por la costumbre, encontraríamos que la numeración de base diez es incómoda, porque desperdicia bits; por eso, las máquinas suelen operar internamente con numeración binaria, tetral, octal, hexadecimal; y en general, con bases iguales a potencias enteras de dos. En todas esas bases de numeración, las reglas para contar son las mismas: se pasa de un dígito al siguiente, y cuando se vuelve al inicial, se hace que el dígito contiguo avance una posición.

● Controladores de pantallas digitales

Como ejemplo de función lógica de control, veamos un detalle del manejo eléctrico de uno de los dígitos decimales de siete segmentos de una pantalla de cristal líquido (LCD).

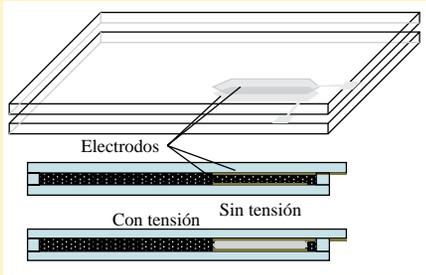
Hay varios tipos de LCD. En algunos, los segmentos encienden (o se hacen visibles) cuando se aplica tensión entre dos electrodos,⁵ uno de los cuales tiene la forma del segmento, y el otro es la espalda completa de la pantalla, común a todos los segmentos.

Otros modelos de pantallas carecen de espalda común, y los trazos encienden sólo cuando se aplica tensión entre los dos electrodos que encierran el segmento, a modo de sandwich.

⁵ En el capítulo 2, se explican las bases del funcionamiento de los LCD. Por razones relacionadas con la durabilidad de esa clase de pantallas, la tensión que se les aplica tiene que ser alterna, de una frecuencia del orden de las decenas de hertz; de otro modo, la sustancia del gel se descompone.

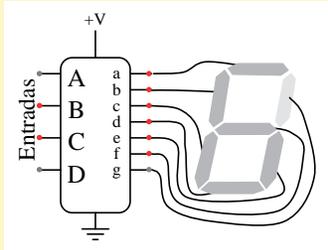


- Disposición típica de los siete segmentos de un dígito decimal, con los que se pueden representar también algunas letras. Los más antiguos, en 1940, se hacían con lámparas incandescentes o fluorescentes. Hoy, los más comunes son los de leds, o diodos luminosos, y los de cristal líquido.



- Segmento de un dígito de una pantalla LCD. El trazo se hace visible cuando se aplica tensión entre dos electrodos transparentes que encierran el gel. En algunos casos, el electrodo de abajo ocupa toda el área, y es común a todos los trazos. En otros, como éste, cada trazo tiene electrodos independientes.

Aunque con motivos de estudio, o como hobby, podemos construir una pantalla digital numérica, con las compuertas necesarias, la industria ya provee circuitos integrados, simples y múltiples, que se ocupan de transformar las señales binarias, o decimales, en las necesarias para que en los LCD se enciendan los segmentos adecuados, ante cada cantidad de entrada. Esos circuitos se conocen como controladores, y más aun por su nombre en inglés, *drivers*. Sigue un ejemplo de controlador para pantalla LCD de reverso común.⁶



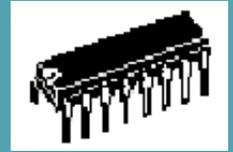
- Para cada combinación de dígitos binarios en las cuatro entradas, A, B, C y D, el controlador provee salidas adecuadas para el encendido de los segmentos correspondientes del dígito decimal (para evitar cruces de conexiones que pudieran confundir, alteramos el nombre habitual de las salidas).

D	C	B	A	a	b	c	d	e	f	g	N
0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	1	0
0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	1
0	0	1	0	1	0	1	1	0	1	1	2
0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	3
0	1	0	0	0	1	0	0	1	1	1	4
0	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	5
0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	6
0	1	1	1	1	0	0	0	1	0	1	7
1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	8
1	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1	9

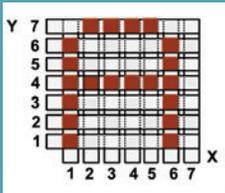
Por ejemplo, si en A, B, C y D se introducen, respectivamente, las señales 0, 1, 1, 0 (como se muestra en colores), entonces se activan las salidas a, b, c, d, e y f, y permanece inactiva g. Con eso, se genera el número 6 en la pantalla.

Si en vez de tratarse de una pantalla de cristal líquido de espalda común, fuera una de segmentos de dos electrodos independientes cada uno, habría dos caminos para controlarla. Uno, obvio, es conectar la mitad de los electrodos entre sí, para convertirlos en uno común, y dejar independientes los restantes, con lo que se puede usar el mismo controlador que acabamos de ver. Pero hay otra manera de manejar los segmentos, que emplea un controlador más sencillo y barato, y que justifica esa clase de pantallas.

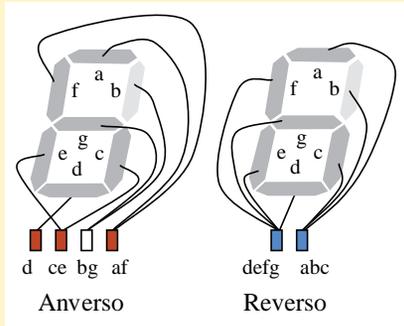
⁶ En realidad, las salidas a, b, c, d, e, f y g comandan compuertas que alimentan el LCD con corriente alterna; por simplicidad, omitimos representarlas (para comprender la lógica digital, supongamos que la pantalla es de leds, que funcionan con corriente continua).



- Controlador de pantalla de cristal líquido de dígitos de siete segmentos, modelo M74HC4543, fabricado por ST Microelectronics. Opera con una tensión comprendida entre 2 y 6 Vcc, aplicada entre la pata 16, y la 8 de tierra. Hay que aplicarle una tensión alterna de onda cuadrada a la pata 6, que es la que enciende los segmentos de la pantalla.



- Para componer letras o símbolos complejos, la cantidad de segmentos necesarios sería demasiado grande; se prefiere entonces una matriz de puntos. En la figura, la letra A se consigue al alimentar cada uno de sus veinte puntos (por ejemplo, el x_3, y_4 , todos a la vez, o uno a continuación de otro, en rápida secuencia).



- Los electrodos del frente del LCD se agrupan como indica la parte de la izquierda de la figura, y los de atrás, como se muestra a la derecha. Entonces, por ejemplo, cuando se aplique un polo de la tensión al primero, segundo y cuarto electrodo del anverso, y el otro polo a los dos electrodos del reverso, como se indica en colores, encenderá el dígito 6.

Con este tipo de controlador se ahorra una salida, puesto que el anterior tiene siete, y éste seis. Pero su principal ventaja no es ésta, sino que facilita el manejo de pantallas con varios dígitos, que es el caso más común.

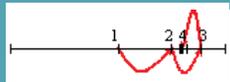
• Conversión analógico digital

El código Gray es un ejemplo de conversión analógico digital, en la que una variable continua, como una traslación, o un giro, se traduce en el cambio de estado de los sensores que detectan las líneas claras y oscuras de una banda, o de un disco. Pero ¿cómo traducir automáticamente, a números, una temperatura, una velocidad, o un tiempo? En los tiempos actuales, las técnicas digitales se apoyan casi exclusivamente en la electrónica. Para convertir una magnitud continua en un número, se la transforma previamente en una tensión eléctrica, de modo que el problema se reduce a cómo convertir esa tensión, en información digital.

Los métodos primitivos se basaban en la acumulación de cargas eléctricas iguales⁷ en un capacitor, hasta que la tensión del capacitor igualaba la tensión que se quería digitalizar, condición que se determinaba con la ayuda de un amplificador operacional en la conexión como comparador. Igualadas ambas tensiones, se contaba el número de cargas parciales que recibió el capacitor, y se multiplicaba eso por $C \cdot Q$, donde C es la capacitancia, en farad, y Q la carga, en coulomb.

Como ese método es lento, y por eso inaceptable para muchas aplicaciones, y como la tecnología actual ofrece componentes de tamaño minúsculo, de los que entran centenares de miles en una sola cápsula de circuito integrado, actualmente se prefieren otros métodos, basados en la comparación sucesiva de la tensión incógnita, con la que proviene de una cantidad suficiente de tensiones de referencia.

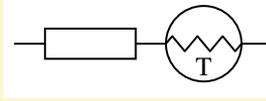
⁷ Si tenemos en cuenta que $Q = I \cdot t$, para obtener cargas eléctricas iguales, se hacen circular corrientes iguales, durante tiempos iguales. Para conseguir una corriente constante, se la hace circular a través de un resistor, cuya caída de tensión se compara con la de un diodo Zener. Los tiempos iguales se pueden conseguir con las oscilaciones de un cristal de cuarzo.



- Si al buscar una palabra en el diccionario, recorriéramos la lista desde su inicio, tardaríamos mucho en hallarla. En cambio, si abrimos el libro por el medio, descartamos la mitad que no contiene el dato, y repetimos ese procedimiento con la otra mitad, y así de seguido, la búsqueda será muy breve. Ese método se conoce como *dicotomía*, y lo emplean algunos convertidores analógicos digitales para comparar tensiones. En un diccionario de $2^{10} = 1.024$ hojas, hay que buscar a lo sumo diez veces. Y con sólo diez comparaciones, se puede medir una tensión con una precisión de una parte en mil (dicotomía significa cortar por la mitad).

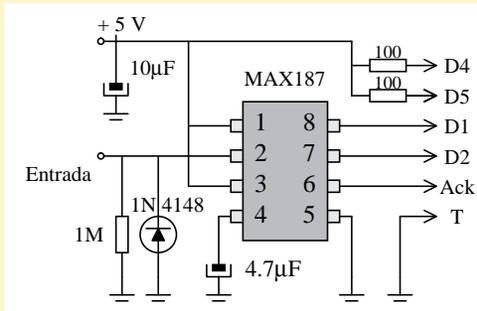
● Ejemplo de aplicación de un convertidor A-D

Para medir una temperatura, convertir esa medición en una salida digital, e ingresar los datos a una computadora (para registro, o para alguna acción automática), se puede usar un circuito sencillo con un *termistor*, o resistor variable con la temperatura, en serie con un resistor fijo. Cuando se alimenta la serie con una tensión constante, la tensión entre los extremos de cualquiera de esos dos componentes, varía con la temperatura.



La tensión para alimentar la serie se puede extraer de la misma computadora, como lo muestra el circuito que sigue, o bien de una batería independiente.

El circuito de la figura emplea un convertidor analógico digital MAX187 de Motorola, de 5 V de alimentación y 12 bits. Eso significa que puede distinguir entre 2^{12} , ó 4.096 valores diferentes de tensión, entre 0 y 5 V, lo que arroja una precisión máxima teórica de una parte en cuatro mil, el 0,025 %, ó 1,25 mV.



Los componentes son tan pequeños, que caben en la ficha macho DB25, de 25 patas, de un cordón de puerto paralelo de computadora, el mismo que se usa para enchufar una impresora.

Con un programa de computación (que no tratamos aquí) que envíe datos al puerto paralelo, se consigue que aparezca un 1 en los bits 4

y 5 del puerto. En ese instante, el circuito integrado digitaliza la señal eléctrica que recibe por la entrada; esto es, presenta datos cero y uno en sus salidas, equivalentes a tensiones de 0 y 5 V, respectivamente. El programa de la computadora debe poner en nivel bajo la pata 7 del integrado (a través del contacto D2 de la ficha del puerto), para que el integrado reciba, con eso, la orden de selección. Después se envían, con el programa, 12 pulsos de reloj a la pata 8 del integrado, a través de la pata D1 de la ficha. Por cada uno de esos doce bits de reloj, el integrado devuelve un bit, 0 ó 1, a través de su pata 6. Esa secuencia comienza a partir del bit menos significativo, y finaliza en el de mayor valor. Los valores de salida del integrado los lee, así, la computadora, y los convierte, si queremos, en un número binario de doce cifras, o en uno decimal equivalente, de cuatro cifras.



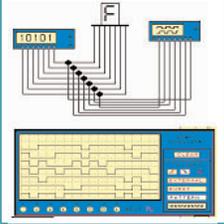
- Ficha macho DB25 para puerto paralelo. Los números de las patas están moldeados en el plástico. La 10 es la señalada como Ack en el circuito, y desde la 18 hasta la 25, están todas a tierra; T en el circuito. Los puertos *paralelo* son los que reciben datos por varios contactos a la vez; los puertos *serie*, en cambio, los aceptan por una sola entrada de dos contactos.

$$R = \frac{V_0}{2^{n-1}}$$

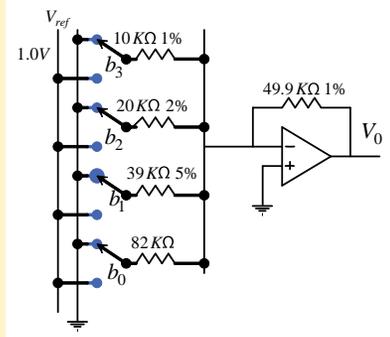
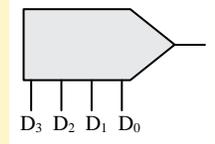
- La resolución de un convertidor está dada por la fórmula de arriba, donde R es la resolución, en volt, V_0 es la tensión máxima; y n, el número de bits. Por ejemplo, con un convertidor de dos bits, la resolución es de la mitad de la tensión máxima, o lo que es lo mismo, del cincuenta por ciento. La resolución es la mínima variación de la entrada, capaz de producir algún cambio. Se relaciona con la precisión del convertidor.

● Conversión digital analógica

A veces se necesita la función recíproca de la conversión analógica digital, por ejemplo, cuando se digitaliza un sonido, y después se lo reconstruye a partir de los datos numéricos.

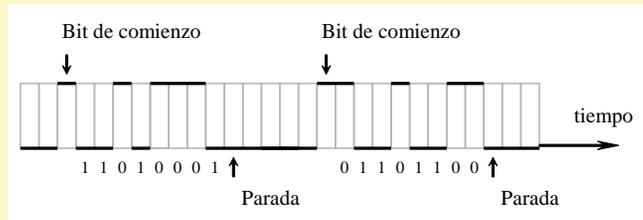


- Circuito digital simulado con el Electronic Workbench de 1991. Un graficador virtual permite analizar cómo conmutan sus diferentes compuertas. Aunque no ofrece tantas posibilidades de aprendizaje como la conexión de componentes verdaderos, igualmente es útil para estudiar variantes de proyectos.



- Convertidor digital analógico de cuatro bits. La resistencia de entrada cambia según cuáles bits estén conectados a la tensión de referencia; y con ella, se modifica el factor de amplificación. El bit más significativo es el de arriba, que introduce una ganancia doble que el inmediato inferior; cuádruple de la que corresponde al bit que sigue hacia abajo, y ocho veces mayor que la del último bit. El puerto de entrada, en este caso, es paralelo.

La comunicación de datos en paralelo no deja dudas, por la posición de entrada, cuál es el bit más significativo, cuál es el de menos valor, y cuáles los intermedios. Pero en la comunicación en serie, el dispositivo receptor debe recibir una



señal que le indique cuándo comienza el primer bit, y cuándo fue el último de cada carácter transmitido.

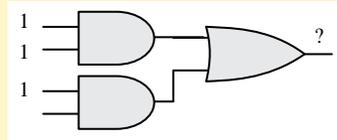
La figura muestra un ejemplo de transmisión de datos en serie. Se transfirieron, en un tiempo de pocas millonésimas de segundo, los números binarios 11010001 y 01101100. Los últimos dígitos valen 1; los penúltimos, 2; los antepenúltimos, 4; etcétera; y los primeros dígitos de cada grupo de ocho, valen 256. Esos binarios equivalen a los decimales 216 y 418, que pueden servir, cada uno, para representar una letra, o un carácter especial.

PROPUESTAS DE ESTUDIO

17.1. Escriban cuatro listas; una de números binarios, otra de tetrales, otra de octales, y una cuarta de hexadecimales; todas a partir del cero, y hasta el equivalente

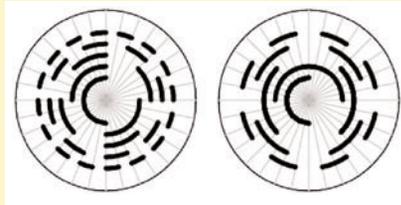
decimal de 20 (la utilidad de esa práctica es la de comprender mejor el funcionamiento de algunos circuitos lógicos usados en la transmisión de datos).

17.2. ¿Qué valor lógico tiene la salida de la compuerta indicada con un signo de interrogación?



17.3. Diseñen un flip-flop con dos compuertas NOR, y expliquen su funcionamiento.

17.4. Uno de los codificadores de posición angular de la figura usa un código binario secuencial, en el que los números binarios se presentan en orden creciente. El otro, en cambio, responde al código Gray. ¿Cuál es cada uno?



17.5. ¿Qué signo enciende en una pantalla con dígitos de siete segmentos si, con las barras agrupadas en el anverso y el reverso como se muestra en la página 214, se aplica un polo de la fuente de tensión al grupo abc del anverso, y el otro polo a los grupos ce, bg y af?

• Otras fuentes de estudio e información

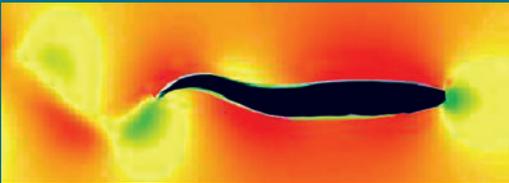
- Volvemos a mencionar <http://www.pablin.com.ar>, de Pablo Canello, que contiene muchos ejemplos apropiados para el estudiante y el aficionado, entre ellos muchas aplicaciones digitales de variado nivel. En ese sitio hemos consultado el ejemplo de convertidor de uso general, para entrada a computadora.
- En <http://www.todorobot.com.ar/proyectos/paralelo/paralelo.htm>, hay un programa Visual Basic, compilado como ejecutable exe, para escribir y leer el puerto paralelo de una computadora, con explicaciones en castellano.
- En <http://www.electronica2000.com/digital/cirlogse.htm> hay un curso de nivel intermedio de electrónica digital, y sus fundamentos. Es de autores varios.
- El sencillo software Electronic Workbench, en su versión 2ª de sólo medio megabyte, mencionado en el capítulo 16, permite simular circuitos digitales, entre sus herramientas virtuales hay relojes, generadores de pulsos, dígitos de siete segmentos y generadores de palabras, o combinaciones de dígitos.

Nuevos materiales y sus aplicaciones



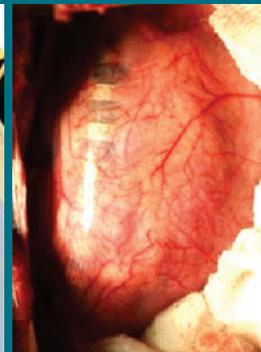
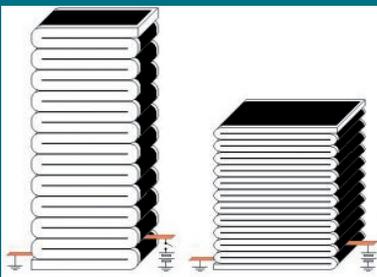
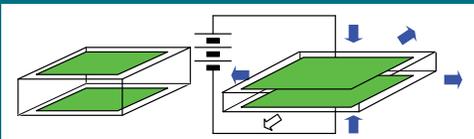
- Dirigible de plástico inflado con helio, desarrollado por EMPA (*Eidgenössische Materials Prüfungs Anstalt*, Instituto Federal Suizo de Ensayos de Materiales).

El aparato nada en el aire como un pez en el agua, gracias a que su envoltura cambia de forma cuando se le aplica electricidad; sin embargo, la cabina de pasajeros se desplaza sin oscilaciones.



- La nave es silenciosa, genera poca turbulencia, y gasta menos energía que una de hélice o de turbina. A la izquierda, simulación de computadora, que representa la presión del aire en las inmediaciones del dirigible ondulante.

- Con los *elastómeros electroactivos*—así se llaman esos materiales— se hacen también parlantes, músculos artificiales, y serpientes robóticas que examinan, limpian y reparan tuberías, y ayudan en la cirugía cardiovascular.



- Elastómero blando, encerrado entre dos placas conductoras de metal delgado y flexible. Cuando se les aplica tensión, las placas se atraen, y la goma se comprime. Si se pliega el conjunto como en la figura, se obtiene un músculo artificial, para aplicaciones industriales y médicas.

Nuevos materiales y sus aplicaciones¹



- Si se aprieta y se afloja repetidas veces una pantalla de cristal líquido entre los dedos, el gel fluye, y sus partículas se ordenan parcialmente; entonces alteran la polarización de la luz que las atraviesa, y se produce un efecto de colores móviles, que perdura mientras el gel se encuentre en movimiento.



- Por arriba de los 60 ó 70 grados, las pantallas de cristal líquido se ennegrecen, y cuando se enfrían, vuelven a la normalidad. Eso se ve a veces cuando se deja un reloj expuesto al sol en verano, ya sea al aire, o en un coche con las ventanillas cerradas. El efecto se debe al desorden de las moléculas cuando la temperatura es elevada.

Hasta hace poco más de un siglo, la ciencia y la tecnología se basaban en el hallazgo de materiales naturales, y la observación y aprovechamiento de sus propiedades útiles. Hoy, el mayor conocimiento de la estructura de la materia inorgánica y orgánica, permite, en muchos casos, invertir ese proceso, y generar artificialmente, a partir de las necesidades, materiales que no existían. Las plantas medicinales se reemplazan, o se complementan, con medicamentos sintéticos; a los vegetales y animales para la alimentación se agregan variedades modificadas genéticamente, y creadas especialmente para resistir herbicidas, la sequía y enfermedades; y a los clásicos conductores metálicos, y a los aislantes vegetales y minerales, hoy se suman superconductores cerámicos, semiconductores, polímeros de muy elevada resistividad, y una variedad muy grande y creciente de materiales de propiedades útiles, y hechos a la medida de aplicaciones electrónicas. Este capítulo trata algunos ejemplos.

● Cristales líquidos

En el capítulo 2 se describió el principio de funcionamiento de una pantalla de cristal líquido, que consiste en el giro del plano en el que oscilan las ondas de luz, cuando la aplicación de electricidad orienta las moléculas alargadas de un gel.

Un cristal es un sólido cuyos átomos están regularmente ordenados, y en posiciones aproximadamente fijas entre sí; esto es: los átomos vibran y oscilan, pero no se apartan a gran distancia del lugar primitivo que ocupaba cada uno, y cada átomo tiene siempre los mismos vecinos. En un líquido, en cambio, los átomos no presentan un orden regular y, además, cada uno puede apartarse considerablemente de su posición inicial, se revuelva o no el líquido.²

Hablar de un cristal líquido parece, entonces, una contradicción. Sin embargo, reciben ese nombre materias cuyas partículas pueden ordenarse como las de un

¹ La palabra nuevo pierde rápidamente su significado, como en las llamadas *NTIC* (nuevas tecnologías de la información y la comunicación), que tienen ya treinta años.

² Ese efecto se conoce como *difusión*, y obedece a los movimientos de las partículas, que sólo estarían quietas a la temperatura de cero grado absoluto. Si se echa una cucharada de miel en un vaso con agua, la miel se va al fondo; pero después de algunas semanas se distribuye uniformemente en todo el volumen; y eso ocurre aunque los líquidos se mantengan quietos.

crystal; pero su estado es blando, como el de una gelatina diluida, intermedio entre el sólido y el líquido.

Los cristales líquidos se conocen desde hace más de un siglo, y los primeros que se estudiaron fueron los del colesterol, una familia de sustancias químicas insolubles en agua, que participan de la estructura de algunas proteínas. En 1940 se usaron como válvulas de luz; desde 1970 se popularizaron en las conocidas pantallas de números y signos de relojes, y otros aparatos electrónicos; y hoy en las pantallas en colores de televisores, monitores y celulares.

Hay otras aplicaciones de los cristales líquidos, aparte de la indicación de dígitos o símbolos, y la formación de imágenes en pantallas. Cuando se suelda con arco eléctrico, el operador o la operadora debe alzar la máscara para ver dónde apoya el electrodo, y cubrir su rostro con ella antes de hacer contacto, para no sufrir el deslumbramiento de la chispa eléctrica. Parte de esa maniobra la realiza, entonces, a ciegas. Con una máscara de cristal líquido comandada por un circuito que recibe, a través de un fototransistor o fotodiodo, la luz del arco de la soldadura, la persona que suelda puede ver con toda claridad dónde hace contacto. Cuando se establece el arco, el sensor de luz envía de inmediato una señal.



● **Máscara de soldadura con auto oscurecimiento.**

El cristal líquido se oscurece al instante, sin que quien suelda deba siquiera parpadear. A partir de ese momento, la persona suelda bajo la luz del propio arco, mucho más intensa que la del ambiente, pero ahora filtrada. Eso reduce el riesgo de daños visuales, y el de recibir ascuas en pleno rostro; mejora la calidad del trabajo, y ahorra tiempo.

Otra aplicación de los cristales líquidos es su uso como estroboscopios.³ Si se mira el funcionamiento de una máquina rotativa a través de un filtro de cristal líquido alimentado con corriente alterna de onda cuadrada del mismo período que el de rotación de la máquina, se la verá quieta; y si hay una pequeña diferencia entre la frecuencia de la tensión que excita el cristal líquido, y la frecuencia de rotación de la máquina, se la verá en cámara lenta, hacia adelante o hacia atrás, efecto útil para diagnóstico de fallas, para afinar el encendido de los motores de explosión, o para balancear las ruedas de los automóviles.



● **Cristal líquido, arte fotográfico de Karen Neill. El gel se orientó con electricidad; después se interrumpió la alimentación, y se desplazaron los vidrios que encierran el gel, para peinar las moléculas en diferentes direcciones. El empleo de luz polarizada muestra la orientación de las moléculas; iguales en las regiones del mismo color. Los círculos son burbujas de aire.**

³ En griego, *estro* es período (el estrógeno es una hormona que desencadena el estro, o período, en las hembras de los mamíferos). Estroboscopia significa, entonces, aparato para visualizar fenómenos periódicos.



● **Imagen estroboscópica, obtenida con una cámara que gira, cuyo obturador permanece abierto uno o dos segundos, tiempo en que se ilumina la escena con unos veinte destellos de luz.**



● **Una pantalla común de cristal líquido se arruina, si se le aplica tensión continua durante mucho tiempo. Si a pesar de eso se le dan, por ejemplo, 9 V en serie con la resistencia de los dedos de la mano, y se quita esa tensión, la pantalla queda con los segmentos marcados durante varios segundos, y después se apagan. En cambio, las pantallas biestables quedan con su indicación permanente, hasta que se les aplique una tensión inversa adecuada. La pantalla de la figura se dejó de alimentar cinco segundos antes de la foto.**

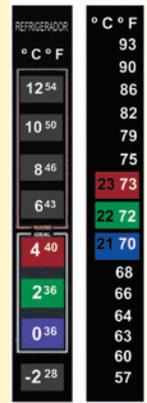
● Cristales líquidos biestables

Las pantallas de cristal líquido más comunes, aunque consumen poco, y mucho menos que las de leds y de plasma, gastan algo de energía. Por eso, la pila de un reloj dura sólo dos años; y a veces, mucho menos. La energía gastada es la necesaria para orientar las moléculas alargadas del gel cada vez que se aplica tensión entre dos electrodos. Cuando se deja de aplicar tensión, los trazos desaparecen, porque las moléculas del gel se desordenan, por sus movimientos térmicos.⁴ Así entonces, un reloj de LCD gasta energía eléctrica, aun cuando los números de su pantalla permanezcan sin cambio. Eso obedece a que, por protección, los segmentos se excitan con tensión alterna, y requiere un cierto trabajo alinear periódicamente, muchas veces por segundo, las moléculas del gel en sentidos opuestos.

Sin embargo, hay geles que se pueden excitar con tensión continua, sin que se dañen ni se gasten, y que tienen además la ventaja de que sus moléculas conservan su posición durante mucho tiempo, gracias a una mayor viscosidad; así mantienen la información almacenada en la pantalla, sin gasto de energía. Cuando se cambian los datos, entonces sí se utiliza energía, pero en cantidad insignificante, frente a la que demandan las lcd comunes, puesto que alcanza con un solo pulso de tensión para encender o apagar un trazo.⁵

● Cambio de color del gel con la temperatura

La orientación espacial de las moléculas alargadas o achatadas de los geles electroópticos es sensible a los campos eléctricos, y constituye la base del funcionamiento de las lcd. Pero a cierta temperatura, que no es muy alta, las moléculas se desordenan, y se orientan al azar, haya o no campo eléctrico. Ese hecho, que resulta un inconveniente, porque limita la temperatura



⁴ La temperatura se corresponde con el grado de agitación de las moléculas. A cero grado absoluto (273,16 grados Celsius bajo cero) las moléculas están teóricamente inmóviles; y a otras temperaturas, sus velocidades son tales, que sus energías cinéticas $\frac{1}{2} m v^2$, donde m es la masa de la molécula, y v su velocidad) son del orden del producto de la constante de Boltzmann por la temperatura absoluta. Esa constante vale $1,3806503 \times 10^{-23} \text{ m}^2 \text{ kg s}^{-2} \text{ K}^{-1}$.

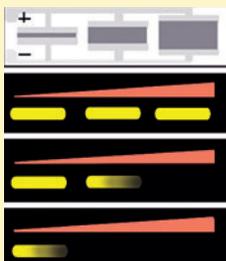
⁵ La energía que consume una pantalla de cristal líquido es tan pequeña, que su generación carece por completo de importancia económica; porque se mediría en millonésimas de centavo por día. La ventaja de las pantallas de cristal líquido biestable es que, cuando utilizan pilas, éstas son de muy pequeño tamaño, o inexistentes, si se aprovecha la luz ambiental para generar electricidad. El fin de la reducción del consumo de energía es, en este caso, disminuir el tamaño, el costo y el mantenimiento de los aparatos, y también la cantidad de desechos.



- Hay ventanas y anteojos de cristal líquido, con sensores de luz que actúan sobre un circuito eléctrico que controla la transparencia del vidrio; mayor cuando hay poca luz, y menor cuando la claridad es demasiado intensa. Su respuesta a los cambios de iluminación es instantánea, y no demorada, como en los anteojos fotosensibles a la radiación ultravioleta.

de trabajo, se aprovecha como ventaja para hacer cintas termométricas reversibles, conocidas también como tiras de frente, o tiras de fiebre. Hay variantes adecuadas para la medición de la temperatura ambiental, de heladeras, y de congeladores.

Aparte de los geles y sus aplicaciones electrónicas, hay también pigmentos sensibles a la temperatura, tanto reversibles como de uso por única vez. Algunas pilas y baterías se venden con un indicador de su estado de carga, que consiste en un papel con tres rectángulos impresos de pintura semiconductor de un lado, y una sustancia termocrómica del otro, que vira del negro al amarillo cuando supera cierta temperatura. Cuando la pila está en buen estado, su tensión alcanza para calentar los tres resistores; y cuando está muy descargada, sólo se colorea una de las figuras, o ninguna.



- Arriba, reverso del indicador. El rectángulo de más alto es el de más resistencia, y necesita una mayor tensión para alcanzar determinada temperatura. La batería se conecta entre + y -. Más abajo, el anverso, para diferentes estados.

La sustancia sensible a la temperatura cambia de negro a amarillo cuando se la calienta, y se oscurece cuando se enfría. La temperatura de virado ronda los 70°C. Para que funcione aunque el día sea muy frío y haya viento, el indicador suele estar cubierto con una lámina de plástico que encierra un pequeño espesor de aire aislante intermedio. En algunas pilas el medidor está incorporado, y sólo hay que apretar un punto blanco para activarlo. A veces falsifican este tipo de indicador; lo sabemos al apretar el punto fuertemente y con insistencia, sin ningún resultado, hasta descubrir que es sólo un dibujo.

● Papel electrónico

La tecnología de corriente nula de los cristales líquidos biestables (aunque la intensidad de la corriente valga cero sólo mientras la imagen permanece fija), cuando se aplica a la obtención de pantallas muy delgadas y de material flexible, se relaciona con el llamado *papel electrónico* (e-paper, o *papel-e*) cuyo desarrollo está todavía en fase experimental. La idea es poder escribir, mediante teclado, ratón, o al tacto con el dedo o un estilo,⁶ y borrar después lo escrito si queremos, sin

⁶ El estilo es un objeto punzante con el que antiguamente se escribía sobre tablillas de madera clara pintadas con cera negra, o sobre barro que después se ponía a secar, y si era importante, se horneaba. En algunos países todavía llaman *encerado* al pizarrón (la pizarra es un mineral negro que se encuentra en lajas, y que se usaba, enmarcado, en madera para escribir con tiza). Metafóricamente, el *estilo* de alguien es su forma particular de escribir, o de hacer cualquier otra cosa.



- Arriba: cucharitas que cambian de color con la temperatura, para evitar quemaduras sorpresivas cuando se toman líquidos muy calientes.

Abajo, tira autoadhesiva, cuya advertencia aparece sólo cuando se superan los 70 grados centígrados. Se suele poner en los disipadores térmicos de equipos electrónicos (lo que parece un oso, es una mano que toca un objeto caliente).



gastar papel, para disminuir la cantidad de residuos, y la demanda de fibra vegetal proveniente de bosques.



- Reloj electrónico combinado con tarjeta de embarque de aeropuerto, elaborado con papel electrónico flexible.

Los pasajeros los devuelven a bordo; entonces se los puede marcar con nuevos códigos, para usarlos otra vez sin gastar papel. (Diseño experimental de Jacky Wu, Neo Chen y Eric Liuha).



- Lo que parece una hoja de papel impresa guardada en un sobre transparente, es un papel electrónico, que se puede borrar y volver a escribir indefinidamente.

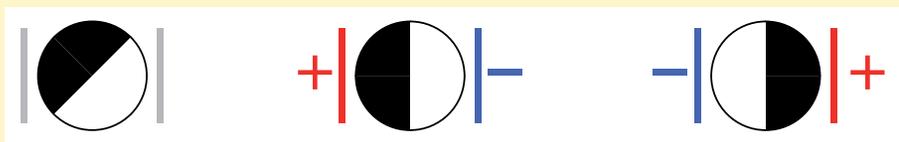
Hay varias clases de papel electrónico en experimentación, y sus principios de funcionamiento dependen de la aplicación; si se desea o no que se imprima a distancia; si el lector tiene o no permiso para escribir; si se quiere escribir o dibujar a mano, o con teclado, etcétera. Pero en todos los casos se necesitan píxeles⁷ biestables.

Una de las tecnologías de papel electrónico, desarrollada en 1975 por Nick Sheridon, de la Xerox, utiliza esferas microscópicas, en emulsión en un líquido viscoso. Cada pequeña esfera es blanca de un lado, y negra del opuesto, y de polaridades enfrentadas.



- Reloj de pared de tres milímetros de espesor y un kilogramo y medio de peso, presentado por Citizen Watch Co. Ltd. en la Eco-Products 2005, Tokio.

Una aplicación quizá más útil es la de indicar, en los frentes de los ómnibus, el número de la línea, su recorrido, y la cantidad de asientos libres, entre otros datos que convenga actualizar. La flexibilidad de la pantalla contribuye a absorber golpes y vibraciones.



- Esferas bicolors microscópicas para papel electrónico. Según la polaridad del campo eléctrico que se aplique, las esferas se dan vuelta, y mudan el color aparente.

Para evitar que ese papel se borre con la electricidad estática del ambiente o del cuerpo, se lo cubre de ambos lados con una lámina conductora y transparente.

Aunque la tecnología predominante en el papel electrónico es, hoy, la de los cristales líquidos, se está experimentando con variantes, entre ellas la de los materiales magnéticos que cambian de color, o de posición, cuando se los orienta desde afuera.

La posibilidad de escribir y borrar de manera sencilla, y manejar así la información, es una importante meta tecnológica, porque hoy es la época de mayor volumen de escritura, lectura y gasto de papel.

Algunas de las soluciones actuales para el registro visual de la información,

⁷ Pixel significa elemento de imagen (del inglés, y fonéticamente, *picture element*).

guardan, en lo esencial, semejanza con formas primitivas de escritura, aunque difieran, naturalmente, en la velocidad, el tamaño del soporte, en la posibilidad de transferencia de datos y en la facilidad de empleo. No sabemos si la búsqueda de formas de registro de datos está ya alojada o no en nuestro genoma, pero sí se observa que el escribir y borrar fácilmente atrajo siempre a niños y adultos.



● **Pizarra magnética.** El imán levanta partículas oscuras sumergidas en un líquido blanco y espeso. Para borrar, se desliza un imán por atrás. El juguete es una variante de uno más antiguo, la *pizarra mágica*, en la que un papel manteca se adhería a un fondo oscuro pegajoso, del que se despegaba, para borrar, con una tirilla deslizante.

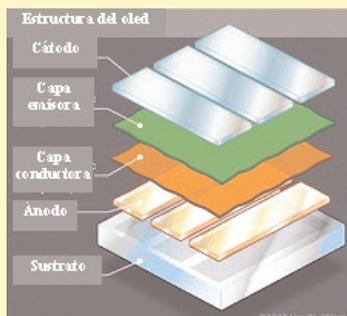
● Diodos orgánicos emisores de luz

La electroluminiscencia de los materiales orgánicos se observó un poco antes de 1960, en cristales de antraceno, una sustancia química compuesta por tres anillos bencénicos unidos linealmente. Sin embargo, los materiales orgánicos con propiedades luminosas más marcadas y útiles se inventaron, o descubrieron,⁸ cerca de 1990. Su empleo en aparatos electrónicos se empezó a difundir ya entrado el siglo actual.

Las aplicaciones de mayor alcance se relacionan con la comunicación y la información, por ejemplo en la fabricación de pantallas de computadoras y celulares. La vida media de los nuevos oleds, aunque es bastante menor que la de los leds inorgánicos, ya supera las cien mil horas, o diez años, tiempo muy razonable, en comparación con el que posiblemente dure el aprovechamiento del equipo al que pertenecen.

Se aplican también en paneles de iluminación suave ambiental, en reemplazo de focos de luz brillante, para que no produzcan sombras.

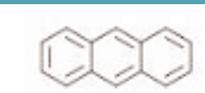
Los oleds permiten la construcción de pantallas de TV y monitores tan delgadas, que se las puede colgar de la pared como si fueran cuadros. Su espesor es de



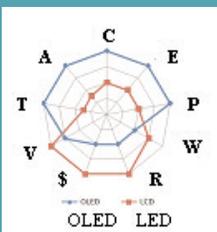
⁸ A medida que avanzan la ciencia y la tecnología, es más difícil distinguir un descubrimiento de una invención. Cuando hay muchas personas que trabajan en un campo, aumenta considerablemente la probabilidad de descubrimientos en apariencia azarosos, pero que los planificadores y administradores de recursos esperan. Los oleds se descubrieron como una variante de los polímeros conductores, y uno de los primeros de estos materiales lo obtuvo por casualidad un estudiante que trabajaba con Hideki Shirakawa, Premio Nobel de Química, del Instituto de Ciencias de Materiales de la Universidad de Tsukuba, en el Japón. El estudiante había confundido miligramos con gramos al hacer un preparado químico. Naturalmente, el resultado de esa casualidad tuvo trascendencia gracias a que se produjo en un ambiente científico y técnico muy desarrollado.



● Tablilla sumeria de 2300 aC, escrita con estilo sobre barro. Los escolares, para borrar y empezar un nuevo ejercicio, simplemente amasaban el barro, y lo alisaban. Lo mismo se pretende con el e paper, pero con la posibilidad de transferir la información a varios miles de caracteres por segundo.



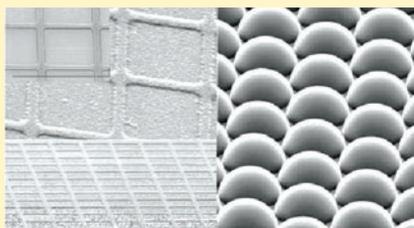
● Molécula de antraceno, uno de los primeros materiales orgánicos de los que se supo que emiten luz cuando se les aplica electricidad. La molécula de ese hidrocarburo tiene catorce átomos de carbono, ubicados en los vértices de los hexágonos, y diez de hidrógeno, en los vértices que no se comparten (en griego, *ántrax* significa carbón).



- Ventajas comparativas entre leds y oleds. \$: baratura; V: vida; T: velocidad de respuesta; A: ángulo de visión; C: contraste; E: delgadez; P: liviandad; W: economía de energía; R: resolución.

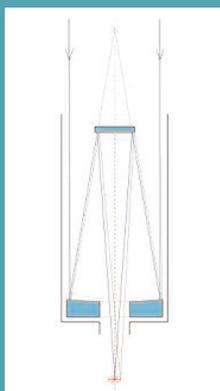
menos de un centímetro, y superan en ese aspecto la delgadez de las pantallas de cristal líquido, las de leds inorgánicos, y las rígidas de plasma.

Esto que parece un lujo, es en realidad una necesidad, porque además de economizar energía,⁹ las pantallas de oleds ahorran espacio, cada vez más escaso en las ciudades de gran densidad de población.



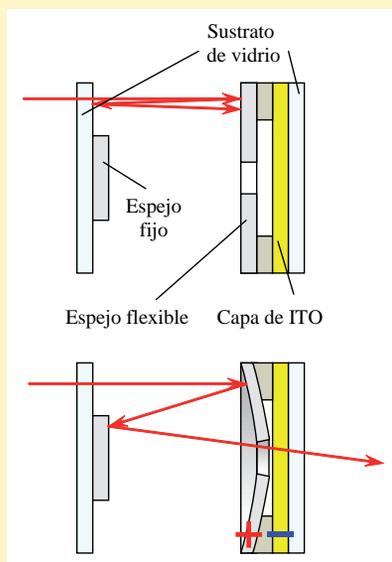
- Panel luminoso de oled, desarrollado por la Universidad de Michigan, visto con microscopio electrónico. Las esferas, de cinco micrones de diámetro, actúan como lentes que dirigen hacia adelante la luz generada por la grilla posterior.

• Vidrios con ITO, y válvulas de luz para pixeles telescópicos



- Esquema de rayos de un telescopio de Newton. La luz de la estrella incide en un espejo cóncavo que la desvía; la luz se refleja en un espejo plano, y forma una imagen real, que se puede ver con un ocular, que no está representado. La semejanza de su diseño con el de las válvulas de luz de espejos flexibles, sugirió, para éstas, el nombre de *pixeles telescópicos*.

El ITO, en inglés óxido de indio y estaño, es un material conductor que se puede aplicar en láminas tan delgadas, que resultan transparentes. Es actualmente el material con el que se hacen los contactos en las pantallas de cristal líquido, en reemplazo del oro usado primitivamente. Además de esa aplicación, se está experimentando un tipo de pantalla formada por pares de discos de aluminio muy pequeños, enfrentados, uno de los cuales tiene un agujero en el medio. Los discos miden una décima de milímetro de diámetro, y una décima de micrón de espesor.¹⁰



Esa clase de pantalla funciona con iluminación trasera. Cuando el disco de aluminio de un pixel está sin alimentación eléctrica, permanece plano y paralelo al espejo fijo; entonces la luz que pasa al otro lado es nula, o insignificante. Pero cuando se aplica una tensión eléctrica entre el disco perforado

insignificante. Pero cuando se aplica una tensión eléctrica entre el disco perforado

⁹ Los oleds suministraban, a fines de 2008, 46 lúmenes por watt, y a mediados de 2009, 76 lúmenes por watt; más de la décima parte de la máxima eficiencia luminosa teórica, que es de 683 lm/W, y comparable con la de los leds inorgánicos. Un watt es un joule por segundo, y la definición de lumen, unidad de flujo luminoso, está en una nota al pie del capítulo 14.

¹⁰ Para esta aplicación, esos espejos no se fabrican más delgados (lo que sería perfectamente posible), porque entonces serían incapaces de reflejar la luz. Para que un objeto refleje, absorba o desvíe la luz, tiene que tener un espesor no mucho menor que el de la longitud de onda de la radiación; y la longitud de onda de la luz visible está comprendida entre los 0,38 micrones del rojo, y los 0,75 micrones del violeta.

y el frente transparente conductor de ITO, ambos cuerpos se atraen, y el disco perforado, que es muy delgado y flexible, se arquea, hace converger la luz, que rebota en el espejo plano de enfrente, y sale por el pequeño agujero; entonces, de frente, se ve luz; aparece un punto luminoso en la pantalla, que será blanco si es monocromática, o de color, si los pixeles están provistos de filtros coloreados.

Parece increíble que una tensión pequeña pueda curvar, sólo por la fuerza electrostática, un espejo metálico. Pero se trata de un metal muy delgado, y de una distancia muy pequeña. De hecho, con la electricidad estática generada por un peine frotado contra el pelo o la ropa, podemos curvar una lámina de papel de aluminio del que se usa en la cocina, a pesar de que es cincuenta veces más grueso que el de un pixel telescópico.

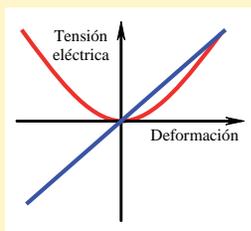


- Imagen obtenida con un microscopio de efecto túnel. Con un material piezoelectrico alimentado con una pequeña tensión variable, se mueve una púa finamente afilada químicamente, que recorre distancias del orden atómico. Si esa punta se polariza positivamente, arranca electrones de los átomos de las cercanías, los que se detectan como pequeños pulsos de corriente. Esos pulsos se amplifican, y se grafican en una pantalla barrida con el mismo movimiento que el de la púa exploradora. Se obtiene, así, una imagen de la distribución de los átomos en un material. No sólo eso; es posible, también, al elevar la tensión, arrancar átomos individuales de un sitio, y ponerlos en otro; así escribieron, en 1989, el acrónimo de la *International Business Machines*, con átomos de xenón, sobre un cristal de níquel. (El efecto túnel es el fenómeno cuántico por el que una partícula puede saltar una barrera de potencial mayor que su energía cinética).

● Materiales piezoelectricos y electrostrictivos

Desde el siglo XIX se conoce la propiedad del cuarzo, y de otros materiales, de producir electricidad cuando se los deforma, y de deformarse cuando se les aplica electricidad. Ese fenómeno, mencionado en los capítulos 3, 9 y 14, fue útil para hacer fonógrafos de púa, cuyas vibraciones al recorrer el surco del disco, generan una señal eléctrica que se amplifica, y se convierte en sonido. Después, con materiales cerámicos de propiedades más marcadas, se hicieron encendedores que suministran una chispa eléctrica cuando se los golpea, alarmas para relojes, parlantes, audífonos, generadores de ultrasonido para ecógrafos y para limpieza profunda, y osciladores de cristal, que mantienen fija la frecuencia de transmisores, y dan una base de tiempo estable para los relojes electrónicos.

En los materiales piezoelectricos, la inversión de la polaridad de la tensión eléctrica aplicada, se traduce en una inversión del sentido de la deformación, y am-



● Representación cualitativa de la electrostricción, en rojo, y la piezoelectricidad, en azul.

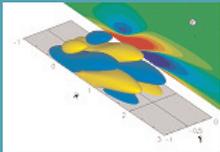
bos efectos, el mecánico y el eléctrico, son aproximadamente proporcionales; eso significa que existe una relación lineal entre la tensión eléctrica y la deformación. El efecto es reversible, o recíproco: la electricidad produce deformación; y la deformación, electricidad.

También es conocida desde hace más de un siglo la *electrostricción*,¹¹ o acortamiento de un objeto cuando se le aplica electricidad. La electrostricción a diferencia de la piezoelectricidad, no es reversible; esto es, el acorta-

¹¹ Antes de la electrostricción se conoció la *magnetostricción*, fenómeno por el cual el hierro, y otros materiales, se acortan cuando se los somete a un campo magnético. *Estricción* significa acortamiento. De la misma raíz latina es la palabra *estricto*: estrecho, ceñido, ajustado.



- Transductores piezoeléctricos para producir ultrasonido, con fines de pulverización, y de lavado profundo.



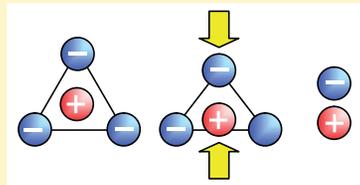
- El *Imperial College*, en Londres, estudia la posibilidad de dotar a los barcos de elementos electroactivos en la parte exterior de los cascos. Detectarían la turbulencia, y actuarían en consecuencia para disminuirla, como lo hacen ciertos animales acuáticos, que se desplazan con un mínimo gasto de energía.



- Muñeco de goma electroactiva, que cambia su expresión facial, construido en el Centro de Materiales Compuestos del Instituto Harbin de Tecnología, en China, como demostración curiosa de las propiedades de los elastómeros que desarrollan.

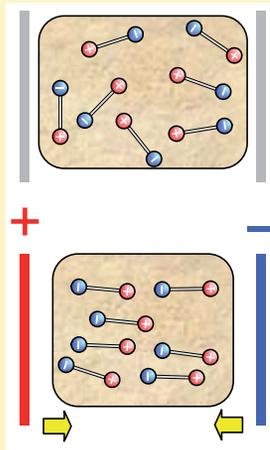
miento o el alargamiento que se induzca por medios mecánicos, no produce electricidad. El acortamiento se produce con cualquiera de las polaridades de la tensión aplicada; y hasta unos 300 V/mm, el acortamiento varía de manera casi cuadrática con la tensión aplicada.

La piezoelectricidad es un fenómeno típico de cristales de determinada clase de simetría,¹² en los que la deformación origina una distribución de cargas eléctricas que dan lugar a dipolos.¹³



- Explicación elemental de la piezoelectricidad. A la izquierda, una celda del cristal sin deformar, con los tres dipolos simétricamente equilibrados. Al medio, deformada; los dipolos se desequilibran. A la derecha, el dipolo equivalente; aparece una tensión eléctrica en el cristal.

Los cristales cúbicos, como los de cloruro de sodio, tienen un centro de simetría entre caras iguales paralelas, y por eso no presentan piezoelectricidad.



La explicación de la electrostricción es semejante a la de la magnetostricción, y se basa en la orientación de los dipolos del material, bajo la acción de un campo exterior. Con los dipolos orientados, aparecen esfuerzos internos de tracción, que acortan el cuerpo, cualquiera sea la polaridad del campo externo al que se lo someta.

La magnitud del efecto es pequeña en los materiales conocidos, pero aun así útil para muchas aplicaciones. En algunos materiales cerámicos de elevada permitividad dieléctrica, empleados en la fabricación de capacitores, un campo eléctrico de 500 volt por milímetro, puede producir una contracción de más de cinco partes por diez mil, y si el material se mantiene fijo de modo que no se pueda contraer, se generan tensiones mecánicas que acumulan una energía potencial elástica de hasta medio joule por cada kilogramo.

• Polímeros¹⁴ electroactivos

Al igual que todos los dieléctricos, especialmente los de elevada permitividad,

¹² De acuerdo con su simetría, los cristales se clasifican en 32 clases, de las cuales hay 21 que no tienen centro de simetría entre caras paralelas e iguales; y todos ellos, menos uno, exhiben piezoelectricidad.

¹³ Un dipolo eléctrico es un conjunto de dos cargas de la misma magnitud, pero de polaridad opuesta, situadas a pequeña distancia una de la otra (los capítulos 7 y 9 mencionan los dipolos magnéticos).

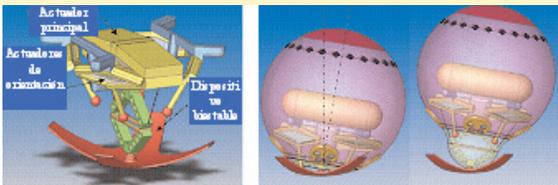
¹⁴ Para la descripción general de los polímeros, véase el capítulo 6.

hay polímeros aislantes que presentan electrostricción, algunos desarrollados especialmente. Los polímeros elásticos; esto es, los elastómeros, tienen la desventaja de ejercer fuerzas mucho menores que las de sus semejantes rígidos, pero en cambio pueden experimentar variaciones de longitud centenares de veces mayores; una elongación ya no de una parte en mil, sino de una parte en diez, o más. La similitud de ese comportamiento con el de los músculos, hace que se los conozca como músculos artificiales.¹⁵ Los EAP (*electroactive polymers*, polímeros electroactivos) también se conocen como DEA (*dielectric elastomer actuators*, actuadores de elastómeros dieléctricos).

Un actuador es un dispositivo que realiza una acción mecánica cuando recibe un estímulo; por ejemplo un relé, o un motor. El término se aplica más específicamente a los aparatos que realizan un movimiento pequeño. Elastómero es un polímero elástico, por ejemplo una goma de silicona. Y dieléctrico significa aislante de la electricidad.

El efecto es reversible, y el estiramiento y acortamiento de un elastómero electroactivo, genera electricidad.

Las aplicaciones de los EAP, DEA o músculos artificiales comenzaron hace poco más de diez años. Entre ellas se encuentran, además de las citadas en la primera página de este capítulo, bombas de circulación de fluidos, relés de media tensión de muy elevada impedancia eléctrica, botines con suelas de goma electroactiva que cargan baterías al caminar con ellos, motores sin eje, robots.



- Robot del tamaño de una pelota, hecho en el Instituto de Tecnología de Massachusetts con un mecanismo biestable de resortes y cuatro actuadores de elastómero electroactivo. La carga de su batería le alcanza para cien

saltos de un metro y medio con la gravedad terrestre, y de nueve metros en la Luna. Puede rodar y saltar sobre terreno escabroso, y se lo concibió para misiones de exploración espacial, en la superficie de planetas y satélites.

● Fuerza de un dieléctrico electroactivo

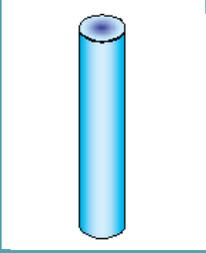
Esa fuerza es igual a la de atracción entre las placas de un capacitor, y está dada por la fórmula de la derecha. La fuerza F , en newton, es igual al producto de la permitividad relativa, sin unidades, por la del vacío, en F/m, por el área, en metros cuadrados,

$$F = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A U^2}{2d^2}$$

¹⁵ De hecho, se han efectuado reparaciones de músculos humanos con esos materiales, pero para actuarlos es necesaria una fuente auxiliar de alimentación; la electricidad de los nervios es insuficiente para excitarlos.



- Entre los materiales electrónicos relativamente nuevos están las fibras ópticas para la transmisión de señales. La figura compara un cable troncal de cobre, con una fibra de vidrio de la misma prestación. Primitivamente se usaron en telefonía, y hoy principalmente en Internet.



- Las fibras ópticas se fabrican con dos clases de vidrio de diferente índice de refracción. La luz tiende a viajar por el de mayor índice, en el medio, y así se mantiene alejada de las paredes, y acompaña a la fibra en sus curvas. Para hacer esos hilos, de menos de una décima de milímetro de espesor, se emplean dos crisoles con ambos productos, que se extruyen en forma de varilla, que cuando está aún blanda, se estira hasta que adquiera el espesor correcto.

por la tensión, en volt, al cuadrado, dividida por dos y por la distancia entre las placas, en metros, elevada al cuadrado. La disposición plegada de un capacitor, como se ve en la página 219, disminuye la distancia entre las placas, y permite obtener grandes fuerzas.

Los geles electroópticos, mencionados en este capítulo, son también electroactivos, pero como se encuentran en estado semilíquido, no generan esfuerzos, a menos que se los encierre en un recipiente muy rígido.

PROPUESTAS DE ESTUDIO

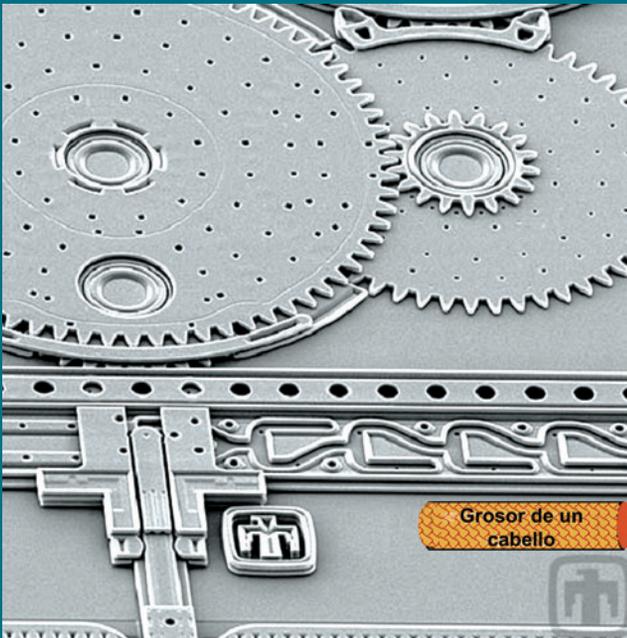
- 18.1.** ¿Cuánto vale la fuerza que ejerce un músculo artificial de un centímetro cuadrado de sección, hecho con placas conductoras separadas por un polímero de permitividad relativa igual a 20.000, de espesor 0,1 mm, al que se le aplican 100 V?
- 18.2.** Si ese polímero tiene un módulo de elasticidad¹⁶ igual a dos megapascuales, y se lo pliega en forma de acordeón de 500 pisos, como se indica en la página 219, ¿en cuánto disminuye su longitud?
- 18.3.** Para usar en lugares de muy escasa iluminación, ¿qué es preferible, una pantalla de lcd, o de led? Den, por favor, las razones de la elección.
- 18.4.** ¿Dónde se podría obtener, para experimentar, un material de marcados efectos piezoeléctricos?

• Otras fuentes de estudio e información

- En este sitio hay una explicación clara del efecto de electrostricción.
<http://www.uclm.es/profesorado/maarranz/Documentos/alumnosmateriales0506/PIE-ZOELECTRICIDAD%20Y%20ELECTROSTRICCI%C3%93N.doc>
- En este otro, hay explicaciones detalladas sobre cristales líquidos.
<http://rabfis15.uco.es/cristalesliquidos/todointro.htm>

¹⁶ El módulo de elasticidad de un material es el cociente entre la presión a la que se lo somete, y la disminución relativa de su longitud. Se puede pensar, de manera más intuitiva, aunque menos exacta, en la presión que reduce a la mitad el tamaño del objeto.

Sistemas microelectromecánicos (MEMS)¹



- Engranajes microscópicos de silicón, fabricados por los Laboratorios Nacionales Sandia, un organismo militar (véase el símbolo del águila) en Albuquerque, Estados Unidos. El mayor mide 0,4 mm de diámetro, y cada diente, 20 micrones, menos del grosor de un cabello. Se los fabrica con técnicas ópticas, de rayos X, y químicas, semejantes a las empleadas en la elaboración de circuitos integrados. Los pequeños hoyos provienen de golpes de planchado, para que las ruedas permanezcan planas, y no se desengranen.



- Abajo, un mecanismo elaborado con un material más reciente, la *silicona planarizada*, cuya estructura molecular no requiere planchado. Cada vez que una de las piezas alargadas recibe una señal eléctrica, se adelanta por atracción electrostática, y cuando la tensión desaparece, vuelve a su sitio, por elasticidad. Cada pulso hace avanzar un diente, en una bomba que usa la industria farmacéutica para dosificar volúmenes microscópicos de líquidos. Las imágenes se obtuvieron con la técnica de barrido electrónico, porque la longitud de onda de la luz visible es demasiado grande, en comparación con los detalles de las piezas, los que saldrían borrosos en una fotografía óptica. Los mecanismos acompañan la tendencia a la miniaturización ya conocida en los componentes y circuitos electrónicos, y tienen cada vez más aplicaciones útiles y pacíficas; en inyectores de tinta de impresoras, medidores de presión arterial, detectores de vibraciones, y pantallas con piezas móviles que hacen girar diminutos espejos muchas veces por segundo, desvían la luz y forman las imágenes.

¹ Del inglés, *micro electromechanical systems*.

Sistemas microelectromecánicos (MEMS)

Prefijo	Símbolo	Factor	Mnemo
yocto	y	10^{-24}	ocho
zepto	z	10^{-21}	siete
atto	a	10^{-18}	(¹)
femto	f	10^{-15}	(¹)
pico	p	10^{-12}	sobza
nano	n	10^{-9}	enano
micro	μ	10^{-6}	pequeño
milli	m	0,001	mil
centi	c	0,01	cien
deci	d	0,1	diez
—	—	1	—
deca	d	10	diez
hecto	h	100	cien
kilo	k	1000	mil
mega	M	10^6	grande
giga	G	10^9	gigante
tera	T	10^{12}	cuatro
peta	P	10^{15}	cinco
exa	E	10^{18}	seis
zetta	Z	10^{21}	siete
yotta	Y	10^{24}	ocho

• La escala pequeña

En el primer capítulo mencionamos los prefijos que indican los múltiplos y submúltiplos de las unidades físicas, entre ellos *micro* y *nano*. Aunque en griego *micro* es pequeño, esa palabra significa, como prefijo, la millonésima parte de la unidad. *Nano*, por otra parte, es enano en latín; pero, en el sentido técnico, es la milmillonésima parte de la unidad.

Cuando en el ambiente tecnológico se utiliza la palabra micro, generalmente, se quiere significar algo pequeño,² sin que importe exactamente su tamaño, y ni siquiera su orden de magnitud. En cambio, cuando se dice *nanotecnología* se hace referencia, específicamente, a tamaños del orden de un nanómetro, o la millonésima parte de un milímetro. Esa longitud es quinientas veces más pequeña que una onda de luz; entonces, no podemos ver, directamente y con luz visible, objetos nanotecnológicos, cuyo tamaño es el de pocas decenas de átomos.

Lo pequeño funciona de modo diferente a como lo hace lo más grande, aunque en un caso y el otro valgan las mismas leyes físicas. Entre los muchos fenómenos que ocurren, hay algunos que se manifiestan en diversa medida, de acuerdo con el tamaño de los objetos.

Por ejemplo, un incendio en un bosque o en una mina de carbón puede durar meses encendido; un brasero, horas; en cambio un ascua se apaga en menos de un segundo.³ Un flan pequeño, cuando se lo desmolda, se mantiene erguido y firme sobre su base, mientras que uno grande se aplasta y esparce en el plato por su propio peso. Una paloma puede desprenderse de sus excrementos mientras vuela, no así una mosca, que los adhiere a un objeto fijo. Las bacterias magnetotácticas mencionadas en el capítulo 7 distinguen el arriba del abajo mediante un órgano magnético; ya que en su pequeño



• La tensión superficial sólo sostiene cuerpos pequeños sobre el agua, porque tienen mucha área por cada miligramo de masa.



• Contacto de oro de 50 nanómetros de diámetro, cubierto con 6 attogramos de azufre. (Imagen procesada por Craig-head Group, Cornell University).

² Por ejemplo, un microinterruptor, o *micro-switch*, es un interruptor muy pequeño, pero no tanto como un micrón. Reciben ese nombre interruptores de un centímetro de tamaño, o más, y cuyos contactos, cuando abren y cierran un circuito, recorren una distancia del orden de un milímetro.

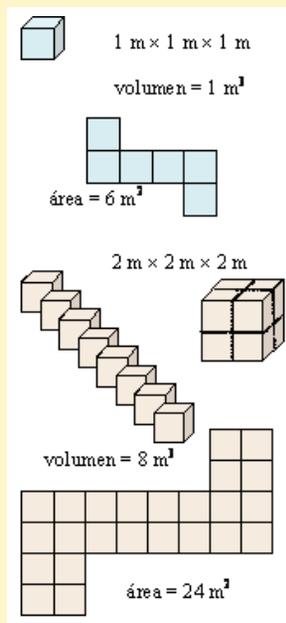
³ Por eso no hay animales homeotermos, también llamados de sangre caliente, de menos de un centímetro; porque para mantener su temperatura quemarían el alimento en menos tiempo del necesario para conseguirlo, y aun ingerirlo.

tamaño de un micrón, no funcionaría un órgano basado en la gravedad de un líquido, como nuestro oído medio, que nos provee esa orientación a los animales mayores.

Entonces, la micromecánica y la nanomecánica van más allá de la disminución del tamaño de mecanismos mayores de eficacia conocida. Si sólo se redujese la escala, sin ningún otro cambio, aparecería efectos (muchos de ellos inconvenientes) que no se observan en la escala grande, y a veces ni se sospechan, como la adherencia electrostática entre piezas, la dificultad para mantener diferencias de temperatura entre dos puntos, la extraordinaria viscosidad de los líquidos (que, en gran cantidad, parecen muy fluidos), el efecto del sonido en los mecanismos de engranajes pequeños, la adherencia del polvo e impurezas, y la condensación de la humedad, cuyas pequeñas gotas pueden frenar por completo una rueda, o una palanca.

En el diseño de MEMS se tienen presentes esos efectos de escala, y se consideran sin necesidad de toparse con ellos por sorpresa, como quizás ocurrió en los comienzos de esa tecnología.

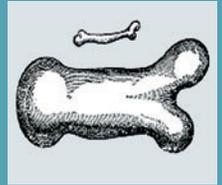
El razonamiento básico se funda en que, cuando un cuerpo tiene un tamaño doble que otro, su área es cuádruple; y su volumen, óctuple.



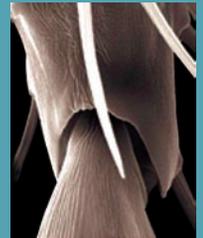
● Arriba, un cubo de un metro de lado. Su volumen es de un metro cúbico, y su área, de seis metros cuadrados. Si tuviera la densidad del agua pesaría mil kg, y apoyado sobre su cara inferior ejercería sobre el suelo una presión de mil kg por metro cuadrado.

● Abajo, un cubo de dos metros de lado. Su volumen es de ocho metros cúbicos, y su área, de veinticuatro metros cuadrados. Si su densidad fuera la misma que la del cubo anterior, pesaría ocho mil kg, y apoyado sobre su cara inferior, cuya área es de cuatro metros cuadrados, ejercería sobre el piso una presión de dos mil kg por metro cuadrado, el doble que antes. Así entonces, sería bien posible que un cubo pequeño se sostenga, mientras que uno grande, y del mismo material, se desmoronara. Los cuerpos pequeños son más robustos, en proporción, que los grandes.

Las piezas muy pequeñas, de prototipos ensayados en una escala mucho mayor que la de servicio, presentan muy disminuidas las propiedades de volumen, masa y peso, en comparación con las de área, y con las de longitud. Por ejemplo, si se confiaba en el peso de una parte, para que vuelva a su posición de reposo cuando



● El físico italiano Galileo Galilei fue el primero en notar las diferencias de comportamiento de los objetos de diferente tamaño. El dibujo, trazado por el investigador italiano en 1638, representa un hueso de ratón, y el homólogo de un caballo, mucho más robusto. Si éste fuera una mera ampliación, el hueso se rompería, porque el caballo es mil veces más pesado que el ratón, pero el área transversal de su hueso sería apenas cien veces mayor; y el hueso estaría, por eso, diez veces más esforzado. Los MEMS, por su pequeñez, son muy robustos.



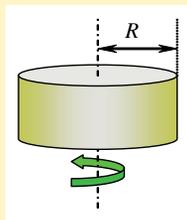
● Detalle de una pata de mosca. Los pelos eliminan cargas eléctricas que capturarían polvo. Aun así, el insecto se debe frotar patas, alas y cabeza, para quitarse laboriosamente las partículas, tarea innecesaria para los animales grandes. (*Nature*, diciembre de 2007.)

se la suelta, se hallará, en la réplica pequeña, que ese peso es insignificante, y que no alcanza para despegar la pieza de la que la sostenía, a la cual quedará adherida electrostáticamente.⁴ Es que la carga eléctrica responde a la superficie, mientras que el peso depende del volumen.

Así como la pequeñez trae esos inconvenientes, tiene también ventajas, entre ellas la robustez. La velocidad de giro de un motor de automóvil, o de lavarropas, es del orden de las mil revoluciones por minuto. Una amoladora de disco, alcanza las tres mil. Una mayor velocidad de giro haría que esos motores se despedacen; o que, sin eso, vibren tanto, que se desgasten en poco tiempo. Un torno de dentista, más pequeño, alcanza fácilmente las diez mil revoluciones por minuto. Y un motor mems, si es suficientemente pequeño, puede girar a medio millón de revoluciones por minuto.

Veamos en detalle físico y cuantitativo ese efecto, a través de un ejemplo simplificado, resuelto mediante una técnica aproximada de estimación, basada en el *análisis dimensional*.⁵

Imaginemos una pieza giratoria de radio R (en metros), una densidad ρ (en kilogramos por metro cúbico), hecha con un material que resiste una tensión mecánica σ (en pascales, o N/m), y que gira a una frecuencia n (en revoluciones por minuto). Supongamos, además, que esa máquina se diseñó al límite de su resistencia mecánica, y que si girase a mayor frecuencia que n , se rompería. ¿Qué relación existe entre las magnitudes mencionadas?



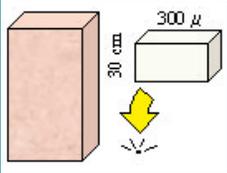
El análisis dimensional ofrece la siguiente rutina de resolución. Partimos de la hipótesis de que n es proporcional al producto de las otras magnitudes, cada una de ellas elevada a una potencia incógnita, designada con una de las letras alfa, beta y gamma. (Esa potencia podrá ser positiva, negativa, nula, entera o fraccionaria.)

$$n = R^\alpha \rho^\beta \sigma^\gamma \quad [1]$$

La unidad revoluciones por minuto se escribe 1/min. Reducimos las unidades 1/min, m, kg/m³ y N/m², a longitud (L), masa (M) y tiempo (T). Tenemos en

⁴ En algunas operaciones quirúrgicas para implantar huesecillos de plástico en el oído medio, en reemplazo de los originales dañados por una infección, los cirujanos deben usar herramientas especiales, para poder soltar los diminutos repuestos sin que se queden pegados a las pinzas.

⁵ Ese método busca una relación matemática entre las magnitudes físicas que intervienen en un problema, de modo que se satisfaga la correspondencia de unidades. Por ejemplo, si suponemos que el período de un péndulo depende de la longitud L del hilo, en metros, y de la aceleración g de la gravedad, en metros por segundo al cuadrado, entonces la relación tiene que ser parecida a $T = k\sqrt{L/g}$, dado que otra diferente haría que no se correspondan las unidades. La fórmula verdadera, hallada a partir de consideraciones físicas, es $T = 2\pi\sqrt{L/g}$. La constante k no la da este método, pero igualmente es útil, si lo que interesa es evaluar un orden de magnitud, y no una cantidad exacta.



• Seguramente oímos alguna vez cómo suena un ladrillo bien cocido, cuando se lo golpea con una cuchara de albañil. El ladrillo *canta* una nota de frecuencia cercana a 1 kHz. Con razonamientos de análisis dimensional, se puede concluir que, si el ladrillo midiera mil veces menos, vibraría a 1 MHz. Precisamente, se usan cristales de cuarzo piezoeléctricos de ese tamaño, y más pequeños, como osciladores electromecánicos de gran estabilidad, para la base de tiempo de los relojes de cuarzo, y para estabilizar la frecuencia de transmisores de radio y TV (el capítulo anterior da más detalles sobre el comportamiento del cuarzo, y otros materiales piezoeléctricos). Por su diminuto tamaño, esos cristales piezoeléctricos se consideran MEMS: microsistemas electromecánicos.

cuenta que 1 N (un newton) equivale a $1 \text{ kg}\cdot\text{m}/\text{s}^2$, por lo que N/m^2 es lo mismo que $(\text{kg}\cdot\text{m}/\text{s}^2)/\text{m}^2$; o, si simplificamos, $\text{kg}/(\text{s}^2\cdot\text{m})$.

$$[n] = T^{-1} \quad [R] = L \quad [\rho] = M\cdot L^{-3} \quad [\sigma] = M\cdot T^{-2}\cdot L^{-1}$$

Los corchetes rectangulares indican las dimensiones. Se lee: las dimensiones de la frecuencia son de inversa de tiempo, o tiempo a la menos uno; las dimensiones del radio son de longitud; las dimensiones de la densidad son de masa por longitud a la menos tres; y las dimensiones de la tensión mecánica resistida son de masa por tiempo a la menos dos, por longitud a la menos uno.

Escribimos nuevamente la ecuación [1] para las dimensiones, y resulta:

$$T^{-1} = L^\alpha M^\beta L^{-3\beta} M^\gamma T^{2\gamma} L^{-\gamma}$$

Para que se cumpla esa igualdad, las potencias conjuntas de cada dimensión (letras M, L y T) deben sumar lo mismo de un lado y otro de la igualdad:

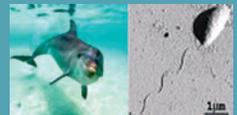
$$0 = \beta + \gamma \quad 0 = \alpha - 3\beta - \gamma \quad -1 = -2\gamma$$

De esas tres ecuaciones deducimos que $\alpha = -1$ $\beta = -1/2$, y $\gamma = 1/2$.

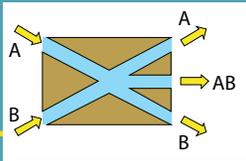
La potencia $1/2$ equivale a la raíz cuadrada; y la potencia $-1/2$, a la inversa de la raíz cuadrada. La fórmula que estamos buscando es cercana, entonces, a la siguiente:

$$n = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{\sigma}{\rho}}$$

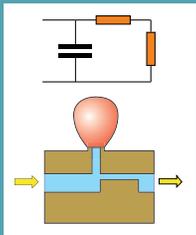
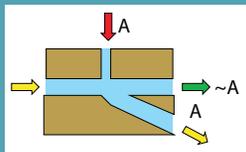
La fórmula verdadera podrá no tener esa apariencia exacta. Faltará, quizás, un factor sin unidades, que dependa de la forma de la pieza giratoria. Pero lo que sí podemos concluir, es que para una dada densidad (la misma, aproximadamente, para piezas de tamaño ordinario que para las micromecánicas), y para una cierta resistencia a los esfuerzos mecánicos (también la misma, o semejante, en ambos casos), la velocidad de rotación que puede alcanzar una pieza sin romperse, es inversamente proporcional a su radio. Cuanta más pequeña sea la pieza, más vueltas podrá dar por minuto sin que se deshaga. Si un motor de coche mide medio metro de diámetro, y gira a dos mil revoluciones por minuto, un motor diminuto de medio milímetro de diámetro podría girar, entonces, a dos millones de revoluciones por minuto; y en verdad lo hace, a una velocidad no muy diferente de ésta, sin sufrir daños.



- Por su tamaño, un delfín puede avanzar por inercia varios cuerpos sin nadar. Pero una bacteria se detiene casi al instante; y además, presa de la tensión superficial, no puede saltar, como sí lo hace el mamífero.



- Compuerta AND. Cuando ingresa líquido por las dos entradas A y B, los chorros interfieren, y salen juntos por AB. En cambio, si falta alguno de ellos, o los dos, no hay salida central. En color oscuro, el material sólido del laberinto; y en claro, el fluido que circula. Abajo, compuerta inversora. Cuando aparece la señal A (en rojo), desaparece en $\sim A$ (verde).

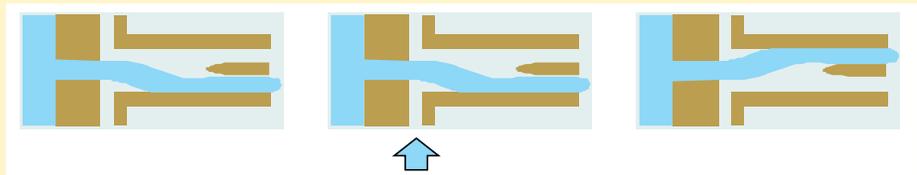


- Equivalente fluido de un filtro eléctrico. El capacitor y el resistor amortiguan las variaciones bruscas de la tensión de entrada. El globo rojo, que representa una cámara elástica, y el canal estrecho que le sigue, amortiguan las variaciones bruscas de la presión de entrada del fluido. Los componentes fluidicos pueden imitar muchos circuitos electrónicos.

● Fleurics (unidades fluidicas)

Los fluidos son los líquidos y los gases, y su estudio se denomina hidráulica. Pero cuando esta rama de la física se aplica a sistemas de control de complejidad lógica semejante a la de los circuitos electrónicos, se la denomina *fluidica*.⁶ Dado que la fluidica es una parte de la hidráulica, y ésta lo es de la mecánica, las unidades fluidicas no son MEMS, ya que su funcionamiento puede excluir la electricidad. Sin embargo, las mencionamos, igualmente, en este capítulo, por las semejanzas de orígenes y de aplicaciones entre la microfluidica, la microelectrónica y los microsistemas electromecánicos.

Los componentes de la fluidica son las unidades fluidicas, conocidas también como *fleurics*. Estos dispositivos, mencionados en el capítulo 17, cumplen muchas de las funciones que tradicionalmente efectúan los componentes y circuitos electrónicos. Sirven de amplificadores, osciladores y compuertas lógicas, y en algunos casos operan con ventajas, ya que no sufren interferencias electromagnéticas.⁷ Sus aplicaciones crecieron como consecuencia de la posibilidad de fabricar componentes de tamaño microscópico. Los fleurics pueden funcionar con agua, aceite o gases, con suspensiones de sólidos en líquidos, o con burbujas de gas en líquido, las que facilitan ciertas funciones digitales.



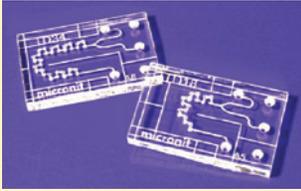
- Flip-flop, o multivibrador biestable, construido con un elemento fluidico. El líquido entra por la izquierda, y tiende a adherirse a una pared del tubo de salida, dividido por un tabique. Cuando se aplica un pulso lateral de control, con líquido que se inyecta por una de las dos compuertas laterales, el filete se despegue de esa pared, y se adhiere a la opuesta, hasta que se le aplique un pulso líquido por la otra compuerta de control. Es posible, con una forma asimétrica apropiada del laberinto, hacer que el multivibrador sea monoestable; esto es, que el filete de circulación regrese a la pared primitiva cuando cesa el chorro de control. Si las aberturas de control son más de una, el dispositivo actúa como una compuerta OR.

Los circuitos fluidicos se suelen construir como los circuitos impresos de la electrónica, pero con un relieve mayor, de modo que, al tapanlo herméticamente

⁶ Podríamos decir que la relación que existe entre la electrónica y la electricidad, es semejante a la que hay entre la hidráulica y la fluidica.

⁷ Los fleurics se desarrollaron, al inicio, con fines balísticos. Como el mecanismo carece de componentes electrónicos, es insensible a las interferencias electromagnéticas que se le puedan enviar como defensa. En 1965, cuando ya casi no había secretos fluidicos para ninguna potencia militar, ese conocimiento se brindó al público.

con una lámina plana, quede un laberinto de espacio suficiente, que vincula las diversas unidades por las que circula el fluido.



● Variante de circuito fluidoico, usada para mezclar dos líquidos por *advección* o arrastre. Los líquidos se inyectan en los canales de entrada, y se mezclan por las turbulencias que se generan en cada codo del laberinto (foto de Micronit Microfluidics).

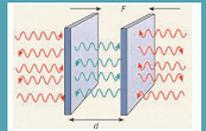
● El efecto Casimir

Es curioso lo que ocurre con muchas ideas científicas. Al comienzo, son sólo especulaciones sin mucho fundamento, que muchos critican,⁸ y hasta rechazan, con razones que en el momento parecen sobradas. Pasado un tiempo, esas ideas se aceptan, o, al menos, se estudian con curiosidad. Después, algunas se corroboran en complejos y delicados experimentos; pero el conocimiento resultante sólo tiene interés teórico. Pasan algunos años, y a esa idea se le saca provecho; o, sin eso, se perciben sus manifestaciones prácticas en alguna rama de la industria. Y, por fin, se fabrican centenares de miles de millones de componentes, que forman parte de artefactos domésticos e industriales, basados en un principio físico que, pocas décadas antes, era sólo una idea atrevida.

Eso pasó con los satélites, la relatividad del espacio y el tiempo, la energía nuclear, el efecto túnel cuántico (mencionado en el capítulo 2), y con muchas otras ideas, entre ellas la llamada *fuerza del vacío*,⁹ *fuerza del punto cero*, o efecto Casimir, en honor de Hendrik Casimir (1909–2000), quien descubrió, en 1948, que aun en un vacío teóricamente perfecto, sin materia ni radiación, y en el cero absoluto de temperatura, las llamadas *fluctuaciones cuánticas* de la radiación (que no puede ser absolutamente nula, y adopta por momentos valores diferentes de cero) generan una fuerza de atracción entre placas conductoras planas y paralelas, y de repulsión en ciertos casos de curvatura. Esa fuerza es muy pequeña, y no se percibe en experimentos con cuerpos de tamaño visible; pero se empezó a notar cuando se fabricaron objetos de pocos nanómetros. Al principio eso era un inconveniente que dificultaba el movimiento de las piezas; pero después, resultó una nueva variable de control, de efectos aprovechables.

⁸ Albert Einstein, uno de los más grandes científicos de la historia, y cuyos conocimientos y seriedad de argumentación fueron siempre indiscutibles, negaba, al principio, la física cuántica, a pesar de que años después le otorgaron el premio Nobel justamente por la explicación cuántica del efecto fotoeléctrico (en el capítulo 11 se comenta el caso).

⁹ Hay quienes la llaman *fuerza de la nada*, para causar perplejidad, como si hiciera falta alguna razón adicional para quedar perplejos ante ese fenómeno, ajeno a la percepción ordinaria y cotidiana.



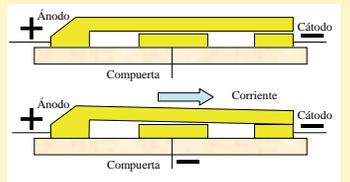
$$F_c = \pi \hbar c \frac{A}{480 d^4}$$

- Efecto Casimir. La radiación encerrada entre las placas conductoras, y, por tanto, reflectantes, genera interferencias que alteran el balance con la radiación externa (que no interfiere del igual manera). Con eso, predomina la presión ejercida por la radiación exterior. La fuerza es inversamente proporcional a la cuarta potencia de la separación. A una distancia entre placas de cien diámetros atómicos, la presión de Casimir es de una atmósfera.

FC: fuerza de Casimir, en N; **c:** velocidad de la luz, 299792458 m/s; **h,** constante de Planck, $6,626068 \times 10^{-34}$ m².kg/s; **π,** 3,14159265; **A,** área, en m²; **d,** separación, en m.

● Microactuadores y relés electrostáticos

Los relés de lengüeta, o *reed relays*, mencionados en el capítulo 7, admiten variantes microscópicas de tiempos de respuesta muy pequeños, y comparables con los de los transistores. Además de establecer o de abrir un contacto, pueden realizar pequeños movimientos en mecanismos microscópicos; en ese caso se llaman actuadores.

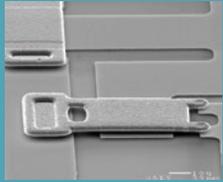


- **Relé electrostático.** Cuando se polariza la compuerta, atrae la lámina flexible del ánodo, que establece contacto con el cátodo.

Los actuadores electrostáticos son, especialmente, efectivos en los tamaños pequeños. No consumen corriente por la compuerta, y en eso se asemejan a los transistores de efecto de campo. Si la lengüeta de un relé de este tipo es, suficientemente, larga, se puede sujetar por los dos extremos, y también se flexiona al polarizar la compuerta; eso torna el relé menos sensible a las vibraciones y al sonido. Su funcionamiento es reversible: el movimiento de su lengüeta varía la capacitancia, y eso induce una señal en la compuerta, con lo que el actuador sirve, además, de *acelerómetro* capacitivo, o instrumento para medir aceleraciones.

● Nanotubos, nanoláminas y nanoesferas

Se llaman *nanotubos* los cilindros de diámetro prácticamente atómico. Tienen variadas aplicaciones nanotecnológicas, y tuvieron su origen en fibras de grosor mucho mayor, y de propósitos modestos, como el de reforzar estructuras de plástico. El vidrio, por ejemplo, es un material cuya resistencia a la rotura a la tracción es pequeña; no mucho mayor que la de los plásticos. Pero cuando se lo hila finamente, adquiere una resistencia a los esfuerzos muy elevada, que no tiene una barra maciza de la misma sección transversal total. El clásico concepto de resistencia a la tracción, en newton por metro cuadrado, o kilogramos por centímetro cuadrado, no tiene aplicación en el caso de los hilados, porque la fuerza resistente parece no ser proporcional a la sección, en centímetros cuadrados, como en los objetos más gruesos, sino al perímetro, en centímetros lineales. En el conjunto de las fibras de vidrio que refuerzan el plástico de una caña de pescar, un aislador o el eje de un motor, la cantidad total de perímetro de las fibras hiladas es muy grande, y lo mismo ocurre con la fuerza que puede resistir el haz. Lo mismo se



- **Microrelé electrostático de lengüeta móvil,** de $10\ \mu$ de ancho, 2 de espesor y 100 de largo, separada $2\ \mu$, desarrollado en la Northeastern University, Boston, Estados Unidos. Resistencia de contacto, $20\ \Omega$; tensión, 100 V; corriente, 1 mA; tiempo de actuación, $1\ \mu$ s; vida, 10 millones de operaciones.

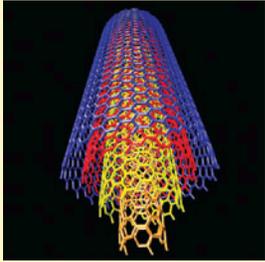


- **Garrocha de resina epóxica reforzada con fibras de vidrio** de un grosor de cien nanómetros. El vidrio ocupa aproximadamente el 70 % de la masa, y la mitad de su volumen.

experimentó con fibras de carbono, que resultaron aun más resistentes que las de vidrio, ambas de grosor cercano a un micrón, diez veces más fino que el de una tela de araña.

Descubierto ese hecho, se fabricaron fibras cada vez más delgadas, para usarlas como refuerzo, hasta tropezar con el límite atómico. Es imposible hacer una fibra de grosor menor que el de un átomo, y, de hecho, debe tener un diámetro de varios átomos, para que éstos se puedan acomodar en una estructura estable.

En el caso del carbono, esa estructura es una malla hexagonal cerrada en forma de tubo, que recibió el nombre de nanotubo.



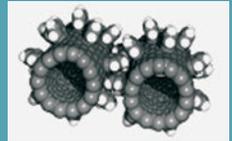
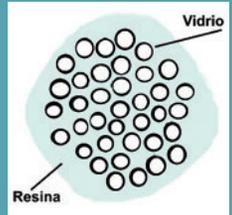
● **Representación artística de varios nanotubos de carbono. Cada átomo de ese elemento ocupa un nodo de la red. Hay tubos de una sola capa, como éstos, y otros de estructura más compleja, con varias capas vinculadas entre sí mediante enlaces atómicos. Esta figura no representa la torsión que pueden tener los nanotubos, hacia la izquierda o hacia la derecha.**

Aunque los nanotubos se conocen, en teoría, desde 1950, la evidencia de su existencia, y su fabricación, datan de 1991 (en 1994 se logró una estructura plana, llamada *grafeno*, por su semejanza con el grafito). Sus propiedades son nuevas y extrañas, y dan lugar a variadas aplicaciones. Forman parte de MEMS, como piezas móviles, y como conductores eléctricos. Se estudia la posibilidad de almacenar átomos de hidrógeno en esos tubos, sin necesidad de mantenerlo a presión, lo que sería de gran utilidad en los automóviles que usen ese elemento gaseoso como combustible. Se aprovecharía su torsión estructural para fabricar nanomotores. Resisten, además grandes fuerzas.¹⁰ Y si se los pudiera hacer muy largos (actualmente no llegan a tener ni un micrón de longitud), se podrían usar como cables capaces de conducir muchos amperes por milímetro cuadrado.

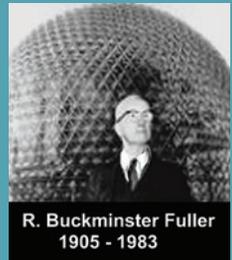
Para fabricar nanotubos se vaporiza carbono (con arcos eléctricos, láseres, u otros medios), y se deja que su vapor se condense y cristalice sobre superficies frías. Los nanotubos se forman naturalmente al ordenarse los átomos, y su grosor y longitud dependen de las temperaturas de los vapores y de las paredes del recipiente, y de otros parámetros del proceso.

Con técnicas similares, Jun Ni y otros investigadores construyeron, en 2009,

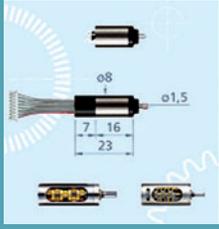
¹⁰En 1895, mucho antes de los satélites, el científico ruso Konstantín Tsiolkovsky, mientras admiraba la hoy famosa torre diseñada por Alexandre Gustave Eiffel, y comentaba con él su diseño, concibió la idea de hacer una construcción de más de cien mil kilómetros de altura, que se mantendría erguida y tirante gracias a la rotación terrestre, para usarla como escalera para poner cargas en órbita, con gran ahorro de energía en comparación con los cohetes. El material necesario para erguir una antena o torre semejante, de grosor y densidad uniforme, debería resistir decenas de miles de kilogramos por centímetro cuadrado. Pues bien, los nanotubos de carbono satisfacen, hoy, esa exigencia.



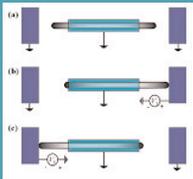
● **Nanoengranajes atómicos de fullereno. (Imagen de la NASA). El fullereno, como el grafito y el diamante, resulta de una de las formas en que se pueden unir y ordenar los átomos de carbono. Su nombre rinde homenaje a Richard Buckminster Fuller, arquitecto creador de la cúpula geodésica, o geoda.**



R. Buckminster Fuller
1905 - 1983



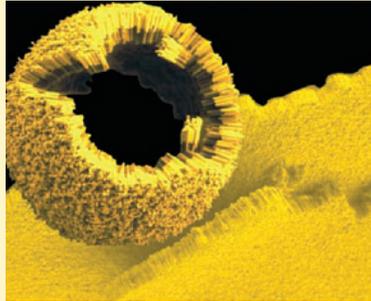
- Micromotor de la serie 0816, de ocho milímetros de diámetro, fabricado por *MicroMo Electronics*. Alcanza una velocidad de 17.000 rpm, tiene un par de arranque de 0,41 mN.m, y desarrolla una potencia mecánica de 0,18 W. Funciona, como muchos otros motores eléctricos, con la fuerza que se ejercen imanes y bobinas. Los que la industria llama *micromotores* están muy lejos de tener un tamaño de un micrón.



- Proyecto de memoria para computadoras, basado en un mecanismo de nanotubos con movimiento telescopícico, que funciona como un relé conmutador de tres posiciones, con un tiempo de respuesta de 10^{-11} s. El aparato, que en estado de reposo no consume energía, lo desarrolló Tao Jiang, en la Universidad de California.

nanotubos de boro, y hojas de espesor atómico de ese elemento. La posibilidad la habían predicho un año antes, con la ayuda de modelos de computadora. Esos materiales tendrían aplicación electrónica en la fabricación de transistores y compuertas lógicas de muy pequeño tamaño.

Siempre con el procedimiento de condensar vapores sobre superficies más frías (el mismo que se usa a veces en la fabricación de transistores, microprocesadores y circuitos integrados), se obtuvieron láminas de carbono, de silicio, y de otros elementos, de apenas uno o dos átomos de espesor.



- Esfera de oro y polímero, de un nanómetro de diámetro (su color amarillo es puramente simbólico, porque la imagen se obtuvo por barrido electrónico, sin luz visible). La técnica constructiva, inspirada en la formación de la membrana de una célula viva, la desarrolló el grupo de investigación que dirige Chad Mirkin en la *Northwestern University*, e incluye la unión de pequeños cuerpos de oro, con polímeros. Los conjuntos tienden a unirse de manera ordenada, en láminas curvas y esferas.

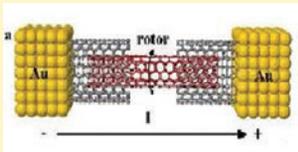
Las técnicas de fabricación de nanotubos, nanoesferas y nanosuperficies, en las que parte del trabajo se hace solo y de modo casi espontáneo, como resultado de las fuerzas de interacción entre las partes, recuerda la manera en la que, en los seres vivos, la materia inorgánica se organiza en moléculas orgánicas, como los aminoácidos y las proteínas, para formar la pared de una célula, u otras estructuras de complejidad mayor.¹¹

En 2007, el científico coreano Ji-Hoon Lee, y otros miembros del Departamento de Materiales del Instituto de Ciencias Gwangju, en la república de Corea, reportaron que las bacterias *Shewanella* sintetizan nanotubos de sulfuro de arsénico, de 20 a 100 nanómetros de diámetro, que poseen propiedades fotoconductoras; esto es, conducen la electricidad cuando la luz incide sobre ellos. Se abrió, con esa observación, la posibilidad de fabricar nanotubos por medios biológicos, en una técnica que combina la nanotecnología con la biotecnología.

¹¹El ingeniero Eric Drexler, cuando estudiaba la posibilidad de sembrar nanobots (robots nanométricos) para degradar contaminantes químicos del suelo y el agua, sugirió, en 1986, una aventurada y fantástica hipótesis que llamó la *melaza gris (grey goo)*. Según esa idea, en algún laboratorio se podrían fabricar nanobots capaces de replicarse a sí mismos, que luego escaparían por accidente, y se reproducirían de manera descontrolada, a partir de la materia del medio ambiente. Muchos juzgan descabellada esa especulación, a pesar de que la aparición de la vida en nuestro planeta la muestra como teóricamente factible, y de que ése es justamente el comportamiento de algunos virus, los cuales se pueden manipular genéticamente con técnicas que, en lo sustancial, se asemejan a los procedimientos de construcción propios de la nanotecnología. En medios científicos serios, que incluyen al propio Drexler, hoy se descarta esa catastrófica posibilidad. La melaza gris no podría competir con la vida, que está aprendiendo a sobrevivir desde hace tres mil millones de años.

● Nanomotores

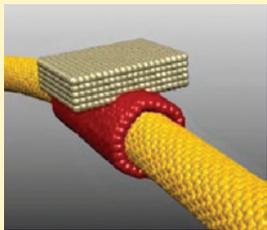
Las máquinas rotativas de tamaño nanométrico son muy diferentes de los motores eléctricos, o de explosión, que conocemos en el tamaño habitual, o pequeño, pero visible. Y también difieren sustancialmente de los *micromotores*, nombre que reciben los motores cuyo tamaño es del orden de un centímetro, o pocos milímetros. Los nanomotores, de tamaño del orden del nanómetro, son verdaderas moléculas móviles, de estructura especialmente diseñada y construida, y están formados por pocos miles de átomos. Algunos ya existen realmente; y muchos otros son sólo ideas, en la fase inicial de proyecto y experimentación.



- **Diseño de nanomotor propuesto por Colin Lambert. Un nanotubo de carbono de un nm de diámetro y diez de longitud, gira dentro de otros tubos de mayor diámetro, que le sirven de cojinetes, sujetos a electrodos de oro.**

En este tipo de construcciones, las distancias son tan pequeñas, que los electrones pueden saltar de un sitio a otro, aunque los objetos no se toquen.¹² Se cree que el pasaje de una corriente eléctrica entre los electrodos, inducirá un giro, por la estructura en espiral que se le daría al nanotubo central.

Otros diseños permiten un desplazamiento lineal, en vez de rotativo. Si se ajusta un nanotubo corto de carbono alrededor de otro más largo, el de afuera se desplaza hacia el extremo de menor temperatura, donde las vibraciones de los átomos son de menor amplitud, y transmiten, por eso, un impulso menor.



- **Motor de desplazamiento lineal, ideado en el Instituto de Nanotecnología y Diseño Molecular, Cataluña, España.**

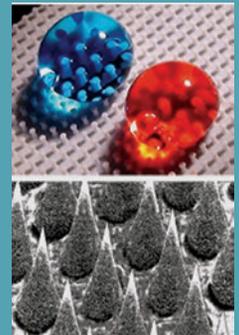
Ese motor lineal es útil como herramienta de exploración en microscopios de fuerza atómica y de efecto túnel,¹³ gracias a que con un control adecuado de las temperaturas, se pueden controlar desplazamientos de menor orden que el tamaño de un átomo.

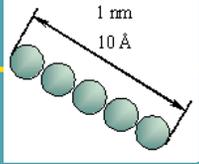
¹²Lo que llamamos *tocar* está lejos de nuestra idea intuitiva de compartir un punto geométrico. Lejos de eso, el más fuerte puñetazo dado sobre una mesa, mantiene una considerable distancia entre la madera y la mano, equivalente a varios radios atómicos. La fuerza que se ejercen ambos cuerpos en ese caso, es la de repulsión eléctrica entre los electrones de los átomos que se acercan (quizás en eso se base la excusa *¡Ni lo toqué!* esgrimida en algunos accidentes de tránsito). En distancias nanométricas, el concepto de estar o no en contacto se reemplaza por el más amplio de la comparación de las fuerzas de interacción entre átomos cercanos.

¹³El principio de funcionamiento del microscopio de efecto túnel se trató en el capítulo segundo. El de fuerza atómica tiene una punta que se acerca mucho a los átomos de la superficie de un material, de modo que éstos la atraen mientras se desplaza paralelamente a la superficie. La fuerza se mide por la flexión del fino soporte de la aguja.



- **Nanorepelentes.** Inspirados en la estructura microscópica de las hojas de taco de reina (*Tropaeolum majus*), que no se mojan, en varios laboratorios desarrollaron materiales y cubrimientos hidrófobos, que imitan la estructura microscópica de la hoja, y también la nanoscópica, o estructura molecular. Arriba, el vegetal. Abajo, el material sintético. La propiedad es útil, por ejemplo, para mantener limpios los aisladores eléctricos. Foto, Anish Tuteja y Wonjae Choi.

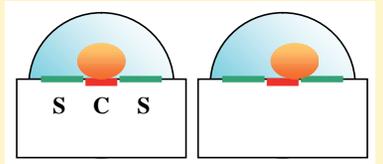




● Acelerómetros

Por lo dicho en relación con los efectos de los cambios de escala de tamaños, la aceleración, la gravedad y el peso tienen escaso efecto en la escala atómica, en la que predominan otras fuerzas mayores, como la eléctrica y la de Casimir.

Aún así, hay nanoacelerómetros,¹⁴ útiles para medir aceleraciones muy grandes, como las que ocurren en impactos y explosiones. Lo más común en la industria es hoy el uso de microacelerómetros, de decenas de micrones hasta pocos milímetros de tamaño.



● **Acelerómetro térmico.** La bola de aire caliente, creada por un calefactor C, se mueve cuando el aparato se acelera, y los sensores térmicos, S, lo registran. Mide 1 mm, y da 10 mV por cada m/s^2 de aceleración.

PROPUESTAS DE ESTUDIO

19.1. ¿Cuánto vale la fuerza de Casimir para el caso de dos placas conductoras paralelas de un metro cuadrado de área, separadas a una distancia de un milímetro?

19.2. El relé electrostático descrito en este capítulo, actúa con una tensión dada por la siguiente fórmula, en la que U es la tensión en V; d , la separación entre la placa fija y la móvil, en m; k es la constante elástica en N/m; ϵ_0 es la permitividad del vacío o del aire ($8,8541878176 \times 10^{-12}$ F/m); y A es el área de la placa. Con los datos ya mencionados en esa parte ¿Cuánto vale la constante elástica de la lengüeta móvil?

$$U = \frac{2}{3} d \sqrt{\frac{2kd}{3\epsilon_0 A}}$$

19.3. Demuestren que la velocidad del sonido en un sólido es proporcional a la raíz cuadrada del cociente entre el módulo de elasticidad,¹⁵ y la densidad del material. (Pueden usar argumentos basados en el análisis dimensional.)

19.4. Busquen, o generen, argumentos relacionados con la ética en nanotecnología, y relaciónenlos con la ética biotecnológica, un poco más antigua.



● Engranaje diferencial, imaginado en el Instituto de Manufactura Molecular (IMM), California, en los Estados Unidos, con varias clases de átomos.

¹⁴ Los que se ofrecen con ese nombre en el comercio de reproductores multimedia son, meramente, microacelerómetros, que sirven, en esa aplicación, para manejar el artefacto con sacudidas, en vez de pulsar botones o girar perillas.

¹⁵ Al final del capítulo anterior se da una definición del módulo de elasticidad, cuyas unidades internacionales son las mismas que las de la presión: n/m^2 , o $kg/(s^2m)$.

• Otras fuentes de estudio e información

- Este sitio de Internet ofrece una introducción elemental a los microsistemas, con variados ejemplos de sensores radiativos, de flujo, sensores y microactuadores electrostáticos, magnéticos, térmicos y piezoeléctricos, y variados componentes electrónicos y de microsistemas. Su autor es el británico Danny Banks, y la versión castellana la realizó el mexicano M.C. Federico Sandoval-Ibarra.
http://proton.ucting.udg.mx/tutorial/microsensores/susys_i.html
- Artículo con animaciones que muestran nanoengranajes y nanocojinetes animados, y una nota sobre Raymond Kurzweil, un científico sobresaliente en varios campos, que alcanzó renombre por el acierto de sus predicciones en nanotecnología.
<http://www.taringa.net/posts/info/1788924/%C2%BFQue-son-los-Nanobots-y-Nanomaquinas.html>
- Explicación (en inglés) del diseño de un relé electrostático, por P. M Zavracky, de la Northeast University, Boston, Estados Unidos.
<http://www.ece.neu.edu/edsnu/zavracky/mfl/programs/relay/relay.html>
- Antonio Luque Estepa, Diseño de un acelerómetro basado en tecnología mems, *http://www.gte.us.es/ASIGN/SEA/MEMS_PRACT.pdf*. El autor describe la construcción, por métodos fotoquímicos, de un acelerómetro capacitivo de lengüeta sujeta por ambos extremos.

Electrónica y medio ambiente



- Los mayores daños que sufre el ambiente por la fabricación y el uso de aparatos electrónicos, y por la generación y transporte de la energía eléctrica con la que funcionan y se fabrican, no son de origen electromagnético, como podríamos creer a veces, sino que provienen de la contaminación química y visual. La electrónica es la rama de la industria que más velozmente avanza en la época actual, y en la que más rápidamente caen en desuso sus productos. Éstos, en pocos años, se convierten en basura, la cual, por desdicha, es de excelente calidad, y por eso, de muy difícil destrucción.

Arriba, millares de teclados y ratones estadounidenses en desuso, que algunas compañías reciben como parte de pago de equipos nuevos, para cumplir su obligación de hacerse cargo de ciertos desechos. Abajo a la izquierda, basural europeo con monitores en desuso. Muchos funcionan, pero se los cambió por otros más chatos, y de menor consumo. En 2006, un tercio de la población mundial tenía celular; en 2009, dos tercios. Se calcula que se los renovará en tres años, aunque fun-

cionen bien, y aparecerá entonces más de medio millón de toneladas de basura electrónica, para la que no hay un destino útil. A la derecha, toneladas de celulares chinos viejos, en proceso de destrucción, con aprovechamiento de algunas partes.

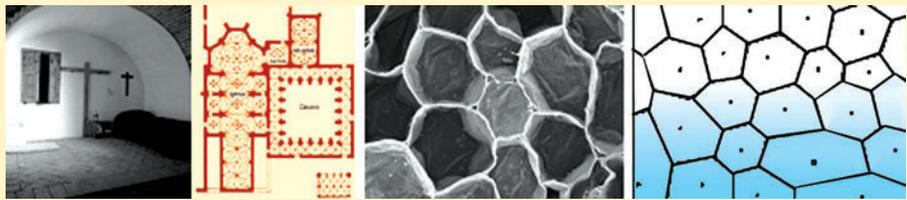
No hay, o son muy raros, efectos electromagnéticos causados por equipos eléctricos o electrónicos que dañen la salud humana, la animal, o la vegetal; pero sí pueden haber interferencias, cuya intensidad máxima regulan las leyes, para que no perturben el funcionamiento de aparatos vecinos.

Más que los aparatos en sí, lo que causa daños ambientales es la energía eléctrica que se consume para fabricarlos, cuando se obtiene a partir de la quema de combustibles, cuyos gases muy probablemente causen un calentamiento atmosférico, de efectos perjudiciales para la vida, la salud y la economía mundiales. Las partes más contaminantes de los aparatos son, hoy, sus pilas químicas, algunas de las cuales tienen sustancias nocivas, que pueden causar enfermedades si se dispersan, y si alcanzan una concentración suficiente.

Electrónica y medio ambiente

En los últimos veinte años, el auge de Internet y la telefonía móvil multiplicó grandemente el volumen de las comunicaciones, y eso generó preocupaciones nuevas, por los posibles efectos de las ondas electromagnéticas en el ambiente, y en los seres vivos. Pero en realidad, y a pesar de ese aumento en el uso de la radiotelefonía, la irradiación electromagnética disminuyó, gracias a que una buena parte de las comunicaciones por aire¹ se realiza mediante la telefonía celular.

Celular significa concierne o relativo a una célula. Y célula, en latín, es una celda pequeña, un compartimiento, como el de un monje en un monasterio, una celda de un panal de abejas, o una casilla en el tejido de un vegetal o un animal. La palabra la introdujo el biólogo Robert Hooke en 1665, para nombrar los compartimientos de los tejidos vivos que veía al microscopio.



● **Izquierda, celdas de un antiguo monasterio. Centro: celdillas (o células) vegetales, vistas al microscopio. Derecha: mapa de la telefonía celular en una ciudad. Cada punto representa una torre, y los polígonos, sus respectivas zonas de influencia, de uno o dos kilómetros.**

Antes de la telefonía celular, los aparatos móviles tenían que tener un alcance muy grande, porque la central telefónica podía estar a decenas de kilómetros de distancia. Empleaban para eso una gran potencia eléctrica, provista por baterías grandes y pesadas, que se llevaban en una valija. En consecuencia, la radiación electromagnética que recibía el usuario, y sus vecinos, era importante.

Actualmente, la telefonía inalámbrica requiere una potencia mucho menor, porque el aparato se comunica nada más que con la torre que corresponde a su célula, que raramente está a más de cuatro o cinco cuadras de distancia. Las torres se comunican entre sí, directamente, o por intermedio de satélites, hasta alcanzar el destino. Esas estaciones usan potencias mayores, pero no representan peligro,

¹ En la jerga de las comunicaciones, por *aire* se entiende el espacio público abierto, aunque se trate del vacío, o del agua en una comunicación submarina. Por ejemplo, en la transmisión de TV, se dice canal de *aire*, por oposición a un canal de cable, o de fibra óptica. A la *direct TV* no se le suele llamar de *aire*, a pesar de que sus ondas viajan por el espacio vacío y por la atmósfera, porque esa señal es reservada, y no pública.



● Las antenas de telefonía celular, debidamente instaladas a más de doce metros de distancia de un lugar habitable, no afectan la salud. Pero son feas. Quizás ésa sea, en el fondo, la razón por la que las critican individuos y organizaciones.



● Teléfono móvil de 1978, con su pesada batería en la valija, y el más compacto "ladri- llo" de 1995. Abajo, un pequeño celular de 2007. A medida que aumenta la cantidad de torres, disminuye la potencia necesaria para la comunicación.



porque están en lugares elevados, y alejados del público. La potencia eléctrica de la comunicación disminuye, así, centenares de veces.² Los usuarios de aparatos móviles, y las personas que los rodean, reciben una radiación electromagnética mucho menor que la de los transmisores portátiles de gran alcance, que se usaban hace veinte o treinta años.

● Radiaciones ionizantes y no ionizantes

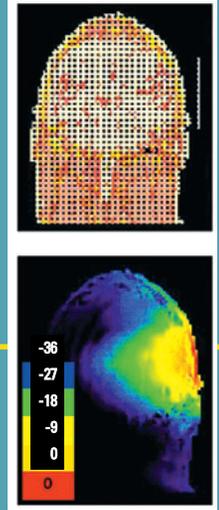
Recordemos que ionizar significa cargar partículas con electricidad; por ejemplo quitarle electrones a un átomo; o, al contrario, dárselos en exceso. También se ioniza la materia cuando se desarma una molécula, en partes de carga opuesta.

Hay varias clases de radiaciones de efectos ionizantes; por ejemplo partículas aceleradas en un acelerador, partículas alfa y beta emitidas por un cuerpo radiactivo, y ondas electromagnéticas de longitud de onda menor de medio micrón, como la radiación ultravioleta del Sol, y los rayos gamma de la radiactividad.

Las radiaciones electromagnéticas cuyas longitudes de onda son mayores de medio micrón (o frecuencia menor que 6×10^{15} Hz), no son ionizantes; o lo son en muy pequeño grado. Son ejemplos la luz visible, los rayos infrarrojos, la radiación de los hornos de microondas, las ondas de telefonía, televisión, radio FM y AM, y los campos de las líneas eléctricas. En cambio, los rayos ultravioleta, X, gamma, y cósmicos, sí ionizan. Para expresar la intensidad de las radiaciones ionizantes se usan índices basados en su poder de ionización.³

² La potencia irradiada disminuye con el cuadrado de la distancia. Si en vez de enviar una señal a una central que está a 20 kilómetros, se la dirige a una antena que dista sólo medio kilómetro, como la relación entre esas distancias vale 40, la potencia necesaria para la comunicación se reduce en un factor 1600; eso ahorra un poco de energía; pero además, economiza mucho tamaño y peso de las baterías.

³ Resumimos, para posibles consultas futuras, las principales unidades relacionadas con las radiaciones ionizantes. Una *actividad* de una desintegración por segundo, es de un becquerel (Bq). Un curie (Ci) equivale a $3,7 \times 10^{10}$ Bq; ésa es, aproximadamente, la actividad de un gramo de radio. Una *dosis de irradiación* de un rem (*roentgen equivalent man*), genera 84×10^{-4} joule de energía, y una carga de 258 μC , por cada kilogramo de aire que atraviesa. Un sievert (Sv) equivale a 100 rem. Cuando la radiación es gamma, o de rayos X, la unidad rem toma el nombre de roentgen, a secas. Una *dosis de absorción* de un rad, genera 0,01 J por kg de agua. Un gray (Gy), equivalente a 100 rad, genera un joule por kg de agua. Un sievert (Sv) equivale a un gray, pero corregido por la diferente sensibilidad de diversos tejidos y órganos a la radiación. La dosis de irradiación que recibe una persona por parte de las fuentes naturales es del orden de 1 ó 2 milirems por semana. El límite higiénico para los que trabajan con materiales radiactivos, u otras fuentes ionizantes, es de 200 milirems semanales, ó 100 veces la dosis de fondo o ambiental. Una radiografía irradia con 500 milirems. Con más de dos de ellas por mes, excederíamos el límite higiénico establecido por las autoridades. La dosis promedio que recibimos de los equipos de rayos X de uso médico es decenas de veces superior a la proveniente de las centrales nucleares, y de cualquier otro uso pacífico de la energía nuclear. Tanto la radiación de uso médico, como la proveniente de las centrales nucleares, son menos intensas que la radiactividad natural del ambiente. Una placa común de tórax implica, para el paciente, una dosis de 0,02 veces la milésima parte de un sievert, es decir, 0,02 mSv. Esto equivale a la radiación de fondo que todo ser humano recibe durante unos tres días, como consecuencia de las fuentes naturales (Reiteramos que las ondas de radio, TV, telefonía móvil, microondas y mandos infrarrojos, no son ionizantes; y si mencionamos aquí esa radiación, es para distinguirla de las ondas que emiten los equipos eléctricos y electrónicos.)



- Cabeza de muñeco, que imita la humana, junto a un celular que emite 125 mW. En rojo, cero decibel, correspondiente a 9,5 W/kg. En anaranjado, casi diez veces menos. El aparato cumple los límites higiénicos europeos, de 2 W/kg, y los norteamericanos, de 1,6 W/kg; pero sólo en relación con los órganos internos, ya que la piel y el hueso están excedidos (el capítulo 16 explica el concepto de decibel, o décimo de la unidad logarítmica).



- Dos watt por kilogramo elevan la temperatura del tejido vivo en un tercio de grado, por cada minuto de exposición. La leyenda de que se puede freír maíz con cuatro celulares, es falsa; hay truco.



- Medición de la frecuencia de un horno de microondas, con una barra de chocolate fija, que no gire con el plato. Cuando aparecen zonas fundidas, se apaga el horno. Esas zonas son los *vientres* de la onda estacionaria que se forma, y la distancia entre ellas equivale a media longitud de onda. Las microondas se comportan como las ondas de sonido en una cavidad, y resuenan; esto es, interfieren con sus reflejos en las paredes. A partir de la longitud de onda, se calcula la frecuencia, con la fórmula de la nota al pie de esta página. También se pueden manifestar submúltiplos, como indica la figura.



- Interferencia de un transmisor de radio de un coche, en la TV. A veces se oye también el sonido. Suele ocurrir cuando la antena está muy baja.

Aunque los rayos ionizantes son más peligrosos, los que no son ionizantes también pueden causar daños cuando son intensos, porque pueden calentar los tejidos vivos, y quemarlos, o colocarlos fuera del rango de temperatura vital.

Dentro de las radiaciones no ionizantes, o sea las de frecuencia menor que 600.000 GHz, se distinguen las de muy baja, baja, media, alta y muy alta frecuencia, cuyos efectos son diferentes. Las de muy alta frecuencia tienen escasa penetración en los tejidos; las de muy baja frecuencia los penetran, pero el cuerpo no las absorbe y las ondas siguen de largo. Las ondas de ciertas frecuencias intermedias ingresan al cuerpo humano, éste las absorbe, y los tejidos aumentan su temperatura. En este caso interesa la energía disipada en cierta masa del cuerpo, y en un cierto tiempo. En cambio, las ondas de frecuencia baja generan muy poco calor, y lo que interesa para la salud es, entonces, algún otro posible o hipotético efecto perjudicial que no sea el térmico; por eso se fijan otros parámetros como límite; por ejemplo la intensidad del campo eléctrico, o la del magnético, ya mencionadas en los capítulos 3 y 10.

La tabla 20.1 resume las frecuencias y longitudes de onda de las radiaciones electromagnéticas más comunes en la industria y la medicina.⁴

TABLA 20.1

FRECUENCIA Hz	LONG. ONDA m	IONIZANTE	Uso	EFECTOS EN EL CUERPO
10^2	10^6	No	Distribución de energía	Corriente débil
10^4	10^4	No	Radio AM	Corriente mayor
10^6	10^2	No	Radio FM, TV	Térmico débil
10^8	1	No	Horno de microondas	Térmico mayor
10^{10}	10^{-2}	No	Mando infrarrojo	Fotoquímicos
10^{12}	10^{-4}	Sí	Cama ultravioleta	Altera células piel
10^{14}	10^{-6}	Sí	Radiografías	Daño celular
10^{15}	10^{-8}	Sí	Radioterapia	Daño celular
10^{18}	10^{-10}	Sí	Radioterapia	Daño celular
10^{20}	10^{-12}	Sí	Radioterapia	Daño celular
10^{22}	10^{-12}	Sí	Radioterapia	Daño celular

El tipo de daños que produce una radiación se relaciona con su longitud de onda. Una onda del tamaño de una molécula puede desarmar una molécula, por ejemplo las del núcleo de una célula; una onda del tamaño de un átomo, desarma (o ioniza) un átomo; y para desintegrar el núcleo de un átomo, hace falta una onda de longitud diez mil veces menor, como el de ese núcleo, de unos 10^{-14} m.

Los valores indicados en la tabla corresponden a los órdenes de magnitud, y no son exactos. Por ejemplo, la longitud de las microondas de un horno que opera con 2.450 MHz, es de 122 milímetros, y no de un metro como figura en la tabla 20.1;

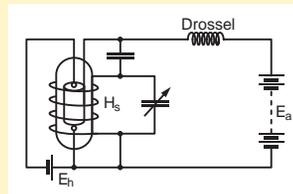
⁴ La frecuencia se relaciona con la longitud de onda mediante $v = c/\lambda$, donde v (nu) es la frecuencia, en hertz, o 1/s; c es la velocidad de la luz, 288.792.458 metros por segundo; y λ (lambda), la longitud de onda, en metros.

pero un metro es un valor más aproximado que los cien metros, o que el centímetro, de los renglones contiguos.



● Las cocinas de inducción desarrollan una potencia aproximada de 1 kW, que repartida en un área de 400 cm², representa una densidad de potencia de 2.500 mW/cm². Pero, como operan con 20 ó 30 kHz, sólo calientan los metales, pero no el cuerpo humano, ni otros cuerpos poco conductores, aunque induzcan corrientes de unos pocos microamperes. En cambio, sólo 5 mW/cm² de un horno de microondas, que funciona con dos o tres gigahertz, puede tener efectos de riesgo en el cuerpo humano. En la foto, sólo se fríe la parte del huevo que está apoyada sobre el metal. Las cocinas de inducción no agreden el medio ambiente.

Los hornos de microondas emiten una radiación que, si incidiera en el cuerpo, causaría quemaduras internas. Se recomienda operarlos con la puerta cerrada, por si fallaren los interruptores de seguridad que interrumpen el funcionamiento en ese caso. Las ondas, de 2.450 MHz, las genera el *magnetron*, un aparato con un filamento que emite electrones, acelerados con un electrodo de alta tensión positiva. En su trayecto, unos imanes hacen que los electrones se muevan en espiral, y al estar acelerados, emiten ondas electromagnéticas, que resuenan en cavidades, y salen por un orificio.



● Tasa específica de absorción (SAR)

SAR significa *specific absorption rate*, y se define como el cociente entre la potencia que recibe un órgano, y su masa. Se mide, por ejemplo, en miliwatt por gramo, en watt por kilogramo; o, lo que es lo mismo, en joules por kilogramo y por segundo. Esta magnitud se refiere a la energía recibida por un dado volumen de tejido, y en un cierto tiempo. Los organismos internacionales de salud establecen un límite higiénico para la SAR de radiaciones no ionizantes.

La SAR admitida depende de cada país y ámbito, y cambia con el tiempo, a medida que crecen los conocimientos, y mejora la tecnología. En caso de dudas, conviene respetar el criterio más exigente, que es seguramente el que entrará en vigencia en un futuro cercano.



● Para la artritis y otras dolencias, los médicos pueden aplicar potencias electromagnéticas de 1 kW/kg, durante breve lapso. Arriba, equipo de onda corta Radarmed 2.500 CP, de 5 MHz, mil veces más potente que un celular.



● Los portadores de marcapasos se deben cuidar de las radiaciones apenas un poco más que el público común, porque los aparatos actuales están bien protegidos contra interferencias electromagnéticas, especialmente los que suministran un ritmo fijo de estímulos cardíacos. Y los equipos más avanzados (cuyo ritmo responde a la demanda del organismo) operan momentáneamente con un ritmo fijo, en caso de anormalidades de funcionamiento, hasta que se supere la emergencia. Toda la precaución del portador se reduce a la de no apoyarse contra un horno de microondas, y guardar, preferiblemente, unos centímetros de distancia al artefacto.

• Densidad de potencia

La densidad de potencia S se expresa en watt por metro cuadrado (W/m^2); también en mW/cm^2 , mW/mm^2 , y, en general, en cualquier unidad de potencia dividida por unidades de área; o bien en unidades de energía, dividida por área y por tiempo. A diferencia de la SAR, la densidad de potencia es un índice de la energía que, en un cierto tiempo, atraviesa una dada superficie en el espacio, pase o no a través de tejidos.

La relación entre la densidad de potencia S y la tasa específica de absorción, SAR, depende de la frecuencia de la radiación, y del tipo de tejido vivo. Por ejemplo, si la frecuencia es cercana a la de un horno de microondas (2,45 GHz), concebido precisamente para calentar carne, o alimentos con bastante agua, como los tejidos humanos, la absorción es grande. En cambio, para la misma densidad de potencia, pero con una frecuencia cercana a la de la telefonía celular (0,8 a 2,1 GHz), la tasa de absorción es menos de la mitad.



- Arriba, el Pibe Amarillo, personaje de Richard F. Outcault. En 1898 aparecía en algunos diarios sensacionalistas estadounidenses, que exageraban o inventaban noticias. De ahí surgió, quizás, el mote de *prensa amarilla*, que hoy merecen algunos sitios de Internet. La libertad de expresión permite propalar ideas infundadas, y hasta mentir a sabiendas dentro de ciertos límites. Es común oír que en un vecindario aumentaron las enfermedades después de la instalación de algún aparato. Para distinguir la verdad se necesitan datos confiables, comparados con los de otros tiempos y zonas.

• Límites recomendados en nuestro país

Los límites dependen de las profesiones, los tiempos de exposición, las frecuencias, y de otros criterios causantes de excepción; y cambian además con el tiempo. Una explicación completa de los reglamentos actuales ocuparía un espacio mucho mayor que el de este capítulo; pero igualmente damos valores de referencia, útiles para el diseño de equipos. Hacemos a la vez la recomendación de cumplir los reglamentos con un muy holgado margen, en previsión de una normativa más exigente que pueda adoptar la Argentina, o que impongan otros países que nos interesen como mercado para nuestras exportaciones.

La exposición *ocupacional*, referida a personas que trabajen a menudo con equipos que generen radiaciones electromagnéticas, en industrias que se suponen controladas por especialistas en riesgos profesionales, y para frecuencias entre 10 MHz y 300 GHz, la SAR, promediada en 6 minutos en la masa corporal total, no tiene que exceder nunca el valor de 0,4 W/kg, y tampoco debe exceder los 4 W/kg en ningún gramo localizado del cuerpo.



- Los instaladores de antenas receptoras están libres de riesgos de irradiación, porque trabajan con la potencia muy pequeña que llega desde lejos. Pero las antenas transmisoras, en algunos casos, pueden causar quemaduras.

Para menos de 10 MHz, el límite de exposición depende de la frecuencia, y varía entre 5 y 100 mW/cm². Entre 30 y 300 MHz, banda que incluye la radio FM, la densidad de irradiación admitida es de 1 mW/cm² como máximo.

La exposición *poblacional*, esto es, la del público general que no está sujeto a un control de riesgos profesionales específicos, es diez veces menor que la prevista para los profesionales. No debe exceder 0,04 W/kg, promediada en su masa corporal, ni 0,4 W/kg localizada en un gramo de tejido; en ambos casos, computadas como promedios en un período de media hora.

Se recomienda que los valores instantáneos, o de pico, que se puedan producir, no excedan en un factor mayor de 100 los valores dichos.

FRECUENCIA, <i>f</i> Hz	DENSIDAD DE POTENCIA, <i>S</i> (mW/cm ²)	INTENSIDAD DEL CAMPO ELÉCTRICO, <i>E</i> (V/m)	INTENSIDAD DEL CAMPO MAGNÉTICO, <i>H</i> (A/m)	TIEMPO MEDIO <i>E</i> ² , <i>H</i> ² , <i>S</i> (MINUTOS)
30 a 100 k	-	614	163	6
100 k a 3 M	-	614	16,3 / <i>f</i> (MHz)	6
3 a 30 M	-	1842 / <i>f</i> (MHz)	16,3 / <i>f</i> (MHz)	6
30 a 100 M	-	61,4	16,3 / <i>f</i> (MHz)	6
100 a 300 M	1	61,4	0,163	6
300 M a 3 G	<i>f</i> (MHz) / 300	-	-	6
3 a 15 G	10	-	-	6
15 a 300 G	10	-	-	616.000 / [<i>f</i> (MHz)] ^{1,2}

Además de esto, y en particular, los hornos de microondas, quizá las fuentes hogareñas más intensas de radiación electromagnética no ionizante, deben irradiar una densidad de potencia menor de 1 mW/cm² cuando están cargados de alimentos, o de 5 mW/cm² descargados; ambas medidas a 5 cm de distancia, y con la potencia del artefacto al máximo.

La última columna de la tabla anterior se refiere a los cuadrados de las intensidades de los campos magnético *H*, y eléctrico *E*, pero utiliza directamente la densidad de potencia *S*, sin elevarla al cuadrado. Eso se debe a que esta densidad es proporcional al producto de *E* por *H*, o al cuadrado de cualquiera de ellas, puesto que estas magnitudes se relacionan mediante $E = \mu_0 \cdot c \cdot H$, en ondas que se propagan en el vacío o en el aire. La constante *c* es la velocidad de la luz, 2.99792458 m/s; y μ_0 , la permeabilidad magnética del vacío, que vale $4\pi \times 10^{-7}$ N.A⁻², ó $4\pi \times 10^{-7}$ N.T/A.

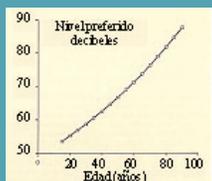
El rango de 0,3 a 3 GHz (ó 300 MHz a 3 GHz) se conoce como UHF, siglas en inglés de ultra alta frecuencia; de 3 a 30 GHz es la SHF, súper alta frecuencia; y de 30 a 300 GHz, EHF extra alta frecuencia, o frecuencia extremadamente alta. esos nombres son históricos y convencionales, ya que el concepto de alto o muy



- La torre de comunicaciones desentona con el estilo de las construcciones de Carmona, España. Pero sus pobladores necesitan sus servicios. Quizás, en un futuro, el dilema se resuelva con transmisores menos visibles.



- Un parlante que emita un watt de sonido, cuando se lo oye desde seis metros de distancia, produce un nivel de cien decibeles, o sea de diez beles; 10^{10} veces mayor que el umbral de audición, que es de 10^{-12} W/m². Hay parlantes de varios miles de vatios, diseñados para oírlos desde muy lejos en grandes espectáculos. Orientados hacia arriba, hacen saltar medio metro una bocha de dos kilos. Los espectadores cercanos sufren, a veces, heridas auditivas.



- Por la pérdida progresiva de la audición con la edad, el nivel de sonido que prefiere una persona sana aumenta con los años, como lo muestra el gráfico. Algunos jóvenes habituados a oír música de gran volumen, sufren en pocos meses pérdidas de sensibilidad auditiva que, normalmente, ocurrirían en cuarenta años.

alto, es relativo al valor tradicional con el que se operaba en la época en que se definió la nueva categoría.

Las mediciones realizadas en zonas densamente pobladas de nuestro país revelan valores reales diez veces inferiores a los límites higiénicos establecidos por ley, lo que muestra que las normas se pueden cumplir sin necesidad de hacer cambios grandes ni costosos, sino, simplemente, con la comprobación del buen funcionamiento de los equipos, y la reparación de los que se encuentren defectuosos.

● Agresión del paisaje

Las normas destinadas a preservar la calidad visual están a cargo de los municipios. Por ejemplo, en el partido de La Plata, provincia de Buenos Aires, se prohíbe la instalación de torres de comunicaciones en plazas, los edificios que las rodean, templos, escuelas, clubes, hospitales, e inmuebles catalogados con valor patrimonial; pero se permiten las antenas de los propios hospitales, y las de radioaficionados. Las normas cambian a menudo, y balancean el avance en los derechos de la población a vivir en un ambiente agradable a la vista, con las necesidades de satisfacer servicios que también demanda la misma población.

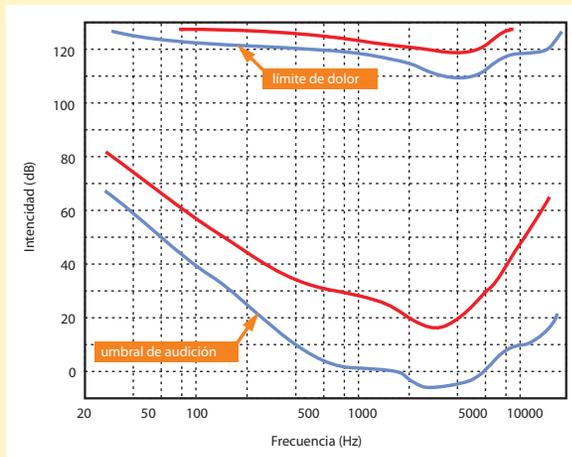
● Daños auditivos

Se critica, con razón, la costumbre de poner los equipos de sonido al máximo de su potencia, y la de combinar la emoción de la música con el aturdimiento, o saturación sensorial. Vemos eso en los coches de algunos aficionados, que en verano, y con las ventanillas abiertas, se oyen desde afuera como si fueran camionetas de propaganda. También ocurre en discotecas, donde esa modalidad ofrece a los danzantes una valiosa excusa para permanecer callados; y en equipos con auriculares, cuyas componentes más agudas, las de la percusión rítmica, se oyen desde más de un metro de distancia.

Esas prácticas son insalubres, porque producen una disminución crónica de la sensibilidad auditiva, que puede alcanzar los veinte decibeles; es decir, que oiremos cien veces menos que cuando éramos niños. Con esa reducción de respuesta, el oído se protege de daños mayores, pero pierde la posibilidad de oír sonidos débiles, que forman una importante parte de la voz humana, y es la que le da a veces matices y tonalidades sutiles, de alto valor emotivo y semántico, pero que sólo perciben oídos sanos.

Las recomendaciones laborales establecen un nivel sonoro máximo que no al-

cance los 85 decibeles para una jornada de ocho horas, y una reducción a la mitad de ese tiempo, si se trabaja sin protección auditiva, por cada tres decibeles adicionales. Resulta así que, como los auriculares más comunes permiten un volumen máximo de 110 decibeles (en Europa, 100), se los debería oír, a ese volumen, no más de un par de minutos por día. Pero los fabricantes sólo pueden recomendar, al diseñar y vender sus productos, que se los use con precaución; es del público libre, la responsabilidad de accionar adecuadamente la perilla.



● **Curva de la audición humana.** El oído tiene su máxima sensibilidad a los sonidos de frecuencia cercana a los 2 kHz. En negro, el oído normal; en rojo, un oído endurecido por la práctica habitual de exponerse a ruidos muy fuertes. El uso indebido de equipos de sonido es una de las fuentes importantes de daños de origen electrónico, a la salud y al ambiente.



● Si apoyamos en cierta posición un celular sobre una radio AM sintonizada a la izquierda del dial, se oye un ruido rítmico en el parlante, o en los auriculares de la radio, aun cuando no se estén haciendo ni recibiendo llamadas. La radio también emite un sonido, esta vez continuo, si se le acerca un reloj digital y se aprieta el botón de la luz de pantalla. Esos efectos ilustran la interferencia electromagnética entre aparatos.

● Interferencia electromagnética

Seguramente se habrá notado que, cuando se deja un celular apoyado sobre un televisor, una radio o una computadora, se oyen ruidos en los parlantes de esos equipos, o se ven perturbaciones en la imagen, especialmente cuando el aparato recibe una llamada. Esos efectos se consideran una *interferencia* de un aparato en el otro; en este caso leve, de solución inmediata, y sin consecuencias muy importantes. Las normas de cada país, y las internacionales, establecen límites a ese efecto, en resguardo del buen funcionamiento de los aparatos. Aun así, en los aviones se suele recomendar a los pasajeros que apaguen sus teléfonos y computadoras portátiles, especialmente en el momento del despegue y el aterrizaje, que son los más críticos del vuelo. Se pretende, con esa precaución, evitar posibles problemas de funcionamiento tanto en los equipos de comunicaciones de la nave, como en el de sus muchos aparatos electrónicos de vuelo.

El diseño de un equipo electrónico debe cuidar dos aspectos complementarios: que el aparato no cause interferencias, y que resista las interferencias de otros; en eso consiste la *compatibilidad electromagnética*. Eso es más difícil de conseguir en



● Los rayos de las tormentas, y otras descargas atmosféricas, y la actividad solar, son fuente de interferencia en aparatos electrónicos, especialmente los de comunicaciones.

los aparatos de comunicaciones, puesto que están destinados a recibir ondas electromagnéticas, y a emitirlas; entonces no se los puede blindar del mismo modo en que se lo hace con un reproductor de música grabada. La protección contra interferencias tiene que distinguir entre el ruido y la señal, que a veces son de frecuencias muy cercanas, o iguales.⁵ Los Estados Unidos de América fueron la primera nación en establecer límites, y en imponer estudios previos de influencia ambiental, en su Ley de Medio Ambiente de 1970.

Cualquier equipo electrónico es una fuente potencial de interferencia, tanto de los equipos cercanos en la misma vivienda, como en aparatos del vecino, afectados a través de las paredes medianeras. Las fuentes más intensas son las soldaduras de arco, los controles de corriente mediante triacs, los timbres de llamada muy antiguos, con contacto intermitente de lengüeta, los contactores de ascensores, y los trolebuses y trenes eléctricos con contactos deslizantes. El capítulo 10 mencionó la interferencia producida por el efecto corona, o ionización eléctrica del aire, en líneas de alta tensión. Esas perturbaciones aumentan inmediatamente después de las lluvias, y con la falta de mantenimiento de las líneas.⁶

El nivel de radiointerferencia se expresa en microvoltios por metro de intensidad de campo eléctrico.⁷ Se suele especificar el valor máximo que puede producir un aparato, a una cierta distancia determinada distancia, y también el nivel que puede soportar el propio equipo, sin que presente anomalías de funcionamiento.



● Sonda usada por el Laboratorio Ambulante de Mediciones de Campos Electromagnéticos y Ruido, de la Universidad Tecnológica Nacional de Santa Fe, para medir la radiointerferencia de la línea de transmisión de energía eléctrica de Paraná, de 132 kV.



● Joonhuyn Kim diseñó esta lámpara chata, que consume lo mismo que las redondas, y da la misma luz; pero ahorra espacio de almacenamiento y cartón de embalaje, con lo que reduce, indirectamente, el consumo de energía, y favorece, con eso, el medio ambiente.

● Riesgos ambientales indirectos de la industria electrónica

Se mencionó ya la emisión de campos y radiaciones –algunos de los cuales dañan la salud cuando exceden ciertos límites, o causan interferencias– y el perjuici-

⁵ En esos casos, una manera de separar el ruido de la señal, es codificar ésta, y usar información redundante. Como el ruido no redundante, se lo separa con mayor facilidad.

⁶ El valor típico de ruido de radiointerferencia es de 110 dB debajo de las líneas, y de 80 dB a 50 m de distancia, con referencia a $1 \mu\text{V}/\text{m}$. En cuanto al ruido audible, alcanza los 30 dB a 10 m. El Ente Provincial Regulador Eléctrico de Mendoza estableció, en 1999, para una línea, un nivel máximo de 54 dB durante el 80 % del horario diurno, a una distancia igual a cinco veces la altura de la instalación.

⁷ Cuando esa magnitud se expresa en decibelios, hay que considerar cuál es el nivel de referencia de cero decibel, por ejemplo, un microvoltio por metro.

cio ambiental que representa la quema de combustibles fósiles para generar la energía empleada en la fabricación y el uso de aparatos electrónicos. Aparte de eso, debemos tener en cuenta también el daño ambiental que pueden causar los materiales usados en electrónica, y sus desechos.

La legislación más exigente, en los años actuales, es la de la Comunidad Europea, que influye directamente en todo el mundo, a través de los requisitos para el comercio internacional.⁸ Las directivas del Parlamento Europeo limitan la cantidad de materiales riesgosos que pueden contener los productos, o emplearse en su fabricación. La directiva 2002/95/CE resolvió la disparidad de normas locales de los países integrantes de esa comunidad, y limitó el empleo de sustancias contaminantes, como el mercurio, el plomo, el cadmio y el cromo. Sin embargo, apenas se comenzó a discutir su proyecto, surgieron dificultades insalvables, para la época actual del desarrollo de la industria electrónica; y se necesitaron excepciones, que recoge el cuerpo de la misma norma.⁹



● **La soldadura con aleación de plomo y estaño, sigue siendo la principal forma de contacto fijo en los circuitos electrónicos. Se la desalienta, sin embargo, por la toxicidad del plomo.**

Por ejemplo, en los juguetes para niños no se permite el uso de pinturas con sales de plomo. Pero lo que llamamos estaño de soldadura, tan usado en electrónica para fijar las conexiones de los componentes, tiene un cincuenta o sesenta por ciento de plomo.¹⁰ Si se prohibiera el uso de ese metal,¹¹ desaparecerían todos los aparatos electrónicos: celulares, MP3, relojes, televisores, cafeteras, alarmas de coches, computadoras y satélites. Entonces, y hasta hallar algo mejor, se lo permite en soldaduras, y como parte del vidrio de los tubos de TV.

También se permite el mercurio, en las lámparas fluorescentes rectas, si no sobrepasa los diez miligramos de halofosfato, los cinco de trifosfato de vida normal,

⁸ Nuestros exportadores se deben comprometer ante sus clientes europeos no sólo a enviar a Europa productos que no dañen aquel ambiente, sino además a utilizar técnicas de producción que protejan también el entorno argentino. Por ejemplo, no hay que enviar contactos de cobre plateados por medios que hayan utilizado cianuro en los baños electroquímicos. La legislación extranjera influye, entonces, indirectamente, en la nacional.

⁹ Se exceptúa la obligación de sustitución, si ésta fuera técnicamente imposible, o de costo prohibitivo, o si sus efectos perjudiciales para el medio ambiente o la salud, superaran sus beneficios

¹⁰ El estaño puro, que funde a los 231,93 °C, es incómodo para soldar, lo mismo que el plomo puro, cuya temperatura de fusión es de 327,3 °C. En cambio, una aleación de 61,9 partes de estaño y 38,1 de plomo, funde a los 183,0 °C, temperatura menor que la de cualquiera de los componentes. Esa mezcla se llama *aleación eutéctica*. Su bajo punto de fusión protege los componentes electrónicos de daños térmicos durante la soldadura (eutéctico, en griego, significa que se funde bien).

¹¹ Cheung Shu-hung (1965–2007), uno de los dueños de la fábrica Lee Deer, se suicidó en Taiwán después de que más de un millón y medio de juguetes que había fabricado y exportado, se prohibiesen en todo el mundo, por el contenido de plomo de su pintura. El albayalde (en árabe *lo blanca*, carbonato básico de plomo, $(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2\text{Pb}_2$, se usaba mucho en pintura, maquillaje y enfermería, hasta que a fines del siglo XX se desaconsejó su empleo, por sus efectos tóxicos cuando se lo ingiere.



● La preocupación por el envenenamiento con plomo es reciente. Desde hace un siglo, y hasta fines de la Segunda Guerra Mundial, era común regalar soldados de plomo a los niños varones, para que jugaran. Todavía hay muchas casas antiguas con caños de plomo para el agua potable, y a los instaladores de caños se los sigue llamando plomeros. Pero el plomo metálico es menos venenoso que sus sales; por eso aún se lo permite en algunos usos, aunque se aliente la sustitución en las construcciones, y en los equipos nuevos.



- Las líneas eléctricas libres de interferencia, admiten señales de telefonía, radio, TV e Internet. Arriba, un capacitor de acoplamiento, que aísla la baja la frecuencia de la red, pero conduce la alta frecuencia de la señal. La bobina de drenaje, de 6 u 8 espiras, cumple la función opuesta. Abajo, un inductor, apropiado para inyectar señales en los cables blindados subterráneos de las ciudades, sin contacto directo. Fotos de Arteche.)



y los ocho de trifosfato de vida larga. Es de imaginar el largo proceso de discusión con especialistas y fabricantes, para acordar esas cifras, compatibles con las actuales prácticas industriales.

Se permite también, y como excepción hasta tener materiales alternativos, el cromo hexavalente, y el cadmiado del hierro y otros metales, para protegerlos de la corrosión en los en los frigoríficos de absorción. En cambio, el cromado está absolutamente prohibido por esa directiva, y ya casi no se usa en el mundo.

PROPUESTAS DE ESTUDIO

20.1. Muchos artículos y noticias sugieren que las torres de celulares causan cáncer. Las más potentes emiten 500 watt que, a diez metros de distancia, se reparten en unos mil metros cuadrados, y resulta así medio watt por metro cuadrado, o 50 microwatt por centímetro cuadrado. La Organización Mundial de la Salud admite que esas instalaciones irradian al público con densidades de potencia de hasta 400 microwatt por centímetro cuadrado; pero Italia y Rusia sólo aceptan diez de las mismas unidades. Las mediciones en Buenos Aires hechas hace pocos años por organismos de investigación de las Fuerzas Armadas arrojaron valores inferiores a siete microvatios por centímetro cuadrado. Por otra parte, el propio teléfono de mano puede emitir hasta 0,6 watt, que repartidos en cien centímetros cuadrados arrojan ¡seis mil microvatios por centímetro cuadrado! Pero cumplen la recomendación de la OMS, que admite que esos aparatos generen un máximo de 4 vatios por kilogramo de tejido humano. Comenten el porqué podría ser que abunden tanto los reclamos contra las torres, y escaseen las preocupaciones por los celulares, que irradian más el cuerpo.

20.2. Las denuncias públicas sobre supuestos peligros electromagnéticos, aunque carezcan de fundamento, introducen temor en la población, y disminuyó la demanda de compra de departamentos en edificios que tienen torres de telefonía celular, y en las vecindades. Eso originó demandas por parte de propietarios, quienes, aunque no creen que las torres produzcan realmente daños, ven igualmente disminuido el valor de su patrimonio, y piden que se los compense. Comenten el caso.

20.3. ¿A qué altura mínima debería estar la antena de una radio que transmite con una potencia de 25 kW?

20.4. ¿Por qué la luz de un horno de microondas, que es una radiación electromagnética, atraviesa su puerta, y no lo hacen las propias microondas?

• Otras fuentes de información

- A. Portela, J.J. Skvarka, E.B. Matute Bravo, L.A. Loureiro, y colaboradores. *Prospección de radiación electromagnética ambiental no ionizante*. Es un manual de estándares de seguridad, elaborado por autoridades científicas de organismos oficiales argentinos de salud y de comunicaciones, en contacto con organismos de otros países, e internacionales.
http://www.cnc.gov.ar/normativa/pdf/sc0202_95AI.pdf
- Ente Nacional Regulador de la Electricidad, especificaciones técnicas y límites de los campos electromagnéticos permitidos de radiación ionizante y no ionizante:
<http://www.enre.gov.ar/web/BIBLIOTD.NSF/0/61350092a41e13d103256de5005eb4a4?OpenDocument>
- Conversión de unidades de dosis de radiación, en inglés, pero abundan las tablas de interpretación directa en cualquier idioma:
<http://www.stevequayle.com/ARAN/rad.conversion.html>
- Estudio sobre los efectos de los radares en la salud animal. Sus conjeturas se deben tomar con reservas, pero las explicaciones técnicas son claras y completas:
<http://es.geocities.com/picolobo2002/efectoradar.html>
- César Arias, *Radiaciones ionizantes en el contexto de la seguridad e higiene en el trabajo*. Muy claro resumen de conceptos de radiaciones ionizantes, y de unidades de dosis.
<http://www.ingenieria.uba.ar/archivos/2006RadiacionesIonizantes.pdf>

Respuestas a las Propuestas de Estudio

CAPÍTULO 1

- 1.1 Éstos son los prefijos de múltiplos y submúltiplos usados en el ambiente científico.

PREFIJO	SÍMBOLO	FACTOR
yotta	Y	10^{24}
zetta	Z	10^{21}
exa	E	10^{18}
peta	P	10^{15}
tera	T	10^{12}
giga	G	10^9
mega	M	10^6
kilo	k	10^3
hecto	h	10^2
deka	da	10^1
deci	d	10^{-1}
centi	c	10^{-2}
milli	m	10^{-3}
micro	μ (<i>mu griega minúscula</i>)	10^{-6}
nano	n	10^{-9}
pico	p	10^{-12}
femto	f	10^{-15}
atto	a	10^{-18}
zepto	z	10^{-21}
yocto	y	10^{-24}

- 1.2 La demostración se puede hacer de este modo: $1 \text{ V} = 1 \text{ J/C}$; $1 \text{ J} = 1 \text{ N.m}$. Sustituimos el joule por el newton metro, y dividimos ambos miembros por un metro, y queda: $1 \text{ V/m} = 1 \text{ N/C}$, como se pedía.
- 1.3 La chispa observada es del orden de un centímetro cuando se arriman puntas a la placa de aluminio; pero si se acerca un objeto muy redondeado para que el campo eléctrico sea más uniforme, la chispa mide sólo tres o cua-

tro milímetros de longitud. Por tanto la tensión antes de la descarga era de unos diez mil o doce mil volt, ya que el aire resiste unos tres kilovolt por milímetro.

CAPÍTULO 3

- 3.1 Si se consumiera en un segundo la energía de un rayo de 500 millones de joule, la potencia desarrollada sería de 500 millones de watt. Como la Argentina usa 15.000 millones de watt, o sea treinta veces más potencia, un rayo sólo nos duraría la trigésima parte de un segundo. Hay rayos de energía mucho mayor, pero cualquiera de ellos duraría no mucho más de un segundo, si se lo aprovechase. La opción que consideramos correcta es la (a).
- 3.2 Quince kilotonnes es la energía de quince mil toneladas de explosivo, o sea la de quince millones de kg de TNT. Cada kg disipa mil calorías; tenemos así quince mil millones de calorías, cada una de las cuales equivale a 4.185 joule. La energía total de una antigua bomba atómica (como las dos usadas en la segunda Guerra Mundial) es de $6,28 \times 10^{13} \text{ J}$. Por otra parte, cuarenta mil rayos de 500 MJ cada uno, representan una energía de $2 \times 10^{13} \text{ J}$. Entonces, una bomba equivale a tres tormentas; la opción que creemos correcta es la (d).
- 3.3 Ese invento del paraguas con pararrayos es todo lo ridículo que parece. La energía de un rayo es tan grande que volatilizaría la conexión a tierra, especialmente en la zona de contacto poco firme con el suelo. Además alguien podría pisar la tira de descarga, y hacer caer el paraguas. Su uso respondió quizás a una moda, o a lo mejor se usó como

distintivo político festivo en favor de las ideas independentistas de Franklin.

- 3.4** Si dividimos por seis metros la tensión de 13.200 V, tenemos un valor aproximado de la intensidad del campo eléctrico; 2.200 V/m; o sea 2,2 kV/m, inferior al límite recomendado por la Organización Mundial de la Salud.

CAPÍTULO 4

- 4.1** La conexión 4 mide la tensión; la 5 y la 9 miden la corriente, y la 8 produce un cortocircuito, además de arruinar, quizás, el instrumento. Las demás conexiones no miden nada útil; y algunas, nada en absoluto.
- 4.2** La persona desarrollaría, en el primer caso, una potencia de un watt, semejante a la del corazón. En el segundo caso, más de un kilowatt.
- 4.4** La resistencia de ese aparato vale 16,13 Ω ; la corriente es de 13,64 A.
- 4.5** El gráfico que mejor representa la ley de Ohm es primero, el de la recta que pasa por el origen de coordenadas.
- 4.6** Aparte de cuestiones gramaticales o de estilo, ambas expresiones son técnicamente desacertadas; deberían haber dicho kilowatt hora por bimestre, y más kilowatt, respectivamente. Los físicos dieron un nombre propio a una unidad de potencia, y como tiene nombre, muchos creen que es un bien de consumo. Pero aquello por lo que se paga es el kilowatt hora (un kilowatt hora equivale a 3.600.000 joule, o bien a 860,2 kilocalorías).

CAPÍTULO 5

- 5.1** El neutro es, en ese caso, el cable negro, porque es el único que tiene una tensión de 220 V con respecto a los otros tres cables.
- 5.2** Correcto: "...un aumento en la tarifa para hogares que consumen más de 1.000 kilowatt hora por bimestre." (Dinero, Argentina, <http://www.mdzol.com>, 31.Oct.1998). Incorrecto: "Apuestan por un sistema tarifario progresivo que ligue más el precio del kilowatt al nivel de consumo." (El Mundo, España, <http://www.elmundo.es>, 19.Ago.2003.) El bien de consumo es el kilowatt hora, uni-

dad de energía. El kilowatt es unidad de potencia, equivalente al consumo de un kilowatt hora por cada hora transcurrida. (¿Difícil, verdad? ¡Sin duda! También para políticos, periodistas y funcionarios.)

- 5.3** Hay variantes más sencillas en http://farm1.static.flickr.com/198/452307988_25daba84f2.jpg, en la que el contacto es por apoyo de un alambre al que le quitaron el esmalte de un lado, y se lo dejaron intacto en el costado opuesto.
- 5.4** De esos datos se deduce que Aluar produce cerca de 180 mil toneladas anuales de aluminio (eso está en aumento).
- 5.5** Un gigawatt hora por año es una potencia pequeña, apenas 114 kilowatt, ó 0,114 megawatt, la que se desarrolla en un edificio de veinte departamentos.
- 5.6** En cada hora de parada la compañía generadora pierde 130.000 pesos, que ahorran los consumidores, quienes pierden mucho más, por no poder producir.
- 5.7** El riesgo de muerte por choque eléctrico con 220 V es algo mayor que con 110 V, pero mucho menos del doble. Con 220 V la corriente es la mitad; gracias a eso disminuye el grosor de los cables y barras, y el calentamiento de los enchufes. La Argentina tomó decisiones acertadas en 1900 y en 1930, aunque estuvieran motivadas, entonces, por razones de ahorro.

CAPÍTULO 6

- 6.1** Algunos marginales sienten que destruyen bienes que les han sido arrebatados. Su inclusión en la educación, el trabajo y el ocio es el primer paso de solución. Y para quienes sólo sufren primitivas ansias de diversión, algunas compañías cuelgan de las torres campanas de acero de colores vivos, para que los inmaduros les disparen a gusto.¹
- 6.2** La sección transversal es de 1,54 mm²; y el diámetro, 1,24 mm.
- 6.3** El aluminio tiene una conductividad de 65 IACS.
- 6.4** El oro de una computadora vale dólar y medio. Y si se ponen dos micrones de níquel y, sobre este metal sólo un micrón de oro, el costo del oro se reduce a la mitad.
- 6.5** Un milímetro equivale al calibre 18 de la galga estadounidense.

¹ La palabra vándalo se relaciona con Al-Ándalus, el nombre árabe de Andalucía durante la Edad Media, cuando algunos fanáticos destruían estatuas, porque su religión les prohibía la veneración de ídolos.

CAPÍTULO 7

- 7.1** No la hay. La palabra imán proveniente del árabe significa el que está al frente, y tiene raíz diferente de la que designa los objetos con magnetismo permanente.
- 7.2** No la tienen. Su único efecto es el de retener posibles partículas de hierro, que quedarían de todos modos, en alguno de los filtros habituales de los coches. También son inciertos los posibles efectos curativos de las pulseras magnéticas. El hecho de que los imanes ejerzan fuerzas sin necesidad de un contacto promueve, quizás, especulaciones mágicas.
- 7.3** Es porque así hacen más fuerza, ya que las líneas de campo pasan directamente del imán al hierro de la puerta, sin atravesar el aire, que es mucho menos permeable.
- 7.4** La respuesta es negativa. Ese armado sólo ocultaría de la vista los polos sur de los doce imanes, sin alterar las fuerzas que hacen sobre otros, o a brújulas. Ese dodecaedro quedará sin magnetismo neto.
- 7.5** El propio cable le hace demasiada fuerza. Distinto caso es si se lo cuelga de un hilo delgado; entonces se orienta más libremente.
- 7.6** Alcanza con aproximar ambos cuerpos; y mejor, hacer que se toquen, y hasta que se golpeen. La idea de que hay que frotarlos proviene de prácticas electrostáticas. En la película *Al filo del peligro* (The Edge, Lee Tamahori, 2006) un personaje frota una aguja con un paño, para improvisar una brújula. Eso es erróneo; la frotación con una tela no magnetiza cuerpos. Además, una aguja sirve de brújula, aunque no la magnetizamos especialmente, porque el propio campo terrestre la induce.

CAPÍTULO 8

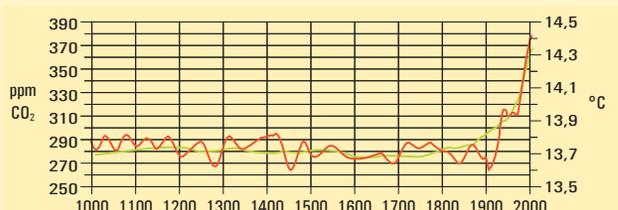
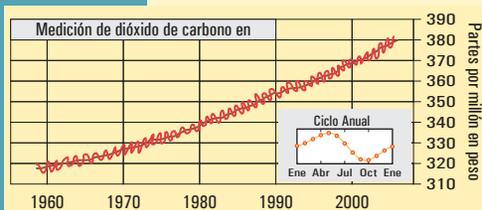
- 8.1** Un tesla equivale a diez mil gauss, y un gilbert, unidad de fuerza magnetomotriz, es

igual a 0,796 ampere vuelta; exactamente, $1 \text{ G} = 10/(4\pi) \text{ A}$.

- 8.2** No sólo por la imaginación, sino por haber desarmado una, sabemos que esa linterna funciona con una rueda de imanes que gira frente a una bobina con núcleo de hierro.
- 8.3** La fuerza vale 160.000 newton, más de 16 toneladas. Para evitar daños destructivos en esa eventualidad, envainan cada conductor en un tubo de aluminio grueso, una de cuyas marcas comerciales es *Miniflux*. La corriente que circula por el tubo es opuesta, en cada instante, a la del conductor principal, y eso minimiza la densidad de l flujo magnético.
- 8.4** Elegimos, sin nada que nos obligue, hacer un solenoide de 20 cm de largo, e igual medida de diámetro; o sea $R = 0,1$, y $L = 0,2$ m. La inducción B es de 0,000 016 T; y la corriente es $I = 0,1$ A. Despejamos el número de vueltas de la fórmula de la inducción del solenoide, y resultan 25 espiras.
- 8.5** La tensión entre los puntos de color de los secundarios del primer transformador, es de 75 V. En el de la derecha, de 25 V.

CAPÍTULO 9

- 9.1** Si la Tierra fuera rígida, podríamos responder afirmativa o negativamente. Pero como es blanda, y los continentes se mueven y cambian de forma, esa pregunta carece de significado. Los conceptos de ciudad, isla y continente tienen sentidos efímeros, en relación con los tiempos geológicos.
- 9.2** Para imanes permanentes se requiere una histéresis elevada. La pieza que se calentará mejor en un horno de inducción será aquella que tenga una mayor histéresis magnética.
- 9.3** La pinza amperométrica es un transformador en el que el primario está compuesto por una sola espira, el cable por el que pasa la corriente, generalmente alta, que se quiere



medir. Por el secundario, de muchas vueltas, pasa una corriente proporcionalmente menor, que mide un instrumento de aguja o un amperímetro digital. el núcleo del transformador se puede abrir y cerrar fácilmente para abarcar el cable. Las pinzas basadas en ese principio se usan en corriente alterna, pero hay otras apropiadas para medir corriente continua, basadas en sensores de efecto Hall, o en la superposición de un flujo alterno que genera un circuito, con el flujo continuo que genera la corriente continua que se mide.

- 9.4** La respuesta es, por desdicha, negativa. Si los alambres son muy delgados, la densidad de corriente (por ejemplo en ampere por centímetro cuadrado) será muy elevada, y seguramente mayor que la crítica que admite el material superconductor.
- 9.5** Es posible, siempre que esa materia contenga hidrógeno, u otro elemento químico de espín diferente de cero.
- 9.6** Funciona, pero la aguja no acompaña regularmente la rotación del vehículo, porque la gran masa de hierro distorsiona el campo terrestre.

CAPÍTULO 10

- 10.1** La inclusión del cero quita espectacularidad. Algunos diarios ponen: *¡Abrupta caída en la Bolsa!*, y muestran un gráfico con un gran escalón descendente, pero que sólo significa que las acciones cayeron de 100 a 99,6.
- 10.2** La respuesta es (e). La inversión en el acondicionador de aire es grande, en comparación con la de la compra de una estufa.
- 10.3** Si la lámpara es de 25 W y permanece encendida ocho horas diarias; y si la tostadora es de 1 kW y se la usa diez minutos diarios, gasta más la lámpara: 200 W.h diarios, mientras que la tostadora consume sólo 167 W.h por día. Eso equivale hoy a 1,8 y 1,5 pesos por bimestre, respectivamente.
- 10.4** Unos 1.300 kilómetros por segundo.
- 10.5** La aceleración de esa partícula es de $1,7 \times 10^{11}$ m/s².
- 10.6** La inducción vale diez militesla.
- 10.7** Si la reducción de la tensión es deliberada, y si el caso referido es habitual y extendido, resulta una situación irónica, en la que se intenta reducir el consumo, pero se consigue justamente lo opuesto. En cualquier

caso, conviene reemplazar los artefactos comunes por otros de arranque electrónico, más eficientes, y que también funcionan cuando la tensión de la red es baja.

CAPÍTULO 11

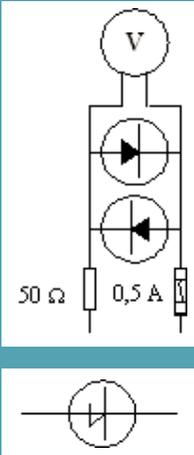
- 11.1** La cuenta es $200 \times 736 / 18.000 \times 500 \times 10^6 = 4 \times 10^{10}$ W; ó 40 gigawatt. Para hacer funcionar, fantásticamente, esa supuesta máquina, haría falta el triple de la potencia eléctrica desarrollada en toda la Argentina.
- 11.2** El factor μ vale 200; y la transconductancia s, 0,19 S (la primera cantidad no lleva unidades, la segunda está en siemen, antiguamente en mho).
- 11.3** En tal caso, la grilla no detendría ni controlaría el flujo de electrones, que estaría compuesto por la totalidad emitida por el cátodo. No habría amplificación.
- 11.4** Las semejanzas son que las dos, válvula y fototubo, son tubos de vidrio al vacío; ambas tienen ánodo y cátodo; en los dos aparatos circulan electrones a través del vacío desde el cátodo hacia el ánodo; y los dos inventos corresponden a momentos históricos cercanos en el tiempo. Las diferencias, que una tiene cátodo frío, y la otra caliente; la fotocélula tiene un a placa como cátodo y un alambre delgado como ánodo, mientras que en la válvula ocurre lo opuesto; y la válvula sirve para rectificar corriente alterna, mientras que la fotocélula se emplea para detectar luz.
- 11.5** Arco voltaico, luz eléctrica, lámpara de filamento; uso de lámparas incandescentes; rayos X; relatividad; 1GM; triodo; pentodo; computadora electrónica; 2GM; bomba atómica; MP3.
- 11.6** Una prueba muy simple es encender la lámpara durante algunos segundos, y tocar la ampolla. Si está más caliente arriba que abajo, es que adentro hay gas que entró en convección, o sea que subió el gas más caliente, y bajó el más frío. Otra prueba sería romper la lámpara, sumergida en un balde con agua. Si suben burbujas, es que había gas y no vacío. Otra prueba: se calienta la ampolla en la llama de una hornalla. Si el vidrio se hunde al ablandarse, es que adentro hay vacío. Si en cambio se levanta una am-

polla, hay gas (*advertencia: Los trozos de vidrio de la ampolla de la lámpara son cortantes, y podrían causar daños personales. Si se hacen las dos últimas pruebas, se recomienda el uso de guantes y anteojos.*)

12.5 El gráfico correcto es el b. Esa conexión de dos diodos Zener en oposición y en serie, espalda contra espalda (*back-to-back connection*), se conoce como circuito recortador, o *clipping circuit*.

CAPÍTULO 12

CAPÍTULO 13



12.1 Para proteger ese voltímetro, se le pueden poner dos pequeños diodos de silicio en paralelo, y en polaridades opuestas. Para tensiones de medio volt, o menores, los diodos no conducen, y el voltímetro opera normalmente. Para tensiones que superen 1 V, los diodos conducen, y limitan la tensión a ese valor, o poco más. Si la tensión errónea fuera muy grande, actuaría el fusible. El resistor no afecta mucho la indicación del voltímetro, y protege los diodos del exceso de corriente.

12.2 El diodo Shokley, o diodo de cuatro capas, cuyo símbolo es el de la figura, presenta una alta resistencia eléctrica en el sentido directo de conducción, pero cuando se supera un cierto valor de tensión, la resistencia del diodo disminuye abruptamente. Esa propiedad es útil para producir pulsos de corriente que disparan otros circuitos; o, si se carga un capacitor a través de un resistor en serie, y se lo descarga sobre un diodo Shokley, se obtiene un oscilador. Eso sirve, entre otras aplicaciones, para generar señales de radio con los llaveros que cierran las puertas de los coches, y activan la alarma, desde unos metros.

12.3 El costo de la energía que consumen esos tres tipos de lámparas es de ocho pesos, uno con sesenta, y cincuenta centavos bimestrales, respectivamente. Las lámparas de leds son energéticamente ventajosas.

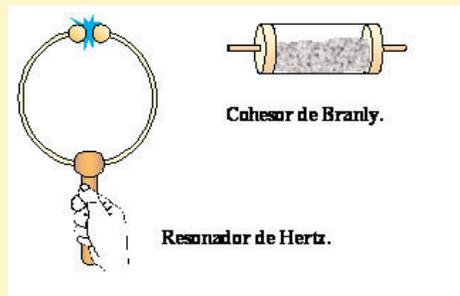
12.4 La anomalía obedece a que los diodos no son conductores perfectos en el sentido directo. Se comportan como aislantes hasta alcanzar la tensión directa de conducción, apenas inferior a la de la pila, y a partir de ella producen una caída de aproximadamente un volt por diodo.

13.1 El coeficiente beta de ese transistor vale aproximadamente 34. Para deducirlo, elegimos un valor cualquiera de la tensión entre el emisor y el colector, por ejemplo $V_{CE} = 3 \text{ V}$, y dos valores cualesquiera de la corriente de base, por ejemplo $I_B = 20 \mu\text{A}$ e $I_B = 120 \mu\text{A}$, y nos fijamos en el gráfico a qué corrientes de colector corresponden.

Son $I_C = 0,8 \text{ mA}$ e $I_C = 4,2 \text{ mA}$, o bien 800 y 4.200 microampere, respectivamente. Hacemos la cuenta $(4.200 - 800) / (120 - 20)$, y nos da 34: ése es el factor beta, o de amplificación.

13.2 Eso es imposible. Los coeficientes alfa y beta están relacionados con las fórmulas de la página 158 de este libro; si se sabe cuánto vale uno, se deduce cuánto vale el otro.

13.3 Las ondas electromagnéticas fueron predichas, teóricamente, por James Clerk Maxwell en 1864, y generadas y detectadas² por Heinrich Hertz en 1886. Para generar las ondas, hizo saltar chispas eléctricas. Para detectarlas, usó un aparato llamado *resonador*, que consistía en un aro con una abertura entre esferas. Cuando el resonador detectaba ondas, saltaban chispas entre las esferas. En 1884 Édouard Eugène Désièr Branly inventó un aparato que llamó *cohesor*, formado por un tubo de vidrio con lima-



² En rigor, y después del descubrimiento de Maxwell, cualquiera que encendiese una vela podía alardear de haber generado ondas electromagnéticas; y cualquiera que viese la llama podía decir, sin faltar a la verdad, que había conseguido detectarlas; puesto que la luz no es otra cosa que una onda electromagnética. Cuando hablamos de generar y detectar ondas electromagnéticas, nos referimos a fenómenos aparte de los luminosos.

duros sueltas y flojas de hierro y plata en su interior. Cuando llegaban ondas electromagnéticas, las partículas metálicas se acomodaban, y hacían buen contacto. Para usarlo por segunda vez había que sacudirlo, para que las partículas se desacomodaran.

- 13.4** La versión es teóricamente posible. Para almacenar un millón de millones de bytes, u 8 terabits, se requieren 16 billones de transistores, que si fueran del tamaño de un átomo, ocuparían un volumen total de $16 \times 10^{12} (10^{-10} \text{ m})^3$. Si a ese volumen le extraemos la raíz cúbica, tenemos el tamaño lineal del microcircuito; menos de tres micrones. El tiempo que tarda la luz en recorrer esa distancia es de $8,4 \times 10^{-15}$ segundos; por tanto en un segundo la luz puede ir y volver de un extremo a otro del procesador $0,6 \times 10^{14}$ veces, más veces que las declaradas, 10^{12} por segundo. Pero no sabemos si ese aparato ya se ha construido, esto es sólo una especulación de posibilidad teórica, pasa por alto las dificultades constructivas, y la disipación del calor.
- 13.5** La función de ese resistor es la de evitar que circule una corriente excesiva por las bases de los transistores, que podría dañarlos. Por ejemplo, si ese resistor fijo no estuviera, y si, con la intención de conseguir que la lámpara encienda apenas cae la tarde (y no bien entrada la noche), alguien pusiera el potenciómetro en su posición extrema izquierda, por las bases de los transistores circularía una corriente sólo limitada por la resistencia de la bobina del relé.

CAPÍTULO 14

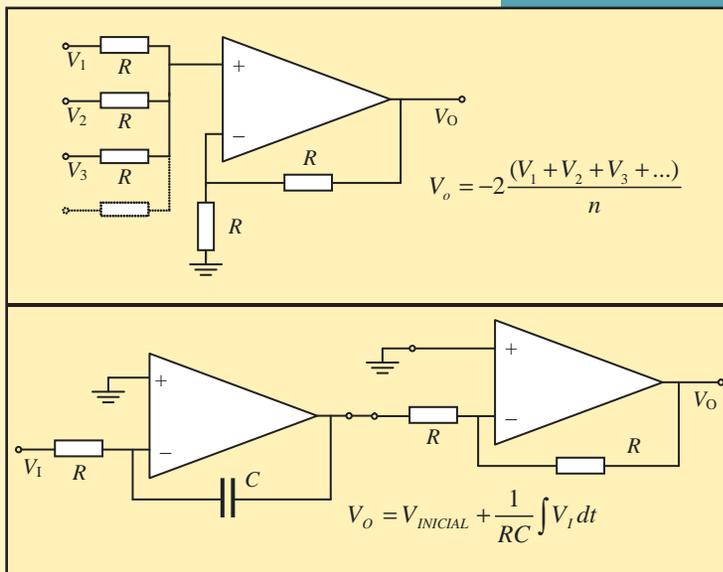
- 14.1** Sí se puede; de hecho un triac equivale a dos SCR. Pero en el caso de los dos diodos controlados, es necesario unir las dos compuertas en un único electrodo de control.
- 14.2** Esa marca rompe la simetría y permite identificar las patas de conexión, y distinguir las del led de entrada, de las del fototransistor de salida.
- 14.3** En tal caso, el aparato pierde toda su sensibilidad, porque ese plástico tiene unas lentes, y sin ellas no se forman imágenes sobre el sensor, cuyas dos mitades recibirán, en ese caso, igual radiación.
- 14.4** Tiene una banda marrón, otra negra y otra

verde. La cuarta banda, si es dorada, indica una tolerancia del cinco por ciento.

- 14.5** La respuesta es negativa. Los atenuadores de triac se basan en el control del ángulo, o fracción del período, en el que el componente conduce la corriente eléctrica. Con la batería de tensión continua la corriente no pasará por cero, entonces el atenuador mantendrá la luz siempre encendida, o siempre apagada.

CAPÍTULO 15

- 15.1** La tensión de salida vale +12 V. La trampa consiste en haber hecho el circuito con realimentación positiva en la entrada directa, cuando la conexión correcta debe tener realimentación negativa.
- 15.2** La tensión de salida es de 10 V, puesto que la ganancia del amplificador vale $100.000 \div 10 = 10.000$.
- 15.3** En tal caso, la tensión de salida sería de -12 V. La aplicación irreflexiva de la fórmula arroja -30 V, pero el operacional no puede entregar más tensión que la que recibe como alimentación.
- 15.4** La figura da la respuesta. La fórmula es algo más compleja que la del sumador inversor. El número n representa la cantidad de tensiones que se suman. Para interpretar el circuito, consideremos que las entradas no toman corriente; entonces



ces en la entrada directa aparece una tensión igual al promedio de las tensiones que hay en los otros extremos de los resistores. En la entrada inversora la tensión es la misma, y además vale la mitad de la tensión de salida, porque está tomada del punto medio de una serie de dos resistores de igual resistencia, conectada entre la salida y tierra.

- 15.5** Para obtener un integrador sin inversión existen soluciones con un único amplificador operacional; pero por sencillez de interpretación, proponemos el uso de un integrador inversor, con el agregado, a la salida, de un amplificador inversor de ganancia unitaria.

CAPÍTULO 16

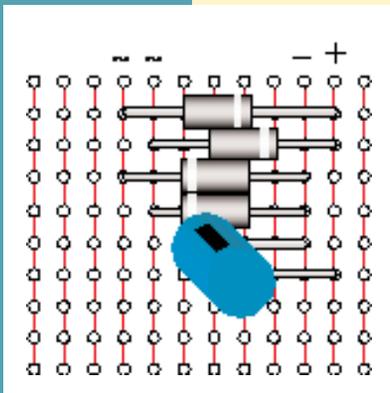
- 16.1** Pueden obtener la respuesta por dos métodos diferentes; uno es hacer el cálculo, y el otro consiste en extraer el dato de la escala del multímetro reproducida en este capítulo, sin hacer cuentas.

- Esa tensión de 220 V equivale a 49 decibelios. La cuenta es: $10 \times \log_{10} ((220/0,775)^2)$, donde 0,775 V sale de $\sqrt{(0,001 \text{ mW} \times 600 \Omega)}$.

- 16.2** Una forma de conseguir lo pedido, es la de la figura. Las líneas onduladas indican la entrada de la tensión alterna, y los signos + y -, la salida de continua filtrada.

- 16.3** Naturalmente, el multímetro marca menos tensión de la que hay entre los bornes de la batería, porque está el resistor de un megohm en serie, y en él se produce una importante caída de tensión. Las resistencias del multímetro en cada escala valen, respectivamente, y según lo dicho en la página 3 de este capítulo, 50 k Ω , 1 M Ω , 5 M Ω y

20 M Ω . Las tensiones leídas valen $U_L = 9V \times R / (R + 1 \text{ M}\Omega)$; y eso da, para cada uno de los valores de la resistencia interna del multímetro, 0,43 V; 4,5 V, 7,5 V y 8,57 V. Es sorprendente, para quien experimenta ese efecto por primera vez, que la tensión medida depende de la escala en la que se encuentra el instrumento; eso indica a las claras que hay una gran resistencia en serie.



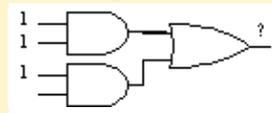
- 1.** Entre las muchas maneras que hay de aislar esas vibraciones de mucha frecuencia, una es poner un capacitor en paralelo con la bobina del sismógrafo, o incluso agregar un filtro activo pasabajos, como el descrito en el capítulo 15. Otra forma, sería montar el sismógrafo sobre resortes de elasticidad apropiada; no demasiado blanda, de modo que sólo transmitan los movimientos lentos, y absorban las vibraciones rápidas, como lo hace la suspensión de un coche.

- 2.** Los instrumentos analógicos muchas veces dan más información que los digitales. Por ejemplo, si ponemos un multímetro en la escala de 50 V y le aplicamos 220 V, la aguja dará un salto muy brusco, y nos dirá que excedimos en mucho el rango. Hasta es posible que sintamos en la mano el golpe de la aguja contra el tope de la escala. Un instrumento digital sólo indicará, con algún signo, el rango excedido. Aparte de eso, si una tensión aumenta al doble, veremos cómo la aguja duplica su ángulo con respecto al cero. Un aparato digital nos dirá lo mismo, pero hay que pensar, e interpretar los números que indica. Otro ejemplo: si seleccionamos una escala de tensión continua y aplicamos alterna, la aguja se verá borrosa, por las vibraciones. El aparato digital marcará cero, o valores erráticos, sin tanta información.

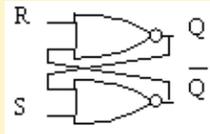
CAPÍTULO 17

- 17.1** Binario: 0, 1, 10, 11, 100, 101, 110, 111, 1000, 1001, 1010, 1011, 1100, 1101, 1110, 1111, 10000, 10001, 10010, 10011, 10010. Tetral: 0, 1, 2, 3, 10, 11, 12, 13, 20, 21, 22, 23, 30, 31, 32, 33, 100, 101, 102, 103, 110. Octal: 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 20, 21, 22, 23, 24. Hexadecimal: 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, A, B, C, D, E, F, 10, 11, 12, 13, 14.

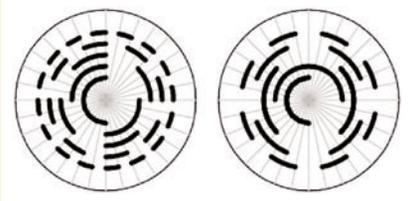
- 17.2** El valor lógico de salida es igual a 1. la compuerta AND de arriba a la izquierda cumple la condición de entradas, entonces entrega un 1 a la salida, y eso hace que la compuerta OR, de la derecha, provea un 1, no importa qué es lo que haga la compuerta AND de abajo.



17.3 Supongamos que Q es verdadera; entonces la compuerta inferior tiene activa una entrada. Por consiguiente, su salida es falsa. Si no se alimenta R, la compuerta superior confirma su valor verdadero de salida. Lo mismo ocurre con la suposición opuesta. Pero cuando entra una señal por R, la salida de la compuerta superior cae a cero, lo que hace que se active la salida de la compuerta inferior. Los comandos Set y Reset actúan, en este caso, como directos, y no con inversión.



17.4 El disco de la derecha responde al código Gray, porque no hay ningún radio que toque a la vez dos extremos de segmento angular.



17.5 En tal caso, enciende el signo del dígito siete.

CAPÍTULO 18

18.1 De acuerdo con la fórmula dada en el capítulo, la fuerza vale 8,85 N, casi un kilogramo.

18.2 La fuerza hallada, repartida en un área de 0,0001 m², representa una presión de 88.500 pascales, ó 0,0885 megapascales. La relación entre ese valor y el módulo de elasticidad, es del cuatro y medio por ciento. Por otra parte, quinientas veces una décima de milímetro son 50 mm de elastómero, y el cuatro y medio por ciento de esa cantidad, es 2,2 mm; esa distancia es la que se acorta el actuador o músculo.

18.3 Donde hay poca iluminación conviene usar un material que produzca luz, y no que cambie su transparencia; por eso es preferible una pantalla de led, o de oled. Una lcd sólo verá sólo si está provista de iluminación posterior, como la tienen casi todas las pantallas de computadora basadas en esa tecnología.

18.4 Se puede hallar esa clase de material en la espalda de los relojes pulsera, donde cumple la función de transductor de sonido para la alarma del reloj; también en encendedores de chispa de los que no usan rueda ni piedra, y que generan electricidad cuando reciben un golpe.

CAPÍTULO 19

19.1 De acuerdo con la fórmula que cuantifica el efecto Casimir, que figura en el capítulo 19 y se reproduce abajo, esa fuerza vale cerca de 1,3×10⁻¹⁵ N. Es un valor muy pequeño, que corresponde a una presión de 1,3×10⁻¹⁵ pascales, ó 1,3×10⁻²⁰ atmósferas.

$$F_c = \pi \hbar c \frac{A}{480 d^4}$$

19.2

$$U = \frac{2}{3} d \sqrt{\frac{2kd}{3\epsilon_0 A}}$$

- Si despejamos la constante k de la fórmula, resulta:

$$k = \frac{27}{8} \frac{U^2 \epsilon_0 A}{d^3}$$

Los datos son: $U = 100$ V; $A = 1000 \mu^2$ (que resultan de multiplicar el largo de la lengüeta, por su ancho); tenemos entonces, que la constante elástica vale aproximadamente $k = 37,35$ N/m.

Aunque el enunciado no lo pide, deducimos, a partir de la separación, o carrera, de la lengüeta, de dos micrones, que la fuerza que hace ese relé vale unos 75 millonésimas de newton; menos de ocho miligramos. (Es el producto de la constante elástica, por la carrera.) Por otra parte, el peso de la lengüeta, si fuera de bronce de densidad 8 veces la del agua; esto es, 8.000 km/m³, sería de apenas 0,16 nanogramos. La fuerza que hace el relé, que parecía muy pequeña, es millones de veces mayor que el peso de su parte móvil. El peso no cuenta en la pequeña escala.

19.3 Tenemos en cuenta que el módulo de elasticidad, conocido también como módulo de Young, Y , se da en pascuales (N/m^2), o, lo que es lo mismo, en $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s}^2)$. Sus dimensiones son, entonces $\text{M}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{T}^{-2}$. La densidad, en cambio, tiene dimensiones $\text{M}\cdot\text{L}^{-3}$, mientras que las dimensiones de la velocidad son $\text{L}\cdot\text{T}^{-1}$.

$$v = Y^\alpha \rho^\beta$$

$$\text{L}\cdot\text{T}^{-1} = \text{M}^\alpha \cdot \text{L}^{-\alpha} \cdot \text{T}^{-2\alpha} \cdot \text{M}^\beta \cdot \text{L}^{-3\beta}$$

De lo que se deduce: $1 = -\alpha - 3\beta$; $-1 = -2\alpha$.
Y de ahí surge que $\alpha = 1/2$, y que $\beta = -1/2$.
La fórmula de la velocidad del sonido en un sólido resulta, entonces:

$$v = \sqrt{\frac{Y}{\rho}}$$

La deducción a partir de argumentos físicos coincide con este resultado, no hay que agregar una constante adimensional diferente de la unidad.

19.4 Se suele criticar a la nanotecnología, lo mismo que a la biotecnología, el empleo peligroso de técnicas de las que no se conocen con certeza sus efectos finales; y también el que se las aplique en beneficio de grandes intereses mezquinos, y aun bélicos. Pero cualquier tecnología, desde la primitiva siderurgia, que se podía emplear tanto en la fabricación de arados, como en la de cañones, tiene sus riesgos de producir daños al medio ambiente, a la salud y al bienestar humano; aparte de los usos bélicos que se le puedan dar, y de su empleo deliberado para destruir o dañar con fines egoístas. Como la nanotecnología surgió en la última década del siglo XX, no hay todavía, a comienzos del siglo XXI, leyes ni acuerdos internacionales que establezcan claros límites éticos en su desarrollo; como sí se discuten, en cambio, en relación con la manipulación genética de plantas, animales y seres humanos, algo más antigua. Todo lo que podemos recomendar a los estudiantes, tecnólogos y científicos en for-

mación, es que tengan presentes, como siempre, el riesgo de manipular fuerzas de alcance desconocido, y el de generar injustas diferencias de acceso a las ventajas de las técnicas, por parte de sectores ricos y pobres de la sociedad.

CAPÍTULO 20

20.1 La razón por la que abundan los reclamos por las torres, quizá sea su falta de estética, o que se instalan sin el consentimiento del vecindario; y en muchos casos, porque se ignore el efecto que producen las ondas de telefonía en el organismo, en comparación con las de otros artefactos de uso diario. En cambio, pocos se quejan de los celulares, por la libertad individual que hay para usarlos, o para prescindir de ellos.

20.2 Algunos municipios aceptan ese argumento, y prohíben que se instalen ciertas antenas en edificios que hayan declarado su valor patrimonial. De todos modos, es difícil juzgar la validez de reclamos basados en la disminución subjetiva del valor de una propiedad. En la misma línea de argumentación, alguien podría oponerse a que ingrese como inquilino una persona, en función de su nacionalidad, etnia o aspecto físico, con el argumento de que su presencia en el edificio disminuiría el valor de la propiedad frente a posibles compradores con prejuicios; y tal reclamo sería inaceptable. Todo lo que se puede recomendar, desde este libro, es estudiar y difundir las implicaciones técnicas de las instalaciones, para que las decisiones que se tomen estén bien fundadas.

20.3 Si aceptamos, de acuerdo con las regulaciones, una densidad de potencia máxima de 1 mW/cm^2 , y suponemos que la antena irradia uniformemente en todas direcciones³ debemos repartir los 25 kW , equivalentes a 25.000 W , y a 25 millones de milwatt, en una superficie 25 millones de centímetros cuadrados. El área de una esfera vale $4\pi R^2$; resulta entonces $R = (1/2) \times \sqrt{(25 \times 10^6 \text{ cm}^2/\pi)}$,

³ Las antenas de radio se diseñan para transmitir más intensamente en la dirección horizontal; y en algunos casos, más en una dirección geográfica que en otra, según las zonas a las que se quiere llegar, que dependen de la densidad de población, y de sus características.

y eso da 1.410,474 centímetros, o 14,2 metros. La antena de esa radio tiene que estar más alta que la de una torre de telefonía celular.⁴

20.4 La luz tiene una longitud de onda de medio micrón, o de un micrón, y pasa perfecta-

mente por los pequeños agujeros de la reja que cubre el vidrio de la tapa, cuya abertura es de aproximadamente un milímetro, o mil longitudes de onda de la radiación visible. En cambio, las microondas miden unos 12 centímetros, y no atraviesan la reja.

⁴ El estudiante, o la estudiante, que no recuerde la fórmula del área de una esfera, puede imaginar, en cambio, un cubo. Y como 25 millones de centímetros cuadrados dividido entre las seis caras del cubo, da 4.166.667 centímetros cuadrados por cada cara, se concluye que cada una tiene 2.041,242 centímetros de lado. El centro de ese cubo imaginario está aproximadamente a 10 metros del centro de una de sus caras, y a unos 17 metros de cada vértice. Si se promedian esos valores, se obtiene una solución no demasiado diferente de la exacta para el caso de radiación uniforme en todas las direcciones.

Glosario general

CAPÍTULO 1

ELECTRÓN. Partícula elemental constituyente del átomo y que rodea su núcleo. Es de carga negativa. Durante breve tiempo pueden existir también electrones de carga positiva, llamados *positrones*.

NEUTRÓN. Partícula elemental constituyente del núcleo del átomo, de carga positiva, y de masa aproximadamente 1.836 veces mayor que la del electrón.

COULOMB. Unidad de carga eléctrica en el Sistema Internacional de unidades (SI), equivalente a la carga conjunta de 6,24150975 trillones de electrones, o de protones. Se simboliza C.

FARADAY. Antigua unidad de carga eléctrica, equivalente a 96.485,3415 C, o a un mol de electrones.

MOL. Unidad internacional de cantidad de materia, equivalente a $6,0221415 \times 10^{23}$ partículas. Es la cantidad de átomos de carbono 12 que hay en 12 gramos de ese elemento químico.

UES. Unidad electrostática de carga, llamada también *statcoulomb* y *franklin*. 2.997.924.580 ues equivalen a un coulomb.¹

FRANKLIN. Véase ues.

STATCOULOMB. Véase ues.

AMPERE. Unidad internacional de corriente eléctrica, equivalente a la circulación de un coulomb por segundo.

MAXWELL, JAMES CLERK (1831–1879). Físico escocés, considerado uno de los más brillantes de la historia. A partir de los trabajos experimen-

tales y conjeturas de Michael Faraday, explicó matemáticamente la electricidad y el magnetismo, y demostró que la luz es una onda electromagnética.

LÍNEAS DE CAMPO. Líneas imaginarias a lo largo de las cuales actúan las fuerzas de interacción eléctrica, magnética y gravitatoria. Es una idea propuesta por Michael Faraday.

POLARIZACIÓN. Separación de las cargas eléctricas, según su polaridad.

VOLT. Unidad de potencial eléctrico en el Sistema Internacional de Unidades. Equivale a un joule de energía por cada coulomb de carga.

CAPACITOR. Objeto con dos conexiones o terminales, construido con el fin de almacenar en él cargas eléctricas opuestas. Se llama también *condensador*.

DIeléCTRICO. Material aislante de la electricidad, por ejemplo el que separa las placas conductoras de un capacitor.

ELECTROLÍTICO. Relacionado con los *electrólitos* o *electrolitos*. Un electrólito es un líquido que conduce la electricidad.

POLARIZADO, -A. Que se polariza. En relación con los capacitores, se dice de los que se pueden conectar sólo en una de las dos polaridades, ya que si se intercambia el positivo con el negativo, ese capacitor no funciona, o se estropea.

CAPACITANCIA. Magnitud física dada por el cociente entre la carga de un capacitor, y la diferencia de potencial entre sus terminales. También se llama *capacidad*.

¹ Nótese que 299.192.458 metros por segundo, la velocidad de la luz en el vacío, tiene las mismas cifras significativas que las de esa constante de conversión de unidades. James Clerk Maxwell descubrió en 1864 que la electricidad y el magnetismo están muy relacionados entre sí, y con la luz.

— **PARCIAL**. La de un solo componente de un circuito

— **CONJUNTA, TOTAL, O EQUIVALENTE**. La del conjunto de todos los componentes, en la conexión que tengan.

FARAD. Unidad de capacitancia. Un farad es la capacitancia de un capacitor que cuando almacena cargas de un coulomb, la diferencia de potencial (o tensión) entre sus extremos, es de un volt. Su símbolo es F.

MICRO. Prefijo que significa un millonésimo. Se simboliza con la letra griega mu minúscula, μ .

NANO. Prefijo que significa un milmillonésimo. Se simboliza con *n*.

PICO. Prefijo que significa un billonésimo.² Se simboliza con *p*.

ϵ_0 (**ÉPSILON SUB-CERO**). Permitividad dieléctrica del vacío. El valor $1/(4\pi\epsilon_0)$ es la *constante electrostática* de la ley de Coulomb. Su valor es de $8,8551878176... \times 10^{-12}$ F/m.

ϵ_r (**ÉPSILON SUB-ERRE**). Permitividad dieléctrica relativa de un material, igual al cociente entre su permitividad, y la del vacío. Carece de unidades.

MICRÓN, O MICRA. Millonésima parte de un metro, o milésima de milímetro.

PISTÓN. Objeto cilíndrico que desliza dentro de un cilindro, como el de una bomba, el de un motor de automóvil, o el de una jeringa hipodérmica.

PARALELO (EN). Conexión de varios objetos de modo que entre los terminales de todos ellos hay siempre la misma tensión, que es además la del conjunto.

SERIE (EN). Conexión de varios objetos de modo que por todos ellos circula la misma corriente, que es además la que circula por el conjunto.

ELASTANCIA. Inversa de la capacitancia. Su nombre proviene de similitudes de tratamiento matemático entre esa magnitud y la elasticidad de un resorte.

PERMITIVIDAD. Magnitud física que da cuenta de cuánto se polariza un material en presencia de un campo eléctrico.

CAPÍTULO 3

FRANKLIN, BENJAMÍN. Político y científico estadounidense (1706–1790), inventor del pararra-

yos, las lentes bifocales y el catéter urinario flexible. Luchó por la independencia de su patria, y fue gobernador de Pennsylvania.

RADIOACTIVO. Material que emite rayos alfa, beta y gamma como consecuencia de la desintegración de los núcleos de sus átomos. Los rayos alfa son núcleos de helio; los beta, electrones; y los rayos gamma son cuantos, o paquetes de energía, de ondas electromagnéticas.

CIERNES (EN). Inminente, que está por ocurrir, o que se está gestando

DESCARGADOR. Aparato que ofrece una vía de descarga a las cargas eléctricas acumuladas, para evitar que la tensión eléctrica crezca demasiado y dañe un equipo eléctrico o una instalación.

CALZADO CONDUCTOR. Zapatos de suela de goma conductora (por ejemplo, por tener mucho negro de humo en su composición), que evitan que quien los calza acumule cargas electrostáticas excesivas.

ELECTROGRAFÍA. Arte de producir imágenes con descargas eléctricas que velan parcialmente los negativos y positivos fotográficos.

KIRLIAN (SEMYON DAVIDOVITCH). Ingeniero electricista soviético (1898–1978), sobresaliente en la reparación y desarrollo de aparatos de laboratorio, e inventor de las electrografía de alta frecuencia. Alcanzó fama cuando interpretó las imágenes como una supuesta aura, o alma de los seres vivos.

EFFECTO KIRLIAN. Electrografía realizada con tensiones de miles de voltios, y centenares de hertz de frecuencia. Los objetos conductores, como un dedo, o una hoja verde, aparecen rodeados de un fulgor.

GIGAWATT, O GIGAVATIO. Mil millones de watt, o vatios.

KILOTÓN. Energía equivalente a la que se libera en el estallido de mil toneladas de TNT. Esa unidad, y el megatón, se usan para hablar del poder destructivo de las armas nucleares.

TRINITROTOLENO, O TNT. Sustancia química de fórmula $C_6H_2(NO_2)_3CH_3$, inventada en 1863 como colorante amarillo, hasta que años después se descubrieron sus propiedades explosivas útiles en minería.

² En los Estados Unidos de América ese prefijo tiene nuestro mismo significado, pero allá dicen que *one pico* es *one trillionth*; y que *one nano* es *one billionth*.

DESPRESURIZAR. Disminuir la presión de un gas, por ejemplo cuando se abre un tanque de aire comprimido, o cuando se reduce la presión de la cabina de pasajeros de un avión.

CAPÍTULO 6

CONDUCTOR. Material que conduce mucho la electricidad.

AISLANTE. Material que conduce muy poco la electricidad, o no la conduce.

SEMICONDUCTOR. En el ambiente eléctrico, material de propiedades intermedias entre las de los conductores y las de los aislantes. En el ámbito electrónico, ciertos materiales que conducen la electricidad cuando reciben señales eléctricas, ópticas o de otro tipo.

TRAFILAR. Hacer que un material pase a través de un agujero, para convertirlo en alambre.

ANODIZAR. (de *ánodo*). Sumergir un cuerpo en un líquido, conectarlo al polo positivo y hacerle pasar corriente, para cubrir su superficie con una capa protectora de otro material.

RESISTIVIDAD. Magnitud física que caracteriza la dificultad de los materiales para conducir la corriente eléctrica. Se indica con la letra griega minúscula ρ , ρ . Se calcula como el producto de la resistencia del cuerpo, por el área transversal, dividida por la longitud, y se mide en $\Omega \cdot m$. Su inversa es la conductividad, y se expresa en S/m.

CONDUCTANCIA. Magnitud física inversa de la resistencia. Se indica con la letra G, y se mide en siemens.

LEVITACIÓN MAGNÉTICA. Efecto por el cual un cuerpo se mantiene suspendido sobre otro, a causa de fuerzas magnéticas.³

PICOCOULOMB. Billonésima parte de un coulomb; esto es, 0,000 000 000 001 C.

POLIMERIZAR. Unir las moléculas relativamente chicas de un material (llamado *monómero*), para formar moléculas mucho mayores, las del polímero.

RESINAS EPÓXICAS. Familia de polímeros sintéticos provenientes de la reacción entre la epícloridina y el bisfenol. Los enganches entre las moléculas de monómero los proveen átomos de oxígeno. La palabra epoxi significa, justa-

mente, puente de oxígeno.

CAPÍTULO 7

MAGNETOSOMA. Cada una de las partículas de magnetita que sintetizan ciertas bacterias anaeróbicas, y que les sirven para orientarse en el campo magnético terrestre.

FERROMAGNÉTICO. Se dice del material que, como el hierro, es capaz de retener el magnetismo.

PARAMAGNÉTICO. Material que no retiene el magnetismo.

DIAMAGNÉTICO. Material que rechaza un imán, en vez de atraerlo como al hierro.

TEMPERATURA DE CURIE. Temperatura por encima de la cual las propiedades ferromagnéticas de un material desaparecen, y se torna paramagnético.

LÍNEA DE CAMPO LOCAL. La que pasa por el punto que se está considerando, y que indica, en ese sitio, la dirección del campo.

ELASTÓMERO. Polímero elástico. Las moléculas muy grandes de un polímero resultan de la unión de moléculas menores, las del *monómero*.

DEMAGNETIZACIÓN, O DESMAGNETIZACIÓN, ADIABÁTICA. Procedimiento por el cual se alcanzaron temperaturas tan bajas como un milésimo de kelvin. Consiste en magnetizar un cuerpo, esperar que se enfríe, y quitarle el magnetismo, para que su temperatura disminuya aun más. Adiabático significa que no intercambia calor.

UNIVERSIDAD DE MASSACHUSETTS. Centro público de estudio e investigación, fundado en 1883 en el estado del mismo nombre de la Unión, y compuesto por cinco casas asociadas.

ESPÍN. Magnitud física de carácter cuántico, asociada a las partículas elementales, como el electrón, y que se interpreta como un movimiento de giro.

DIPOLO. Conjunto de dos polos. En el magnetismo, elemento mínimo de magnetización, puesto que no existen polos magnéticos únicos o aislados.

WEISS, PIERRE. Investigador francés creador de la teoría de los dominios magnéticos.

DOMINIO MAGNÉTICO. Región de un material en la que los dipolos elementales comparten la di-

³ Aunque el Diccionario dice que levitar es elevarse en el espacio sin que intervengan agentes físicos, ese término tomado de la fantasía tiene hoy un significado más amplio, que incluye fenómenos verdaderos.

rección de magnetización, diferente de la de los dominios vecinos.

HALL, EDWIN DUNTEY. Investigador estadounidense descubridor del efecto por el cual, cuando se somete a un campo magnético un conductor por el que circula corriente, aparece una tensión entre sus bordes laterales.

EFFECTO HALL CUÁNTICO. Útil variedad del efecto Hall, mucho más intenso que el descubierta por E. H. Hall, y llamado así porque lo explica la física cuántica.

CAPÍTULO 8

INDUCCIÓN MAGNÉTICA. 1). Efecto por el que los imanes, o una corriente, induce magnetismo en un material. 2). Nombre de la magnitud física *densidad de flujo magnético*, expresada en tesla, o weber por metro cuadrado.

OERSTED, HANS CHRISTIAN (1777–1851). Físico y químico danés, hijo de farmacéuta, estudioso de la electricidad y el magnetismo. Fue el primero en publicar experimentos que muestran la influencia entre ambos fenómenos.

PRINCIPIO GENERADOR. Efecto por el cual en un conductor se induce una fuerza electromotriz, cuando cruza líneas de campo magnético.

PRINCIPIO MOTOR. Efecto por el cual sobre un conductor aparece una fuerza, cuando por él circula corriente, y además está sometido a un campo magnético.

TESLA. Unidad de inducción magnética, o de densidad de flujo, en el sistema internacional de unidades (SI) y en el Sistema Métrico Legal Argentino (SIMELA). Un tesla es la inducción que produce, a un metro de distancia, un conductor recto y de longitud muy grande (idealmente infinita), por el que circule medio ampere.

LEY DE LORENTZ. Expresión matemática de la fuerza que ejerce el campo magnético sobre una corriente eléctrica, o sobre una carga en movimiento. Esa fuerza es perpendicular al campo y a la corriente; o bien, al campo y a la velocidad de la carga.

TRAFÓ. Nombre familiar y abreviado del transformador, en la jerga de los especialistas en electricidad.

AUTOINDUCCIÓN. Inducción de una fuerza electromotriz en el propio conductor por el que pasa una corriente variable.

LENZ, HEINRICH FRIEDRICH EMIL (1804–1865). Científico nacido en lo que hoy es Estonia, entonces Alemania del Báltico. Investigó en oceanografía, enseñó física y matemática, y propuso un enunciado sugestivo a la ley que establece la polaridad de una fuerza electromotriz inducida: *Los efectos se oponen a sus causas*.

LEY DE BIOT Y SAVART. Expresión matemática de la contribución a la densidad de flujo (o inducción magnética) en un punto del espacio, de cada segmento de un conductor por el que circula corriente.

PERMEABILIDAD MAGNÉTICA DEL VACÍO. Propiedad del espacio, que en conjunto con la permitividad dieléctrica del vacío, caracteriza la electrodinámica, y la vincula con la óptica. El concepto fue definido por Faraday, y precisado por Maxwell. Su magnitud es de $4\pi \times 10^{-7}$ unidades tesla por metro.

MU SUB CERO. Sonido castellano del símbolo μ_0 , correspondiente a la permeabilidad magnética del vacío.

SOLENOIDE. 1). *adj.* Con forma de tubo. 2). *m.* Bobina de forma tubular, como una serpentina.

TOROIDE. 1). *adj.* con forma de toro. 2). *m.* Bobina (o núcleo de bobina) con forma de toro, nombre de la forma geométrica engendrada en el espacio por una circunferencia cuyo centro se desplaza por otra circunferencia perpendicular. El nombre proviene de un antiguo juego mexicano, parecido al nuestro del sapo, en el que se arrojaban unas rosquillas de trapo a las astas de una cabeza de toro embalsamada, con el fin de ensartarlas.

RELUCTANCIA. Magnitud física, expresada en inversas de henry, que da cuenta de la oposición que ofrece un circuito magnético al flujo. Su valor es igual al cociente entre la longitud del circuito, y el producto entre la sección y la permeabilidad.

RELÉ. (Del inglés *relay*). Relevo de contactos. Dispositivo electromecánico con una bobina que, cuando pasa corriente por ella, magnetiza un núcleo, el núcleo atrae una pieza móvil fija a contactos móviles, que se cierran o se abren.

CAPÍTULO 9

TERRELA. Nombre que dio William Gilbert, en su

libro De Magneta, a los modelos de Tierra magnética que hizo con imanes y arcilla. También usó el nombre *telera*.

ALLAN M. CORMACK Y GODFREY N. HOUNSFIELD. Físico el primero, e ingeniero electrónico el segundo, ganadores del Premio Nobel de Medicina en 1979, por el desarrollo del tomógrafo axial computarizado.

TOMÓGRAFO AXIAL COMPUTARIZADO. Aparato, usado principalmente en diagnóstico médico, que obtiene imágenes de las secciones transversales de un cuerpo.

MAGNETISMO. Fenómeno físico por el cual se producen fuerzas entre los imanes, o bien entre estos y las corrientes eléctricas, y también entre las corrientes solas, y cargas en movimiento.

TOMOGRAFÍA. Obtención de imágenes semejantes a las que resultan de cortar un cuerpo.

JOHANN RADON (1887-1956). Matemático austriaco que resolvió el problema de cómo reconstruir una imagen de dos dimensiones, a partir de un conjunto de suficientes ecuaciones de la absorción de cada elemento de superficie, a lo largo de rectas que pertenecen a esa superficie.

RMN (RESONANCIA MAGNÉTICA NUCLEAR). Técnica utilizada principalmente en el diagnóstico médico, basada en la aplicación de campos magnéticos y radiaciones que no son ionizantes.

CAMPO MAGNÉTICO. Lugar del espacio en el que se manifiestan fuerzas magnéticas de imanes, corrientes, o cargas en movimiento; y, más modernamente, efectos de los imanes, corrientes y cargas móviles.

ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS IONIZANTES. Aquéllas que ionizan la materia sobre la que inciden, es decir, que desarman sus moléculas, o arrancan electrones de los átomos; por ejemplo la luz ultravioleta, los rayos X, alfa, beta y gamma.

PALEOMAGNETISMO. Parte de la geología que estudia la intensidad, dirección y sentido del campo magnético terrestre, en épocas pasadas.

SQUID (SUPERCONDUCTING QUANTUM INTERFERENCE DEVICE). Dispositivo superconductor de interferencia cuántica. Aparato muy sensible para medir campos magnéticos débiles, basado en el efecto del campo en la circulación de una

corriente por un superconductor.

POLARIDAD NORMAL. Así se nombra la polaridad actual del campo magnético terrestre, por corresponder a la época contemporánea.

ERA, EÓN, PERÍODO, ÉPOCA, CRON, SUBCRÓN. Términos geológicos que designan periodos de tiempo. La edad de la Tierra se clasifica en cinco eras geológicas; cada una e ellas, en periodos; y éstos en épocas. Un eón es mil millones de años; un cron, un millón de años, y un subcrón, un período más breve de interés particular.

SUPERCONDUCTOR. Material que en determinadas condiciones de temperatura, densidad de corriente y campo magnético al que se lo somete, carece por completo de resistencia eléctrica.

INDUCCIÓN MAGNÉTICA MÁXIMA DE UN SUPERCONDUCTOR. Valor máximo de la inducción a la que se puede someter un superconductor, para que lo siga siendo.

EFFECTO MESSNIER. Efecto por el cual cuando un material se vuelve superconductor, expulsa por completo el campo magnético de su interior, y si ya era superconductor, no permite que le entre el campo.

FERROMAGNÉTICO. Se dice del material que, como el hierro, es capaz de retener el magnetismo. *(Ya está en el glosario del capítulo 7.)*

PARAMAGNÉTICO. Material que no retiene el magnetismo. *(Ya está en el glosario del capítulo 7.)*

DIAMAGNÉTICO. Material que rechaza un imán, en vez de atraerlo como al hierro. *(Ya está en el glosario del capítulo 7.)*

HISTÉRESIS MAGNÉTICA. Efecto por el cual la inducción magnética de un material depende no sólo de la intensidad del campo magnético al que se lo somete, sino también de los valores anteriores a los que estuvo sometido.

MAGNETOESTRICTIVOS. Material que se encoge cuando se le aplica un campo magnético.

MAGNETORRESISTIVOS. Material cuya resistencia eléctrica varía, según el campo magnético al que se lo somete.

MAGNETOÓPTICO. Material cuyas propiedades ópticas varían con el magnetismo al que se lo somete.

MAGNETOCALÓRICO. Material que se enfría cuando se le quita el campo magnético al que estaba sometido.

MEMORIA DE TOROS. Antiguo dispositivo de alma-

cenamiento de datos, basado en anillos ferromagnéticos enhebrados en conductores eléctricos. Los pulsos magnetizan y desmagnetizan esos anillos.

PULSO DE CORRIENTE. Corriente de muy breve duración; en computación, de milmillonésimas de segundo.

CAPÍTULO 10

RESINA EPOXICICLOALIFÁTICA. Polímero desarrollado en 1930, apropiado para la fabricación de aisladores que brindan servicio a la intemperie. Cicloalifática, o alicíclica, es una de las clases de moléculas orgánicas en forma de anillo cerrado; otra es la aromática.

ECOLOGÍA. 1). Ciencia que estudia los seres vivos en relación entre sí, y con el medio ambiente. 2). Cuidado de la vida y del medio ambiente.

PCB. Policlorobifenilo; familia de sustancias de buenas propiedades aislantes de la electricidad, y que se usaban en los transformadores antes de que preocupase su toxicidad. Sus moléculas son las 209 combinaciones de átomos que se pueden hacer de modo que resulten unidos dos anillos bencénicos, en los cuales al menos uno de los átomos de hidrógeno se reemplaza por uno de cloro.

IONIZAR. Producir iones. (*Repite el glosario del capítulo 2*).

MICROTESLA. Millonésima parte de la unidad tesla de inducción magnética. (*Véase tesla en el glosario del capítulo 8*).

REACTOR, REACTANCIA O BALASTO. Bobina con núcleo de hierro que se pone en serie con ciertos tubos fluorescentes y lámparas de mercurio, para limitar la corriente.

DEUTERIO. Variedad, o isótopo, del hidrógeno, cuyos átomos tienen, cada uno, un protón, un neutrón y un electrón.

HELIO. Elemento químico descubierto en el Sol antes que en la Tierra (de ahí su nombre, que significa Sol en griego), cuyos átomos están compuestos por dos protones, dos neutrones y dos electrones. (En suma, un helio se compone de dos deuterios.)

CÁMARA TOROIDAL. Recinto cerrado en forma de toro. El toro es la forma geométrica de una rosquilla, o una cámara de neumático de coche.

El nombre deriva de un antiguo juego mexicano, semejante al nuestro del sapo, en el que se arrojaban rosquillas de trapo a una cabeza de toro embalsamada, para ensartarlas en las astas.

PARAMAGNÉTICO. Material que no retiene el magnetismo. (*Ya está en los glosarios de los capítulos 7 y 9*).

CAPÍTULO 11

VÁLVULA TERMoeLECTRÓNICA. Ampolla de vidrio cerrada al vacío, con un filamento en su interior que se pone incandescente con el paso de una corriente eléctrica; además una placa, y a veces varios electrodos en forma de rejilla. Su nombre proviene de que deja pasar la corriente en un solo sentido.

VÁLVULA TERMOIÓNICA. 1). Válvula con gas en su interior, cuyos iones intervienen en la conducción. 2). Nombre que se dio a la válvula termoelectrónica cuando se creía que la corriente entre el cátodo y el ánodo se debía al movimiento de iones de carbono.

DIODO. Dispositivo eléctrico que posee dos contactos o electrodos, y que hasta determinados valores de la tensión, deja pasar la corriente en sólo un sentido.

RADIOTELEGRAFÍA. Telegrafía inalámbrica. Transmisión de señales telegráficas, por ejemplo mediante el código Morse, por medio de ondas electromagnéticas.

RADIOTELEFONÍA. Telefonía inalámbrica, hoy llamada radio, por brevedad. Transmisión de los sonidos por medio de ondas electromagnéticas.

TRIODO AMPLIFICADOR. Triodo. Válvula termoelectrónica de tres electrodos principales: cátodo, ánodo y grilla. Cuando recibe una señal eléctrica pequeña en la grilla, deja pasar una corriente de variaciones amplias, que amplifican la señal.

CAPÍTULO 12

ELECTROTECNIA. Estudio de las aplicaciones técnicas de la electricidad.

CURVA CARACTERÍSTICA. Representación gráfica de la corriente en función de la tensión, o de algún otro conjunto de magnitudes eléctricas, de un componente de un circuito. Por ejemplo,

y en un triodo de vacío, la corriente de placa en función de la tensión entre ese electrodo y el cátodo, para una determinada tensión de grilla.

ÓHMETRO. Instrumento para medir la resistencia eléctrica. A veces forma parte de un medidor de usos múltiples, el *multímetro*, que incluye funciones de voltímetro, amperímetro y termómetro, entre otras.

DOPADO. O dopaje. En el ámbito de la electrónica, agregado de pequeñas cantidades de otro elemento químico, a aquél con el que se fabrica un cristal semiconductor. Según con qué se realice el dopado, se obtienen cristales P o N.

RECTIFICADOR DE MEDIA ONDA. El compuesto por un único diodo, que deja pasar corriente en un sentido, y le impide la circulación en el opuesto.

RECTIFICADOR DE ONDA COMPLETA. El compuesto por dos diodos, o cuatro, y que convierte en positivos los semiciclos negativos de la tensión alterna de entrada.

COMPONENTE PASIVO. El que no aporta energía a un circuito; por ejemplo un resistor, un capacitor, un inductor o un diodo.

COMPONENTE ACTIVO. El que aporta energía a un circuito, por ejemplo una pila, una batería, o un amplificador que incluya su fuente de alimentación.

FUENTE REGULADA. Aparato alimentado con corriente alterna que toma de la red, y que provee una tensión continua de valor muy estable frente a las variaciones de la tensión alterna de entrada, y las del consumo, o carga, que se le conecta a la salida.

CAPÍTULO 13

TRANSCONDUCTANCIA. Cociente entre la variación de la tensión de salida, y la variación de la corriente de entrada en un triodo de vacío, o en un transistor. Al igual que la conductancia, se expresa en siemens, o inversa de ohm. La diferencia entre la transconductancia y la conductancia, es que en ésta la tensión y la corriente corresponden al mismo cuerpo o elemento del circuito.

TRANSISTOR. Triodo de estado cristalino. Dispositivo de tres electrodos, que conduce mucho la corriente eléctrica entre dos de ellos, cuando

por el tercero pasa una débil corriente.

VARICAP. Capacitor cuya capacitancia aumenta abruptamente a partir de cierto valor de la tensión. Se usa para proteger circuitos de tensiones excesivas momentáneas que puedan recibir.

TRANSISTOR DE JUNTURA. El que tiene los cristales P y N depositados uno sobre otro, en un área de unión amplia y firme.

TRANSISTOR DE PUNTA DE CONTACTO. Aquél en el que el contacto entre electrodos se consigue con el apoyo de uno en punta sobre otro plano, como lo representa el símbolo del transistor.

POTENCIÓMETRO. Resistor variable a voluntad, con una perilla giratoria, o un cursor deslizante. Recibe ese nombre porque primitivamente se lo usaba casi exclusivamente para medir diferencias de potencial eléctrico.

ZUMBADOR. Aparato que zumba o silba cuando se lo alimenta eléctricamente. Sirve para hacer timbres y alarmas.

OSCILADOR. Circuito que produce una corriente eléctrica alterna cuando se lo alimenta con continua. Si se conecta su salida a un auricular, bocina, o parlante, éstos suenan.

FÍSICA CUÁNTICA. La desarrollada a partir de 1916, según la cual todas las partículas tienen propiedades ondulatorias. Su nombre proviene del *cuanto*, nombre de la energía mínima que puede transferir una partícula a otra, y que depende de la frecuencia. Esta parte de la física tiene especial importancia en el estudio del movimiento de los electrones y la conducción eléctrica.

FOTORRESISTOR. Resistor cuya resistencia eléctrica depende de la luz que recibe, y que se usaba en aparatos de encendido automático de luces al caer la noche.

CAPÍTULO 14

SOLENOIDE. Véase el glosario del capítulo 8.

INDUCTANCIA. Magnitud física dada por el cociente entre la fuerza electromotriz inducida, y la variación temporal de la corriente eléctrica. Se mide en henry, o volt segundo por amperere.

FOTOVOLTAICO. Efecto por el cual algunos cuerpos generan tensión eléctrica cuando les da la luz.

PICOFARADIO. Billonésima parte de un faradio. En inglés americano, billón se dice *trillionth*, y eso a veces se traduce mal a nuestra lengua. $1 \text{ pF} = 10^{-12} \text{ F}$.

OPTOACOPLADOR. Componente compuesto por un led y un fototransistor, fotodiodo o fotorresistor. Cuando recibe una señal eléctrica, el led enciende, e ilumina la otra parte, que entonces conduce la corriente. Sirve para separar eléctricamente dos partes de un circuito.

TIRISTOR. Diodo controlado, que comienza a conducir cuando recibe una señal eléctrica en su compuerta, o electrodo de control, y sigue conduciendo hasta que la corriente disminuye bastante. Cuando es de silicio, se lo llama también SCR, *silicon controlled diode*.

TRIAC. Diodo controlado que conduce en ambos sentidos cuando recibe una señal en su compuerta; y lo sigue haciendo hasta que la corriente desciende por debajo de cierto valor.

RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA. Ondas que se propagan en el vacío y en medios transparentes, como la luz, los rayos X, los gamma, los infrarrojos, los ultravioleta la luz visible, las ondas de radio y TV y las microondas.

PIEZOELÉCTRICO. Del griego *piezo*, presión. Se dice del material que genera electricidad cuando se lo deforma, y que se deforma cuando se le aplica electricidad.

CAPÍTULO 15

SEGUIDOR EMISÓRICO. Circuito realizado con un

único transistor, cuya tensión de salida es prácticamente igual a la de entrada, pero con una mayor corriente disponible.

OP-AMP. Forma abreviada de referirse a un amplificador operacional.

REALIMENTACIÓN POSITIVA. Retorno de la salida de un circuito hacia la entrada, de modo que ésta se refuerza.

REALIMENTACIÓN NEGATIVA. Retorno de la salida de un circuito hacia la entrada, de modo que ésta se debilita.

INTEGRAL. Límite matemático de la suma de los productos de los valores de una función, por cada intervalo de variación de su variable, cuando estos intervalos tienden a cero y, por consiguiente, la cantidad de sumandos tiende a infinito. Se representa gráficamente como el área encerrada entre la gráfica de la función, y el eje de abscisas.

FILTRO. Elemento de un circuito que permite el paso de señales de ciertas frecuencias, e impide o atenúa el paso de señales de otras frecuencias.

FILTRO PASIVO. El que no utiliza una fuente externa de energía, por ejemplo un capacitor en paralelo como filtro pasabajos.

FILTRO ACTIVO. El que emplea fuente externa de energía. por ejemplo un amplificador, o conjunto de ellos, conectados a capacitores, inductores u otros elementos.

SINUSOIDAL. En forma de senoide, curva que resulta de representar gráficamente el seno trigonométrico de una variable.

Apéndice I. Física cuántica



En el átomo más sencillo que existe, su único electrón gira sólo en ciertos radios, cuyas relaciones son las mismas que las que hay entre los cuadrados de los números naturales: 1, 4, 9, 16, etcétera. Así como cuando cantamos en el baño, resuenan sólo determinadas frecuencias, el electrón, que es una onda, sólo se mantiene donde resuena.

$$\lambda = \frac{h}{mv}$$

Toda partícula tiene una longitud de onda, que depende de su masa y de la velocidad a la que se desplaza. λ : longitud de onda; m : masa, v : velocidad; h : constante de Planck, que vale $6,62606896 \times 10^{-34}$ J.s. Un pelotazo tiene una longitud de onda asociada de sólo 4×10^{-35} m; por eso en una pelota la dispersión ondulatoria es insignificante en comparación con su diámetro. En cambio, para un electrón, esa longitud de onda es de unos tres angstrom, aproximadamente el tamaño del átomo entero; el electrón está en toda la órbita a la vez.

HISTORIA

RELATIVIDAD MECÁNICA. La ciencia física existe desde tiempo muy antiguo. Arquímedes de Siracusa (287 aC –212 aC), por ejemplo, además de expresar de manera muy rigurosa la ley de flotación,¹ y la de la palanca,² e interesado en la estabilidad de las naves, supo bastante física y matemática como para calcular el volumen de un paraboloides de revolución cortado por un plano oblicuo, hallar su centro de gravedad, y su centro de empuje de flotación. A pesar de ese singular antecedente, muchos estudiosos coinciden en señalar como el verdadero iniciador de la física, en el sentido actual que tiene esa palabra, a Galileo Galilei (1564 –1642). De él es el principio de relatividad mecánica, de 1638, una idea revolucionaria en su época que establece que no hay ningún experimento mecánico capaz de detectar si el laboratorio donde se lo lleva a cabo está quieto, o si se desplaza en línea recta, y con velocidad constante.

RELATIVIDAD ELECTROMAGNÉTICA. Otra revolución del pensamiento físico fue la de Albert Einstein (1879 –1955), quien, en 1905, agregó a lo dicho por Galileo que no hay ningún *experimento*, a secas (sea mecánico, óptico, magnético, eléctrico u otro), capaz de detectar dicho movimiento relativo uniforme y rectilíneo.³ En 1915 Einstein estableció un principio físico aún más radical: todos los marcos de referencia son equivalentes, y en ellos se cumplen las mismas leyes físicas.⁴

CUÁNTICA. Posiblemente una tercera revolución, aún mayor, del pensamiento físico, fue la *física cuántica*, *mecánica cuántica* o *mecánica ondulatoria*, de 1916, resultado de las investigaciones y estudios de muchos físicos, entre ellos Louis de Broglie, Max Planck, Ernst Schrödinger (o Scroedinger, en grafía inglesa), y Werner Heisenberg. Esa rama de la física, que hoy tiene muchas aplicaciones prácticas, resultó de los intentos de explicar hechos que habían resultado oscuros durante muchos años. Uno es el modelo de Rutherford y Bohr del átomo. Ese modelo consiste en un núcleo positivo, a cuyo alrededor giran electrones de carga negativa. Había dos preguntas que intrigaban a los investigadores:

¹ *Todo cuerpo sumergido recibe una fuerza hacia arriba igual al peso del líquido que desaloja.*

² *En una palanca, las fuerzas están en proporción inversa a la de sus brazos.*

³ De tal hecho, conocido como *relatividad especial*, restringida a movimientos rectos y de velocidad constante, se deduce que el tiempo no es absoluto, sino que depende de la velocidad de un observador con respecto a otro. Lo mismo pasa con las longitudes, el campo eléctrico, el magnético, y con multitud de otras magnitudes físicas.

⁴ Ése es el principio de *relatividad general*, que incluye la gravedad y la aceleración, las cuales, según esa ley o principio, son equivalentes. Por ello, no existe experimento capaz de decidir si un laboratorio se encuentra acelerado o si, en cambio, está sometido a fuerzas gravitatorias. De este principio surgió la idea de un espacio tiempo curvo.

- ¿por qué los electrones giran sólo en órbitas de determinados diámetros posibles, y no a cualquier distancia del núcleo?
- ¿y por qué los electrones, que están acelerados, no irradian energía, a expensas de su energía cinética (o de movimiento) hasta caer sobre el núcleo?⁵

La respuesta fue insólita, increíble en su momento; y aún hoy causa asombro: los electrones no son partículas cuya presencia esté concentrada en una región muy pequeña, como se creía. Un electrón no está en un lugar determinado; *está repartido en toda su órbita*, como una ola de agua del mismo tamaño que el recipiente en el que está contenida.

Además de los electrones, toda partícula tiene asociada una onda, cuya longitud, λ (lambda) se llama *longitud de onda de Louis de Broglie*.

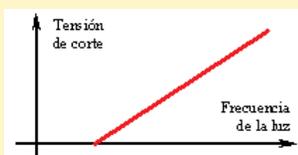
Además de que todas las partículas son ondas, o tienen propiedades de onda, hay otro hecho de la física cuántica, que es el central de esa teoría.⁶ Los intercambios de energía entre partículas ocurren siempre en forma de paquetes de energía, llamados *cuantos*. Una partícula puede transferirle a otra un cuanto, dos cuantos, tres, o más, o bien ningún cuanto de energía; pero no le puede transferir medio cuanto, ni 6,8 cuantos. La energía, igual que la materia, es discontinua. La energía de un cuanto vale $E = h \cdot \nu$, donde h es la constante de Planck, y ν (ni, o nu) es la frecuencia de la onda. Otra fórmula equivalente es $E = h \cdot c / \lambda$, donde c es la velocidad de la luz, y λ (lambda), la longitud de un ciclo de la onda.

Una consecuencia de la naturaleza ondulatoria de la materia, y del hecho de que la energía sólo se transfiera en cuantos, es la imposibilidad de determinar a la vez la posición y la velocidad de una partícula.⁷ Otra, es la desaparición del concepto de causa y efecto, tal como se lo entendía antes del advenimiento de la mecánica cuántica. Omitimos, en este espacio, la explicación de esos hechos; pero los señalamos como una verdadera revolución del pensamiento físico y filosófico.

LA CÉLULA FOTOELÉCTRICA: UNA PUERTA DE ENTRADA A LA CUÁNTICA

La célula fotoeléctrica, fototubo, o fotocélula, muy relacionada con la teoría cuántica, es un dispositivo industrial que se usó mucho —y aún hoy se lo emplea, aunque se usan más los foto-transistores— para abrir puertas, contar objetos, medir el nivel de líquidos, etcétera.⁸

Una fotocélula es un diodo de vacío de cátodo frío. Pero, al contrario de las válvulas rectificadoras de corriente, su cátodo, o electrodo negativo, es amplio; y su ánodo, delgado. Heinrich Hertz descubrió en 1887, que cuando incide luz sobre el cátodo, se despren-



● **Curva característica de un fototubo. Cuanto mayor sea la frecuencia de la luz incidente, mayor es la tensión inversa necesaria para impedir el flujo de electrones.**

⁵ Un movimiento circular es siempre acelerado, porque cambia la dirección del vector velocidad. Y las cargas aceleradas emiten radiación. (Véase el capítulo 11.)

⁶ Cuando se dice teoría cuántica, teoría atómica, o teoría de la selección natural, la palabra teoría tiene, en este ámbito técnico y científico, el significado de un cuerpo organizado de conocimientos, generalmente muy corroborados. En otros contextos, teoría significa sólo una hipótesis sin corroborar; por ejemplo, la teoría conspirativa.

⁷ Puesto que una partícula es una onda, está naturalmente dispersa en el espacio, del mismo modo en el que lo está una ola en el mar, en la dirección en la que avanza; o una onda que se desplaza —o permanece estacionaria— en una soga tensa. Un ejemplo de una onda muy localizada en el espacio, es la propagación de un pulso muy poco extenso. Ese pulso se compone de la superposición de muchas ondas de frecuencias muy diferentes; así, pues, el pulso está concentrado en posición, pero disperso en frecuencia. Y como la frecuencia es proporcional a la energía, y ésta depende de la velocidad, resulta que cuando la posición de una partícula está bien definida, su velocidad resulta indefinida; y viceversa. Ese hecho se conoce como *principio de incertidumbre* de Heisenberg.

⁸ Véase el esquema del capítulo 11. Hay también referencias en el 13 y el 19.



- En algunos ambientes mágicos y místicos, se habla de *medicina cuántica*, *psicología cuántica*, y variantes. El significado de la palabra cuántica, en ese contexto, es muy lejano al que utiliza la ciencia física. La figura ilustra supuestas propiedades curativas de las piedras preciosas.



- Antigua célula fotoeléctrica Toshiba PG 51. El sector cilíndrico es el cátodo, y la varilla central, el ánodo. Cuando se aplican algunos centenares de voltios entre los electrodos, circulan unos 150 microamperes, por cada lumen de flujo luminoso.

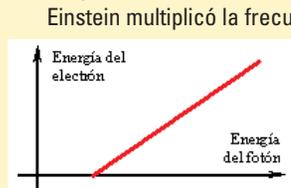


- La energía de un fotón es igual al producto de su frecuencia, por la constante de Planck.

den electrones, que recoge el ánodo, y así se detecta la luz incidente. Y aun cuando no se aplica tensión, la luz arranca electrones de la placa, que dan lugar a una corriente eléctrica entre ella y el alambre. Para que cese ese flujo de electrones, se debe invertir la tensión; hay que polarizar positivamente la placa amplia, y negativamente la varilla central. En ese caso los electrones regresan, y no circulan.

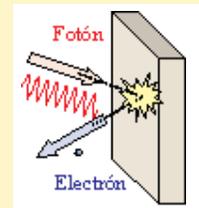
La tensión necesaria para que la fotocélula no conduzca (la tensión de corte) depende linealmente de la frecuencia de la luz, y también del tipo de material donde incide, pero no depende del material del otro electrodo, o sea el del colector de electrones. La luz de mayor frecuencia (azul, violeta, ultravioleta) arranca más fácilmente electrones, que la de menor frecuencia (anaranjada, roja, infrarroja).

Durante más de diez años nadie supo dar razones de esa dependencia I , hasta que Albert Einstein, con la ayuda de ideas cuánticas, de las que describía entonces, ofreció una explicación muy sencilla.



Einstein multiplicó la frecuencia por la constante de Planck, e interpretó ese producto como la energía de un fotón, o cuanto de radiación electromagnética, $E_F = h \cdot \nu$. A la vez, multiplicó la tensión de corte por e , la carga del electrón, e interpretó el producto, $E_E = U_C \cdot e$, como la energía del electrón, que adquiere cuando el fotón incidente lo arranca de la placa de la celda fotoeléctrica.⁹

Con esa nueva forma de ver la misma gráfica, Einstein imaginó que sobre la placa incide un fotón de determinada energía, que depende solamente de la frecuencia de su luz. Parte de esa energía se emplea en arrancar un electrón del metal, donde es cautivo de fuerzas electrostáticas. La energía restante queda en el electrón, en forma de energía cinética, o de movimiento. La tensión de corte frena el electrón (le quita su energía cinética), y lo regresa al metal.



Esa interpretación le valió el Premio Nobel de Física en 1921, aunque en la decisión del jurado, intervinieron, sin duda, los trabajos de Einstein sobre relatividad.

Nótese el pensamiento cuántico del físico: Convirtió la observación de variables que parecen continuas, como la tensión y la frecuencia, en magnitudes claramente discontinuas, como lo son un electrón individual, y el fotón que lo arranca de la placa metálica.

RADIACIÓN DEL CUERPO NEGRO, OTRA PUERTA DE ENTRADA A LA CUÁNTICA

Otro estudio que contribuyó grandemente al desarrollo de la mecánica cuántica, fue el de la *radiación del cuerpo negro*. Un cuerpo negro es un objeto que absorbe toda radiación que le llega, y es también el que más radiación emite, para una dada temperatura y área de emisión.¹⁰ Desde el siglo XIX se conocía en detalle la distribución de energía de la radiación de un cuerpo negro; es decir, qué fracción porcentual de potencia emite ese cuerpo, por unidad de área, en cada banda de frecuencias, y para cada temperatura; pero no se hallaba una explicación satisfactoria del porqué de esa distribución en particular.

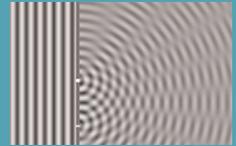
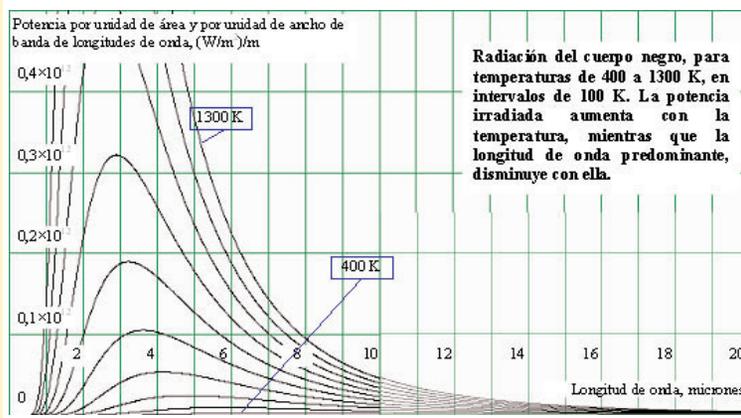
Un cuerpo negro (y cualquier otro) está formado por un gran número de osciladores, uno por cada átomo, o uno por cada electrón, y la radiación proviene de las oscilaciones de las cargas eléctricas. En los primeros intentos de explicación, se suponía la energía distribuida de manera continua entre los osciladores; pero eso llevaba a curvas de distribución diferentes de las observadas experimentalmente. Max Planck introdujo en 1900 una hipótesis extraña y descabellada, al principio sólo para que las fórmulas coincidiesen con la realidad: "La energía no se

⁹ Recordemos que la tensión, o diferencia de potencial, es el cociente entre la energía necesaria para llevar una partícula cargada de un punto a otro, y el valor de su carga.

¹⁰ Ejemplos familiares –y aproximados– de radiación de cuerpo negro, son un horno con la puerta abierta, un hierro al rojo, y hasta el propio cuerpo humano.

distribuye de manera continua, sino en paquetes". Calculó el tamaño de cada paquete de energía para que todo coincidiese, y lo halló proporcional a la frecuencia. Entonces sí las fórmulas reflejaron fielmente la realidad.

Enseguida se conectó ese hecho con el de las órbitas permitidas para un electrón alrededor del núcleo del átomo, en cuya descripción aparece la misma constante de proporcionalidad entre la energía y la frecuencia, que se conoce desde entonces como la constante de Planck.



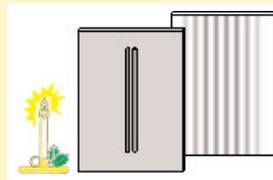
- Ondas que pasan por dos agujeros. Según las distancias que recorren, se refuerzan, o se anulan.

INTERFERENCIA DE FOTONES Y DE ELECTRONES

Thomas Young (1773–1829) realizó en 1801 un experimento muy llamativo, que demostró sin lugar a dudas que la luz es una onda, tema de controversia en su época. Hizo dos ranuras muy cercanas en una pantalla opaca, y las iluminó de un lado. Las destapó una por vez, y del otro lado se proyectaba una mancha de luz sobre una pantalla. Pero cuando destapó las dos ranuras, aparecieron franjas de interferencia claras y oscuras, que obedecen a que la luz recorre caminos ligeramente diferentes. En algunos casos, las dos ondas llegan en fase, y se refuerzan, y en otros llegan con fases opuestas, y se anulan. Algunos puntos de la pantalla que resultaban iluminados por uno solo de los haces, quedaban a oscuras cuando llegaban los dos haces de luz. Así, Young mostró que luz más luz es igual a oscuridad, cosa que sólo ocurre con las ondas.¹¹

El mismo experimento que hizo Young con luz, o fotones, se realizó después con electrones, y con otras partículas, y en todos los casos se obtuvieron franjas de interferencia.

Si se dirige contra la placa perforada una radiación muy débil (por ejemplo, constituida por un fotón por minuto, o un electrón por minuto), el patrón de interferencia se observa igualmente. Ese hecho causó mucha polémica, y aún hoy se discute en ámbitos elementales. Se argumenta: ¿cómo es eso posible? ¿cómo puede un fotón, u otra partícula, que pasó por una de las rendijas, interferir con otra que pasó un rato antes, o que va a pasar un rato después, por la otra? ¿acaso la primera partícula adivina el futuro? La respuesta es que las partículas no pasan por una de las aberturas; *pasan, cada una, por las dos a la vez*. Es que todas las partículas son ondas dispersas.

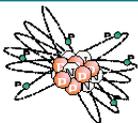


- En una época se llamaba *física clásica* a la física anterior a la teoría de la relatividad; y a la nueva, *física relativista*. Pero como la física cuántica se considera una revolución mayor que la relativista, hoy, por física clásica, se entiende la física anterior a la cuántica, incluya o no la relatividad. En las fotos, Planck en 1901, y Einstein en 1905.

¹¹ Algunos científicos contrarios a la teoría ondulatoria tejieron intrigas en contra de Young, y consiguieron que el Parlamento Británico lo expulsara de la Oficina de Longitudes, de la que era Secretario. Sin aclarar la injusticia, lo llamaron más tarde para seguir desempeñando funciones en ese organismo, y Young aceptó.

Apéndice II.

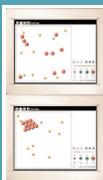
Propiedades de los gases



● Representación de un átomo de carbono 12, adoptado como patrón de masa atómica. (6 n + 6 p + 6 e).

Un mol, o molécula gramo, es una cantidad de $6,0221417 \times 10^{23}$ partículas. Es aproximadamente la cantidad de moléculas que hay en dos gramos de hidrógeno molecular (o en un gramo de hidrógeno atómico); en 16 gramos de oxígeno; y, exactamente, la cantidad de átomos que hay en 12 gramos de carbono 12. Un átomo de carbono 12 se compone de seis protones, seis neutrones y seis electrones.

● Programa de *Stark Design* para simular el comportamiento de los gases. A temperaturas elevadas (bolitas veloces), las moléculas chocan, y se separan. Al disminuir la temperatura, quedan adheridas; el gas condensa, y cristaliza.



El término gas proviene del griego, $\chi\alpha\omicron\sigma$ (*khaos*, o *jaos*), el caos, o desorden, por oposición a $\kappa\omicron\sigma\mu\omicron\sigma$, el cosmos, u orden. La palabra la inventó Jean-Baptiste van Helmont (1577–1644) en el siglo XVII, para designar cuerpos que hasta ese momento se llamaban aires, o espíritus.¹² Hoy se sabe que un gas es un conjunto de partículas, o moléculas, separadas entre sí por espacio vacío. Las moléculas se encuentran en movimiento de rotación, vibración y traslación, y rebotan entre ellas, contra las paredes del recipiente en que esté contenido el gas, y contra cualquier otro cuerpo sólido o líquido que encuentren en su camino. El efecto de esos choques es la presión del gas. Y el movimiento de traslación de las moléculas, se corresponde con la temperatura.¹³

Por ejemplo, el aire que respiramos es una mezcla de gases, como indica la tabla. El que más abunda es el nitrógeno, con $2,15 \times 10^{22}$ moléculas por litro, distantes entre sí unos 3,6 nanómetros, equivalentes a unos diez diámetros moleculares. Sus velocidades promedian los 500 metros por segundo. Las moléculas se atraen entre sí, y se ejercen mutuamente otros diversos tipos de interacciones. Cuando la temperatura del gas es elevada, la energía cinética de traslación de sus moléculas es grande, y la atracción molecular apenas se manifiesta. En cambio, a temperaturas más bajas, las velocidades de las moléculas son comparativamente pequeñas, y entra en acción la atracción entre ellas, hasta que el gas se convierte en líquido, o en sólido.

Por ejemplo, si enfriamos aire, lo primero que se observa es que el gas de agua presente se convierte en líquido: los vidrios y superficies lisas se empañan. Si el enfriamiento prosigue, se

GASES DEL AIRE	CONCENTRACIÓN (%)
Nitrógeno (N ₂)	78,084
Oxígeno (O ₂)	20,946
Argón (Ar)	0,934
Vapor de agua (H ₂ O)	0,4
Dióxido de carbono (CO ₂)	0,033
Neón (Ne)	0,001818
Helio (He)	0,000524
Metano (CH ₄)	0,0001745
Criptón (Kr)	0,000114
Hidrógeno (H)	0,000055
Óxido Nitroso (N ₂ O)	0,00005
Xenón (Xe)	9×10^{-6}
Ozono (O ₃)	7×10^{-6}
Óxido de Nitrógeno (NO ₂)	2×10^{-6}
Yodo (I)	1×10^{-6}
Monóxido de carbono (CO)	trazas
Amoniaco (NH ₃)	trazas

¹² Todavía se le dice *bebidas espirituosas* a las de alta graduación (precisamente porque despiden gases alcohólicos); también se le decía *espíritu de petróleo* al éter, y *espíritu de sal* al ácido clorhídrico.

¹³ En un gas monoatómico (esto es, compuesto por moléculas de un solo átomo cada una) la temperatura del gas se relaciona con la energía cinética media de sus moléculas ($E_C = \frac{1}{2} m \cdot v^2$), mediante la fórmula $E_C = k \cdot T$, donde T es la temperatura absoluta, en kelvin, y k es la constante de Boltzmann, $1,3806504 \times 10^{-23} \text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$, o bien $0,08205746 \text{ l} \cdot \text{at} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$ (litro atmósfera sobre kelvin mol).

condensan también, en forma de líquido, los demás gases del aire. Para mencionar sólo los más abundantes, el que se condensa a una temperatura mayor es el dióxido de carbono, o hielo seco, a los $-57\text{ }^\circ\text{C}$; si-gue el nitrógeno, a $-196\text{ }^\circ\text{C}$; el argón, a $-185,7\text{ }^\circ\text{C}$; el oxígeno, a $-183\text{ }^\circ\text{C}$; el neón, a $-246,09\text{ }^\circ\text{C}$, y el helio, a $-268,94\text{ }^\circ\text{C}$.

Para separar esos diversos gases, y aprovecharlos con fines industriales y medicinales, se comprime el aire a unas 200 atmósferas. Al hacerlo, aumenta su temperatura, como lo comprobamos al accionar un inflador de bicicleta. Cuando se lo deja enfriar, el aire, que era gaseoso, se licua; y en el momento de abrir el recipiente, se evapora lentamente y permanece líquido, mientras su temperatura disminuye hasta estabilizarse en 196 grados bajo cero, que mantiene mientras quede nitrógeno.

En ese estado se lo puede guardar durante muchas horas en un termo cuyo tapón tenga una pequeña abertura, para que no estalle.¹⁴ El nitrógeno se evapora antes que el oxígeno, porque hierve a una temperatura menor.¹⁵

GAS IDEAL Y GAS DE VAN DER WAALS

Se llama *gas ideal* un gas cuyas moléculas se suponen de tamaño nulo; por tanto sólo chocan contra las paredes del recipiente, y no entre ellas; y además, las moléculas no se ejercen fuerzas entre sí. Cuando la temperatura es bastante alta, o la presión suficientemente baja, los gases verdaderos se comportan aproximadamente como un gas ideal. El aire, por ejemplo, a presiones y temperaturas no muy alejadas de las normales, se aparta un dos o tres por ciento del comportamiento ideal. En los cursos elementales se le da mucha importancia a este concepto, porque permite la ejercitación con fórmulas sencillas; pero en ambientes tecnológicos se prefiere el trabajo con fórmulas más complejas, y apropiadas para los casos reales; por ejemplo las del *gas de Van der Waals*, que tiene presente tanto el tamaño de las moléculas, como las fuerzas que se ejercen.

$$pV = nRT \qquad \left(p + \frac{a}{v^2}\right)(v - b) = RT$$

A la izquierda, la ecuación de estado de un gas ideal, a la derecha, la de un gas de Van der Waals, que describe los gases reales más acertadamente la ecuación para los gases ideales.

R es la constante universal de los gases, $8,3149 \times 10^3 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K}\cdot\text{mol})$; $v = M/\rho$ (cociente de la masa molecular en unidades atómicas, y la densidad, rho, respectivamente) es el volumen específico molar en $\text{m}^3/(\text{kg}\cdot\text{mol})$; p es la presión en pascuales; T , la temperatura en kelvin; a y b son constantes diferentes para cada gas, ambas nulas para un gas ideal. La constante a del oxígeno vale $138 \text{ n}\cdot\text{m}^4/(\text{kg}\cdot\text{mol})^2$; la del agua, $580 \text{ n}\cdot\text{m}^4/(\text{kg}\cdot\text{mol})^2$; la constante b para los mismos gases vale $0,0318$ y $0,0319 \text{ m}^3/(\text{kg}\cdot\text{mol})$, respectivamente. La cantidad n es el número de moléculas kilogramo, o mil veces el número de moles del gas.

Cualquiera de las dos fórmulas anteriores, con diferente precisión, nos dicen que si se comprime un gas, y se mantiene su temperatura, la presión aumenta.¹⁶

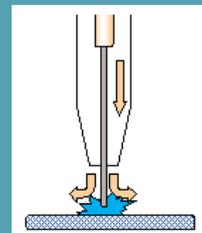
COMPRESIÓN ADIABÁTICA

Adiabática significa que durante esa compresión, el gas no intercambia calor con el am-

¹⁴ Si se pone un poco de aire líquido en una botella de bebida gaseosa, y se la cierra con su tapa, al cabo de uno o dos minutos la botella estalla ruidosamente. El experimento es peligroso, y se recomienda no hacerlo; se lo menciona aquí justamente para señalar el riesgo de cerrar herméticamente un termo que contenga aire líquido.

¹⁵ Cuando se utiliza nitrógeno líquido, no hay que confiar en que sea siempre una sustancia inerte; podría condensar el oxígeno del ambiente, que es muy oxidante, y hasta explosivo, si entra en contacto con una brasa.

¹⁶ Si se impide que el gas, mientras se lo comprime, ceda calor al ambiente (con un recipiente aislado térmicamente), la temperatura del gas aumenta.



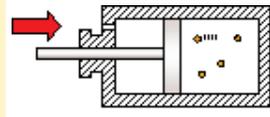
- El argón, que integra cerca del uno por ciento del aire, no reacciona químicamente; por eso se lo emplea para generar una atmósfera inerte en la unión de piezas que, si se las soldara al aire, se oxidarían, o se combinarían con el nitrógeno, con pérdida de propiedades útiles. En el esquema, un electrodo de tungsteno, que suelda por arco eléctrico, rodeado de un tubo que sopla argón.



- Encendedor neolítico, en una versión mejorada del que se usaba hace diez mil años. Se coloca una viruta en el extremo del pistón, se lo introduce en el mortero, y se comprime el aire atrapado con un golpe de puño. Tal como ocurre en un motor gasolero, el combustible se inflama con la temperatura alcanzada durante la compresión. Sale una brasa, que, soplada junto con otras, encienden por fin una llama.



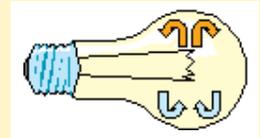
biente. El resultado es una elevación de la temperatura del gas, que puede alcanzar miles de grados, como ocurre con el aire embestado y comprimido por la nariz de una nave espacial, cuando regresa a la atmósfera. Una manera de comprender el por qué de ese efecto, es imaginar, como muestra la figura, un pistón que empuja las moléculas de un gas. Cuando éstas rebotan contra la superficie móvil, adquieren una velocidad mayor que la que tenían antes del choque, y eso ocurre, mientras el pistón avanza, miles de veces por segundo, de modo que la velocidad de las moléculas aumenta considerablemente. Y mayor velocidad de traslación de las partículas, significa una mayor temperatura del gas.



TRANSMISIÓN DEL CALOR POR CONVECCIÓN

En el funcionamiento de equipos eléctricos y electrónicos de cierto tamaño en adelante, por ejemplo el de una computadora, la disipación del calor se convierte en un problema importante, y de difícil solución. Normalmente la refrigeración se produce por radiación (véase el Apéndice I) y por convección. La convección es el movimiento del aire, u otro gas, o de un líquido. Se distinguen dos casos: la natural, y la forzada. La convección natural se produce cuando una cierta masa de aire caliente aumenta su volumen como consecuencia de su calentamiento; entonces disminuye su densidad; flota en el aire más frío circundante, y asciende. Percibimos ese efecto al tocar una lámpara incandescente que estuvo encendida durante algunos segundos; la parte superior se calienta más que la inferior, por el movimiento del gas que hay en su interior.¹⁷

Por lo dicho, una lámpara con su zócalo hacia abajo disipa el calor mejor que cuando cuelga, que es, por desdicha, el caso más común. La convección forzada es la que utiliza la energía de un ventilador. Casi todas las computadoras actuales se refrigeran por ese método, con el inconveniente de que el ruido de los ventiladores, o el de la turbulencia del aire en circulación incomodan en algunos casos.



TUBOS DE CALOR

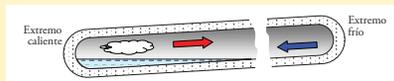
Una propiedad muy útil de aquellos gases cuyo comportamiento se aparta mucho del ideal —esto es, los gases que se condensan a temperaturas elevadas, o no muy bajas— es la construcción de *tubos de calor*.

Alguna vez, al tomar con la mano el mango de caño de una sartén sobre el fuego, notamos que el mango quemaba, por haber quedado en el hueco un poco de agua del último lavado. El extremo del mango en contacto con la sartén se calienta, el agua alojada en el caño hierve, y el vapor de agua transmite el calor por convección hacia el extremo alejado, con mucha mayor eficiencia que la conducción térmica del caño.

Un tubo de calor suele ser de acero inoxidable, u otro metal resistente a la oxidación, y a temperaturas elevadas. En su interior tiene una sustancia que, a la presión interna, es líquida cuando se encuentra a la temperatura del extremo frío del tubo, y gaseosa cuando está a la temperatura del extremo caliente.

El interior del tubo se tapiza de un material esponjoso, que conviene que sea cerámico, cuando el tubo opera a varios cientos de grados. Cuando el líquido se evapora en el extremo caliente; sus vapores avanzan hacia el extremo frío, allí se condensan, y el líquido regresa por el material poroso, a veces cuesta arriba si es muy absorbente.

Esos tubos conducen el calor con una eficiencia centenares de veces mayor que una barra maciza de cualquier material.



¹⁷ Las antiguas lámparas incandescentes al vacío, en cambio, no presentaban ese efecto. Tenían más rendimiento, porque perdían menos calor, pero el filamento se evaporaba antes que el de las actuales, y por eso duraban menos.

• La circulación atmosférica se produce por convección natural. En la figura, un modelo simplificado de Euskalmet (Agencia Vasca de Meteorología). El aire se calienta en el ecuador, y asciende; y se enfría en los polos, donde desciende.



• Los tubos de calor se usan en panaderías, para conducir el calor desde el quemador del horno hacia todos lados. También se empleaban unos de pequeño tamaño, para clavarlos en los trozos gruesos de carne, en reemplazo de los clavos de plata que se usaban hace siglos, para que, durante el horneado, la cocción llegase al interior. Esa técnica se abandonó por los hornos de microondas. Arriba, clavo sólido de conducción *Spud Spikes*, para asar carne, o papas. Abajo, un enfriador para procesador de computadora, con cuatro tubos de calor. El aparato es más pequeño y silencioso que los de convección simple.



Apéndice III. Corrientes en gases y en el vacío

A pesar de que a mediados del siglo XX prácticamente finalizó la era de las válvulas de vacío y de gas, es igualmente útil conocer los rudimentos de la conducción eléctrica en ambos medios, ya que, por ejemplo, aún conviven los antiguos monitores y tubos de TV de rayos catódicos al vacío, con las más recientes pantallas de plasma;¹⁸ y hay además muchas aplicaciones eléctricas y electrónicas en las que se tiene en cuenta la conducción en esos medios.

CONDUCCIÓN EN EL VACÍO

El vacío, de conductividad idealmente nula, es el espacio libre de materia. Sin embargo, si la distancia entre dos electrodos al vacío es suficientemente pequeña, y la tensión bastante elevada; o si la temperatura del electrodo negativo es suficiente, se desprenden electrones del cátodo, que el ánodo captura, y se origina así una corriente eléctrica. En cambio, para tensiones pequeñas, distancias suficientes, y electrodos fríos, el vacío resulta aislante.

Los mismos parámetros (distancia, tensión y temperatura) determinan la condición de aislante o conductor de un gas.

CONDUCCIÓN EN GASES

A diferencia de muchos sólidos y líquidos, en los que hay presentes electrones libres en las redes cristalinas, los gases, cuando están sin ionizar, son aislantes. Pero en condiciones especiales, los gases se ionizan, y se vuelven muy conductores de la electricidad.¹⁹

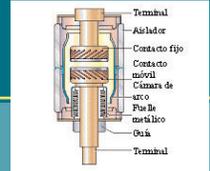
La ionización de un gas puede obedecer a su elevada temperatura,²⁰ o a una intensidad suficiente del campo eléctrico. Por ejemplo, con las tensiones de centenares de millones de voltios de las tormentas eléctricas, el aire atmosférico se vuelve conductor, en cientos de metros, y al nivel del suelo. Lo mismo ocurre, en una distancia mucho menor, con el chispero eléctrico de un encendedor.

Una vez iniciada la conducción, los electrones se aceleran en el campo eléctrico, chocan contra los átomos que encuentran en su camino, y los ionizan a su vez, con lo que aparecen más electrones libres. Los iones positivos, por su parte se aceleran en sentido opuesto, y también

¹⁸ Recordemos que un plasma es un gas altamente ionizado. Los capítulos 2, 3, 4 y 10 hacen referencia a las aplicaciones de ese cuarto estado de la materia.

¹⁹ Cuando el fuego alcanza los contactos de un enchufe de baja tensión, se establece, a través de la llama, un camino conductor entre vivo y neutro, o entre el vivo y partes a tierra cercanas, y se agrava el incendio. Por eso, a veces no se sabe si un incendio se originó en un cortocircuito, o si ocurrió lo inverso.

²⁰ El capítulo 16 menciona los efectos que tiene en las comunicaciones, la incandescencia del escudo térmico de las naves espaciales que regresan a la atmósfera.

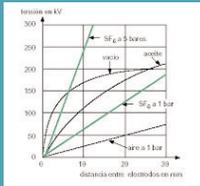


- Polo, u órgano de conexión y desconexión, de un interruptor de vacío de 24 kV. El contacto móvil se puede desplazar un centímetro, gracias a un fusible metálico flexible. La chispa, o arco eléctrico, volatiliza parte del metal. Cuando los gases metálicos se condensan sobre las paredes frías, mejoran el vacío reinante. Esos polos ocupan menos sitio que los contactos inmersos en gas hexafluoruro de azufre, aceite o aire.



- En ciertas condiciones, el aire es conductor de la electricidad. Arriba, arco eléctrico accidental, de 500 kV y dos metros, en un seccionador en aire. (Foto: Jim Phillips). Abajo, arco de 5 kV y medio centímetro, en un encendedor. (Dibujo: Kyocera Corp.)





- Comportamiento del vacío, del aire, el hexafluoruro de azufre (un gas) y el aceite dieléctrico. Cuanto mayor es la distancia entre electrodos, más elevada es la tensión que pueden soportar a la temperatura ambiente. Un bar es, aproximadamente, una atmósfera de presión. (Gráfico de Schneider Electric.)



- Los tubos y lámparas compactas fluorescentes, por la gran separación entre sus electrodos, necesitan tensiones bastante mayores que los 220 V eficaces, o 315 de cresta, de la línea eléctrica domiciliaria. Sus circuitos generan una tensión de arranque mayor, de varios centenares de voltios. En cambio, una pequeña lámpara de neón enciende con la mera tensión de la red. (El resistor de 100 kΩ limita la corriente, dado que los gases disminuyen su resistividad con la temperatura.)

chocan, y ionizan átomos. Los iones y electrones, cuando pierden energía después de varios choques, se combinan con partículas de la polaridad opuesta, y quedan momentáneamente fuera del fenómeno de la circulación de corriente; hasta que otros iones choquen con los átomos que se acaban de formar, y los ionicen.

Los aspectos cuantitativos de esos fenómenos dependen del tipo de gas, la intensidad del campo eléctrico, la distancia a la que se encuentre un átomo de otro, o una molécula de otra, y sus velocidades; en otras palabras, la conducción depende del campo eléctrico, de la presión,²¹ y de la temperatura.

Si la densidad del gas es muy baja, la probabilidad de que una partícula choque con otra se reduce, y un ion puede atravesar la distancia completa entre electrodos, sin que se produzca una ionización adicional. Por otra parte, si la densidad es muy elevada, las partículas chocan muy frecuentemente, sin tiempo de tomar velocidad suficiente como para ionizar átomos. Para cada separación entre electrodos hay una densidad intermedia, en la que el efecto de ionización por choque es máximo.

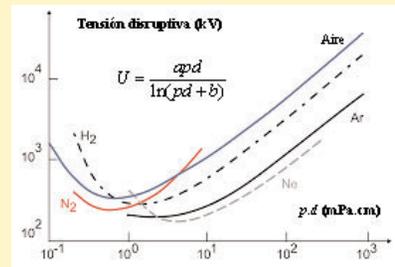
LEY DE PASCHEN

Friedrich Paschen (1865–1947) publicó los resultados de muchos experimentos de descargas eléctricas, en gases a diferentes presiones, y propuso varias fórmulas empíricas.²² Una de esas fórmulas, válida para una separación de los electrodos del orden de un milímetro, establece que la tensión eléctrica disruptiva (la que produce la conducción del gas) depende de la presión mediante la fórmula $U = 30 \cdot p \cdot d + 1.350 \text{ V}$.

U es la tensión, en voltios; p es la presión, en torr, o milímetros de mercurio; y d , la separación entre electrodos, en centímetros. Por ejemplo, para un milímetro de separación, y una presión normal de 760 torr, y para que salte una chispa eléctrica entre los dos electrodos, hay que aplicar una tensión de valor $30 \times 760 \times 0,1 + 1.350$, unos 3.600 volt de ceca, o 3.200 eficaces.

Posteriormente, otros investigadores propusieron expresiones más complejas, pero que se pueden aplicar a separaciones entre electrodos más variadas. En la fórmula de la figura, las constantes a y b son propias de cada gas (las del aire valen 43,6 y 12,8); p es la presión, en atmósferas, y d es la separación entre electrodos planos o redondeados, en metros.

Las escalas logarítmicas de los ejes facilitan la representación de magnitudes de muy diverso orden. Se aprecia que el neón es el gas más fácil de encender, entre los que menciona el gráfico.²³



TUBOS DE CROOKES

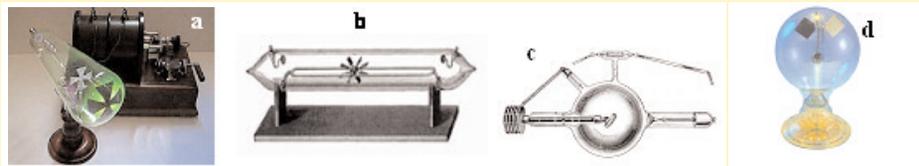
Como curiosidad histórica, mencionamos algunos de los experimentos científicos más antiguos²⁴ que se conocen de descargas en el vacío y en gases, realizados por William Crookes

²² *Empírico* significa concierne o relativo a la experiencia. Se aplica, en este caso, y en otros, a los conocimientos que se obtienen de la observación directa, y sin una teoría de interpretación.

²³ Se fabrican lámparas de neón encienden con 90 V, y con algo menos. La presión del gas en el interior de la ampolla es de algunas milésimas de atmósfera.

²⁴ Hay conjeturas sobre la posibilidad de experimentos anteriores, pero no eran científicos, sino prácticas de fin desconocido, quizá religioso. El vacío, o disminución de presión, se conseguía con columnas de agua cerradas por arriba, que se vaciaban sobre un recipiente, y la tensión eléctrica se generaba por fricción de cintas. (Consúltense, por ejemplo, el capítulo Reyes 2 de la Biblia.)

(1832–1919), antes de que se conociera la estructura atómica. Crookes usaba, como fuente de alta tensión, un transformador cuyo primario alimentaba con una corriente alterna de onda cuadrada; que conseguía con una batería de corriente continua entrecortada con un electroimán.

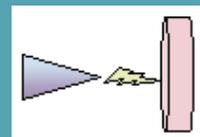


a-Tubo de rayos catódicos. La alta tensión aplicada entre dos electrodos, arranca electrones del cátodo, y los proyecta contra la pintura fluorescente del frente, que brilla. La cruz de Malta hace sombra, y muestra que los electrones viajan en línea recta. **b**-La corriente de electrones y de iones que circula entre los electrodos del tubo, hace girar una noria. **c**-Tubo de rayos X. Los electrones que salen del cátodo, a la derecha, chocan con el anticátodo, a la izquierda; y, por el frenado brusco, emiten rayos X. Arriba, un ánodo auxiliar dirige el haz de electrones; y una entrada lenta de aire, permite que el tubo funcione con una tensión más baja. **d**-Radiómetro, o molinillo de radiación, hecho con aspas negras de un lado, y blancas del otro. Cuando la parte blanca refleja la luz, recibe del rayo luminoso un impulso mayor que el aspa opuesta, pintada de negro; entonces, cuando se ilumina el aparato, las paletas giran, teóricamente, con lo negro hacia adelante.²⁵

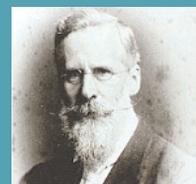
OTRAS FUENTES DE ESTUDIO

- **Paul F. Schurmann**, *Historia de la Física*, Nova, Buenos Aires, 1946. Ese libro resume 25 siglos de ciencia a través de las ideas centrales y la biografía de sus investigadores e investigadoras. Está disponible para consulta en cuatro bibliotecas de Buenos Aires.
- **Danni AyalaHinojosa**, *Composición de la atmósfera terrestre*, <http://www.ecuadorciencia.org/articulos.asp?id=5677>
- **Universidad Tecnológica Metropolitana del Estado de Chile**, *Apuntes de fisicoquímica*, <http://www.ingenieriaquimica.net/recursos/descarga.php?id=148&accion=descargar>
- **Georges Bernard** (Trad. castellana de E. Milà, 2000), Schneider Electric, *La ruptura por auto expansión*, Cuaderno técnico 171, Buenos Aires. (Edición francesa, 1993). Da detalles técnicos sobre las propiedades de los gases en la extinción del arco eléctrico en interruptores. <http://www.ingeborda.com.ar/biblioteca/Biblioteca%20Internet/Catalogos%20de%20Fabricantes/Materiales%20Electricos/Schneider/Cuadernos%20Tecnicos%20CT/CT171.pdf>
- **Giordano J. L.**, 2007 *Cómo funcionan las cosas: La esfera de plasma* (Santiago: <http://www.profisica.cl>) Contiene datos técnicos y fotos sobre el funcionamiento de una bola de plasma, y algunos experimentos que se pueden hacer con ella, y con lámparas fluorescentes compactas, o de bajo consumo, aun cuando estén agotadas. <http://www.profisica.cl/comofuncionan/como.php?id=39> (Consulta: Julio 13, 2009)

²⁵ Cuando queda un poco de aire dentro del radiómetro, funciona mejor que con buen vacío, y lo hace en sentido inverso al dicho. Eso se debe a la agitación térmica de las moléculas del aire residual en el tubo, mayor en las proximidades de las superficies negras, que alcanzan una temperatura mayor que las superficies blancas.



- La tensión de descarga depende de la forma de los electrodos. Cuando el negativo termina en punta y el positivo es plano, la tensión es mayor que en el caso opuesto.



- Crookes fue un científico serio y de renombre, y sus llamativos experimentos trascendieron el círculo de especialistas. Una vez sugirió la posible existencia de un campo de fuerzas psíquico, lo que alentó muy atrevidas especulaciones; las de Wilhelm Reich (1897–1957) entre ellas, quien afirmó la existencia de cuantos de deseo, que llamó *orgones*. Intentó amplificarlos con unas *cajas orgónicas*. La superficialidad y charlatanería se presentan como consuelos de todos los tiempos para la ignorancia. Toda sociedad provee, también hoy, muchos ejemplos. Abajo, Reich.

