

# UNIDAD 1

## Ley de Ohm

---

### 1. Composición atómica de la materia

Todos los objetos se componen de átomos. Si pudiéramos ampliar lo suficiente un pequeño punto de la superficie de un objeto, como por ejemplo una manzana, veríamos los átomos que la componen. Los átomos interaccionan entre ellos de manera que tienden a permanecer unidos formando una estructura que es la propia manzana.

En la figura 1-1 se ilustra la idea de que en la naturaleza existen diversas clases de átomos. Concretamente, se ven tres clases de átomos que se diferencian por su tamaño. También se representan las fuerzas de unión que existen entre ellos mediante líneas. Piense por un momento lo que le ocurriría a la manzana si no existieran dichas fuerzas. Cada átomo sería independiente y la manzana se evaporaría en forma de gas monoatómico. Es evidente que la manzana existe porque sus átomos están unidos.

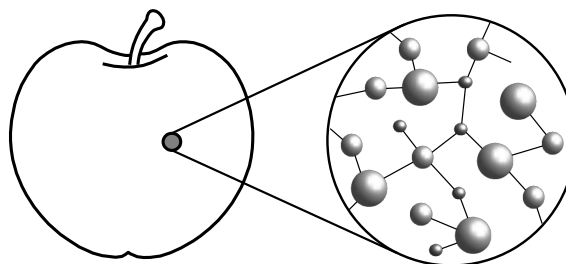


Figura 1-1: estructura atómica de una manzana

Se conocen algo más de 100 clases diferentes de átomos que se encuentran ordenados en la tabla de la figura 1-2, a la que se denomina tabla periódica de los elementos. Cada casilla representa a una clase de átomo y contiene un símbolo formado por letras que son una abreviatura del nombre del átomo. En algunos casos la relación entre el símbolo y el nombre es evidente. Por ejemplo, el símbolo del carbono es la letra C. En otros casos no es tan evidente. Por ejemplo, el símbolo del cobre es Cu del latín cuprum.

57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr

Figura 1-2: tabla periódica de los elementos

Además del símbolo del átomo en cada casilla de la tabla periódica de los elementos hay un número al que se llama número atómico cuyo significado se comprenderá más adelante. Por ejemplo, el número atómico del carbono es 6. La figura 1-3 es reúne las clases de átomos a las que se hará referencia en la presente unidad incluyendo la denominación, número atómico y símbolo.

Denominación	Número atómico	Símbolo
Hidrógeno	1	H
Carbono	6	C
Nitrógeno	7	N
Aluminio	13	Al
Cloro	17	Cl
Cobre/Cuprum	29	Cu
Plata/Argentum	47	Ag
Tungsteno/Wolframio	74	W
Oro/Aurum	79	Au

Figura 1-3: clases de átomos a los que se hace referencia en la unidad

Todos los materiales que existen, naturales y artificiales, se forman a partir de los átomos de la tabla periódica. El problema es que se conocen más de 55 millones de materiales distintos. Entonces, ¿cómo es posible que con algo más de 100 clases de átomos se puedan obtener más de 55 millones de materiales diferentes? La respuesta es que los átomos se combinan de múltiples formas.

Del estudio de como se combinan los átomos se encarga una rama de la ciencia que se llama química. Afortunadamente no es necesario estudiar química para comprender como funcionan los circuitos eléctricos, pero debemos ser conscientes de que los átomos se combinan de múltiples formas y que por eso existen tantos materiales diferentes.

Por ejemplo, un cable constan de un conductor de cobre y un aislante de policloruro de vinilo (PVC). A nivel microscópico el cobre tiene una estructura compuesta por átomos de cobre, todos iguales. Por otro lado, el PVC tiene una estructura formada por átomos de cloro, carbono e hidrógeno, en las proporciones adecuadas. La proporcionalidad de cada clase de átomo la indica la fórmula química del material, que en el caso del PVC es  $C_2H_3Cl$ . Este fórmula indica que por cada átomo de cloro hay tres átomos de hidrógeno y dos de carbono.



Figura 1-3: constituyentes de un cable

## 2. Partículas elementales

Al principio se supuso que los átomos eran como las esferas macizas de la figura 1-3. Pero, pronto las evidencias experimentales demostraron que los átomos se podían romper en trozos más pequeños a los que se llamó partículas elementales. Se descubrieron tres tipos de partículas elementales, a saber: electrones, protones y neutrones. En el próximo apartado veremos como se ordenan las partículas elementales dentro del átomo. Por ahora, nos centraremos en las partículas propiamente dichas.

Recordemos que existen algo más de 100 clases de átomos diferentes que están ordenados en la tabla periódica de los elementos. Por comodidad, en la figura 2-1 se representa una pequeña porción de dicha tabla, que usaremos en la siguiente explicación.

Cada clase de átomo se distingue mediante un número al que se llama número atómico y es igual al número de protones que tiene en el núcleo. Por ejemplo, el número atómico del carbono es 6, lo que significa que todos los átomos de carbono tienen exactamente 6 protones en el núcleo. Si se añade un protón al núcleo del carbono, entonces deja de ser carbono para convertirse en nitrógeno.

Número atómico del carbono: 6		Número atómico del nitrógeno: 7	
5 B	6 C	7 N	8 O
13 Al	14 Si	15 P	16 S

Figura 2-1: transformación del carbono en nitrógeno

La cantidad de neutrones y electrones no influye en la clase de átomo. Lo que determina la clase de átomo es única y exclusivamente el número de protones dado por la tabla periódica. Por eso, al número de protones se le llama número atómico. Entonces surge la pregunta ¿cuántos neutrones y electrones tienen los átomos?

Respecto a los electrones digamos que en principio su número es el mismo que el de protones, es decir, es igual al número atómico. Pero, no es raro que un átomo pierda o gane algún electrón, por lo que su número puede variar. Respecto a los neutrones digamos que los átomos de una misma clase pueden tener distinta cantidad. Por ejemplo, existen átomos de carbono con 6, 7 u 8 protones.

Es interesante observar que los 55 millones de materiales que se conocen se forman a partir de solamente tres componentes básicos, a saber: electrones, protones y neutrones. Estos tres componentes se unen para formar los átomos de la tabla periódica que, a su vez, se combinan para formar todo los materiales.

Las partículas elementales se imaginan como se ilustra en la figura 2-2, es decir, como esferas que tienen masa y carga eléctrica. Respecto a la masa sólo interesa observar que un electrón tiene mucha menos masa que un protón o neutrón. Respecto a la carga eléctrica digamos que es una propiedad que poseen el protón y el electrón; el neutrón no tiene carga eléctrica. Además, los protones y electrones tienen exactamente la misma cantidad de carga eléctrica, pero de naturaleza opuesta. Se dice que el protón tiene carga positiva y el electrón negativa.

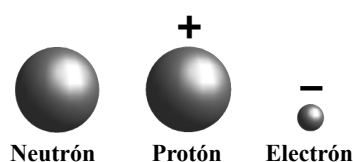


Figura 2-2: propiedades de las partículas

Hagamos un ejercicio de imaginación para comprender lo que es la carga eléctrica. Supongamos que todavía no se conoce su existencia y que somos un grupo de científicos que realiza el experimento de la figura 2-3. El experimento consiste en acercar protones y electrones para ver qué es lo que ocurre. Entonces, descubrimos que interaccionan del modo que indican las flechas: dos protones o dos electrones se repelen mientras que un protón y un electrón se atraen. ¿Cómo podríamos explicar estas fuerzas?

Para explicar las fuerzas observadas en el experimento empezaremos admitiendo que los protones y electrones tienen una propiedad especial a la que llamaremos carga eléctrica. Así, ya podemos decir que las fuerzas están originadas por la carga eléctrica. Por otra parte, para justificar el hecho de que las fuerzas pueden ser atractivas y repulsivas admitimos que la carga de los protones y electrones es de distinta naturaleza. Entonces, les damos dos nombres diferentes: carga positiva para el protón y negativa para el electrón. Así, podemos explicar el sentido de las fuerzas diciendo que cargas de igual signo se repelen y de distinto signo se atraen.

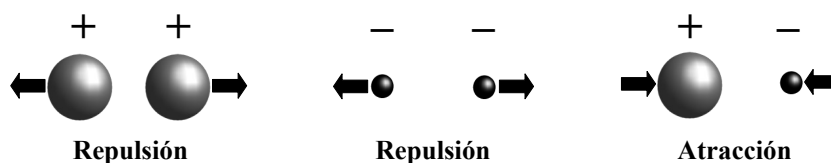


Figura 2-3: cargas de igual signo se repelen y de distinto signo se atraen

La conclusión es que la carga eléctrica es una propiedad que se inventa para justificar la existencia de las fuerzas que surgen entre electrones y protones. Además, las denominaciones carga positiva y negativa tienen un origen histórico, como veremos más adelante. Las cargas eléctricas podían haberse llamado de otra forma, por ejemplo, carga roja y negra. No obstante, los nombres carga positiva y negativa son más convenientes porque la experiencia ha demostrado que un tipo de carga neutraliza a la otra, al igual que los números positivos y negativos se restan entre sí.

### 3. Estructura del átomo

A lo largo de la historia se han propuesto diversos modelos atómicos para explicar como se ordenan las partículas elementales dentro del átomo. Pero, sin duda el modelo más conocido, al que denominaremos clásico, es el de la figura 3-1. En dicha figura se representa un átomo de carbono, pero todos los átomos tienen la misma estructura. Sólo se diferencian en el número de partículas.

Según el modelo clásico del átomo los protones y neutrones se agrupan en un punto central al que llamamos núcleo y los electrones giran a su alrededor distribuidos en diversas órbitas, creando lo que se denomina corteza del átomo. El modelo recuerda al sistema solar con el sol ocupando el centro y los planetas girando a su alrededor.

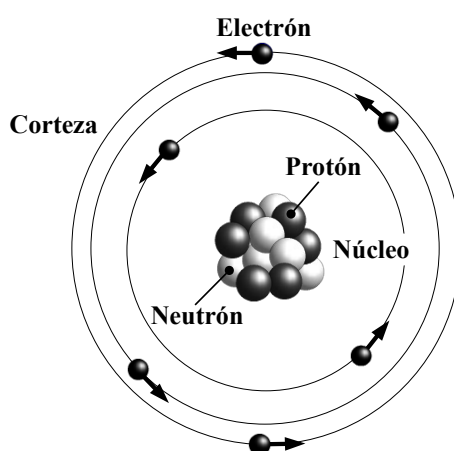


Figura 3-1: modelo clásico del átomo de carbono

A la vista de la figura 3-1 surgen dos dudas. En primer lugar, los electrones tienen carga negativa y son atraídos por los protones del núcleo que tienen carga positiva; entonces, ¿por qué no se estrellan contra el núcleo? En segundo lugar, los protones tienen carga positiva y se repelen; entonces, ¿por qué no explota el núcleo?

La razón por la cual los electrones no se estrellan contra el núcleo se comprenderá mediante el símil que se muestra a la izquierda de la figura 3-2. Tenemos un objeto atado a una cuerda y lo hacemos girar. Debido al movimiento de giro el objeto experimenta una fuerza centrífuga que tira hacia fuera tratando de que salga volando. Pero, la cuerda ejerce una fuerza centrípeta igual y opuesta a la centrífuga de manera que el objeto se mantiene girando de forma estable. Análogamente, como se muestra a la derecha de la figura 3-2, debido a su movimiento de giro al rededor del núcleo los electrones experimentan una fuerza centrífuga. Pero, la atracción hacia el núcleo genera una fuerza centrípeta que neutraliza a la centrífuga de manera que el electrón se mantiene girando en una órbita estable..

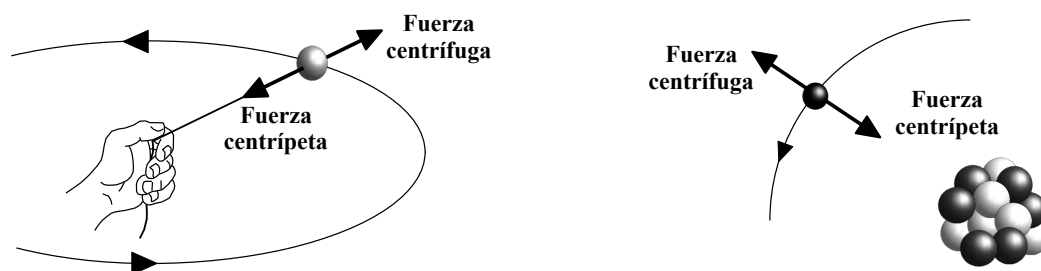


Figura 3-2: equilibrio entre las fuerzas centrífuga y centrípeta

La otra cuestión que se planteo es ¿por qué no explota el núcleo? Debería explotar ya que los protones se repelen entre sí. Para responder a esta pregunta los físicos tuvieron que inventar una nueva propiedad a la que llamaron fuerza nuclear. Se trata de una propiedad que tienen los protones y neutrones, los electrones no tienen fuerza nuclear. La fuerza nuclear es la más poderosa de la naturaleza y siempre es atractiva. Pero, solo surge cuando los protones y neutrones están muy próximos entre si. Actúa como si fuera un pegamento que recubre los protones y neutrones, y que solo se manifiesta cuando estas partículas entran en contacto, como se muestra en la figura 3-3.

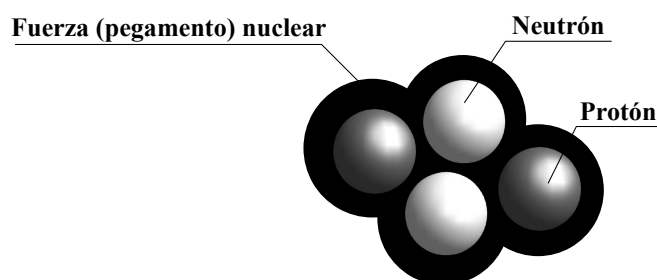


Figura 3-3: fuerza nuclear

Anteriormente se dijo que el número atómico es el número de protones que tiene un átomo en el núcleo. También se dijo que en principio un átomo tiene la misma cantidad de electrones que de protones. Como las cargas de distinto signo se neutralizan resultará que en principio los átomos son neutros. No obstante, no es raro que un átomo pierda o gane algún electrón. Si lo pierde, quedará con más protones que electrones, es decir, cargado positivamente. Contrariamente, si gana algún electrón, quedará con más electrones que protones, es decir, cargado negativamente.

Un detalle importante es que los átomos siempre se cargan eléctricamente por ganancia o pérdida de electrones, nunca por pérdida o ganancia de protones. Para comprender la razón consideremos la situación de la figura 3-4, donde se representa el encuentro entre dos átomos. Las órbitas más externas de los átomos se tocan y los electrones que se encuentran en ellas resultan afectados. En este caso se supone que un electrón pasa de un átomo al otro. El átomo que gana el electrón se carga negativamente y el que lo pierde positivamente. Los protones y neutrones nunca resultan afectados cuando los átomos interaccionan porque están firmemente sujetos por fuerzas nucleares y no pueden abandonar el núcleo.

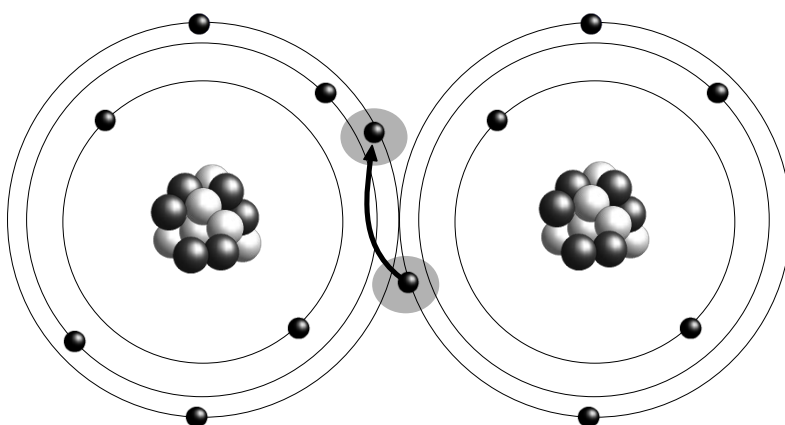


Figura 3-4: transferencia de un electrón de un átomo a otro



## 4. Conductores

Un cable consta de un conductor y un aislante. Aunque no se haya explicado todavía lo que es la corriente eléctrica digamos que los conductores son materiales que conducen la corriente eléctrica, mientras que los aislantes son materiales que impiden la circulación de la corriente eléctrica. Tan importante es la función del conductor como la del aislante; un cable funciona correctamente no solo porque el conductor conduce la corriente eléctrica sino también porque el aislante impide que la corriente se escape y circule por donde no debe. En este y el siguiente apartado, veremos donde está la diferencia entre conductores y aislantes a nivel microscópico, lo que ayudará a comprender lo que es la corriente eléctrica más adelante.



Figura 4-1

Los materiales más utilizados como conductores en la fabricación de cables son el cobre y aluminio. Otros materiales que también se emplean como conductores son la plata y oro, pero como son muy caros y sólo se usan en pequeñas cantidades en circuitos electrónicos. Ordenando dichos materiales de mejor a peor conductor, tendremos: plata, cobre, oro y aluminio.

Existen muchos otros materiales conductores, pero no son lo suficientemente buenos conductores como para ser utilizarlos como tales, aunque a veces tienen alguna propiedad útil. Por ejemplo, el tungsteno (wolframio) es un material conductor peor que los anteriores y nadie fabricaría cables de tungsteno, pero tiene la propiedad de soportar temperaturas muy altas sin llegar a fundirse y por eso se emplea en la fabricación de filamentos para lámparas incandescentes.

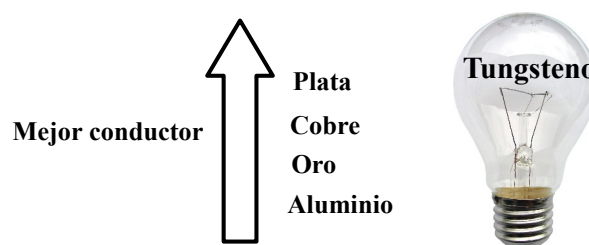


Figura 4-2: materiales conductores

Seguidamente veremos cómo son los materiales conductores a nivel microscópico. Para ello, nos centraremos en el caso particular del cobre, cuya estructura atómica se muestra en la figura 4-3. El número atómico del cobre es 29, lo que significa que en el núcleo hay 29 protones. Por eso, se ha dibujado el núcleo como una esfera con una carga +29. Por otro lado, girando alrededor del núcleo hay 29 electrones distribuidos en varias órbitas. En principio el átomo es neutro porque la carga positiva de los 29 protones del núcleo se compensa con la negativa de los 29 electrones.

El electrón más externo es el más importante porque determina el comportamiento eléctrico del cobre. Este electrón es el primero que resulta afectado cuando el átomo de cobre interacciona con otros átomos. Para centrar la atención en el electrón más externo agruparemos el núcleo y el resto de los electrones (zona sombreada). La agrupación contendrá los 29 protones del núcleo y los 28 electrones más internos. Por tanto, tendrá una carga neta de +1. A la derecha de la figura 4-3 se representa esta agrupación como una esfera de carga +1. A partir de este momento utilizaremos esta forma simplificada del átomo de cobre.

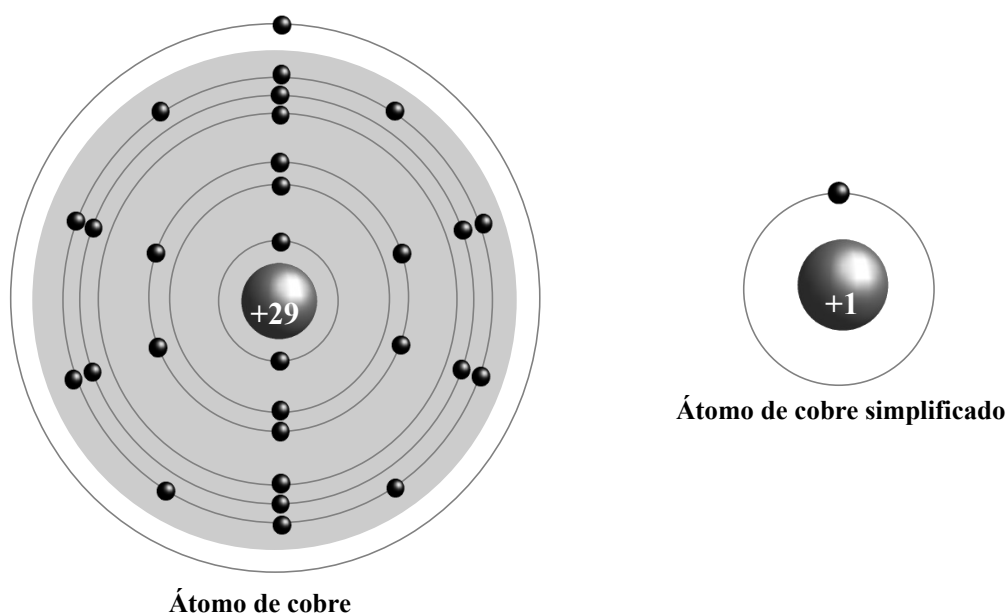


Figura 4-3: estructura completa y simplificada del átomo de cobre

En la figura 4-4 se muestra un trozo de cobre con los átomos representados de forma simplificada. Cuando se unen muchos átomos de cobre ocurre que los electrones más externos sienten la influencia de los átomos vecinos hasta el punto de que dejan de estar ligados a sus átomos originales para convertirse en electrones libres. Los electrones libres se llaman así porque no pertenecen a ningún átomo en particular y se mueven a lo largo y ancho del cuerpo de cobre.

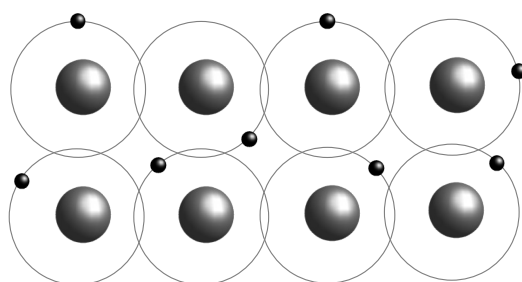


Figura 4-4: átomos de cobre interaccionando entre ellos

Aunque nos hemos centrado en el cobre, en realidad el aluminio, plata, oro y todos los materiales conductores tienen electrones libres, por eso son conductores. La estructura atómica de un conductor la imaginaremos como se muestra en la figura 4-5. Por un lado, están los átomos que han perdido electrones y por otro los electrones perdidos que se mueven por el interior del objeto como pequeños cometas que viajan sin rumbo.

Observe que los átomos no están quietos sino que vibran alrededor de una posición de equilibrio. La velocidad con la que vibran los átomos y se mueven los electrones libres está relacionado con la temperatura, que es un asunto que abordaremos más adelante.

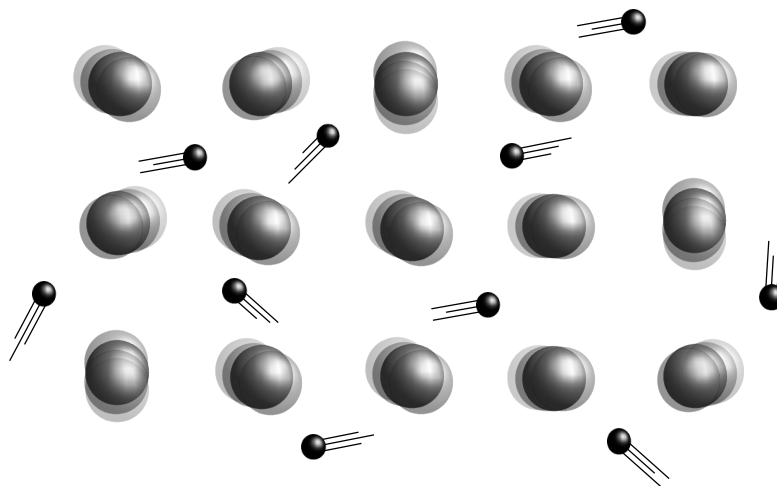


Figura 4-5: estructura microscópica de un conductor

## 5. Aislantes

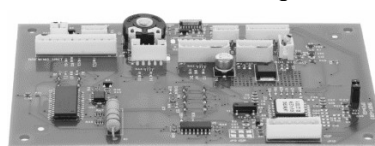
Para la fabricación de cables se emplean como aislantes el policloruro de vinilo (PVC), polietileno reticulado (XLPE) y etileno-propileno (EPR). Los tres materiales tienen la misma apariencia y no se distinguen a simple vista, aunque tienen propiedades diferentes como veremos más adelante. Otros materiales aislantes muy utilizados en electrónica para la construcción de circuitos impresos son la fibra de vidrio y baquelita.

Además de los materiales mencionados es importante saber que el aire y el agua son aislantes. El aire es el aislante que separa los cables desnudos en los tendidos de alta tensión. Respecto al agua hay que advertir que es aislante sólo cuando está en estado puro, es decir, destilada. En estado natural el agua siempre contiene sales disueltas que la hacen conductora.

**PVC, XLPE ó EPR**



**Fibra de vidrio o baquelita**



**Agua destilada**



Figura 5-1: ejemplos de materiales aislantes

Los materiales aislantes suelen tener una estructura atómica bastante compleja formada por átomos de distinta clase en proporciones bien definidas (véase la figura 1-3 donde se muestra la fórmula del PVC). Cuando los átomos se unen entre sí para dar lugar a un aislante frecuentemente ocurre que hay átomos que toman electrones y se cargan negativamente, mientras que otros ceden electrones y se cargan positivamente. Esta es la idea que se representa en la figura 5-2. Los átomos más oscuros se supone que están cargados positivamente y los más claros negativamente.

En cualquier caso los átomos de los materiales aislantes no permiten la existencia de electrones libres. Todos los electrones están sujetos en el interior de algún átomo de manera que podemos imaginar que la estructura de un aislante es un conjunto de átomos cargados positivamente y negativamente entre los cuales no hay electrones libres, como se muestra en la figura 5-2.

Observe que al igual que ocurre con los conductores, los átomos de los aislantes no están quietos sino que vibran alrededor de una posición de equilibrio. La velocidad de vibración está relacionado con la temperatura, que es un asunto que veremos en el siguiente apartado.

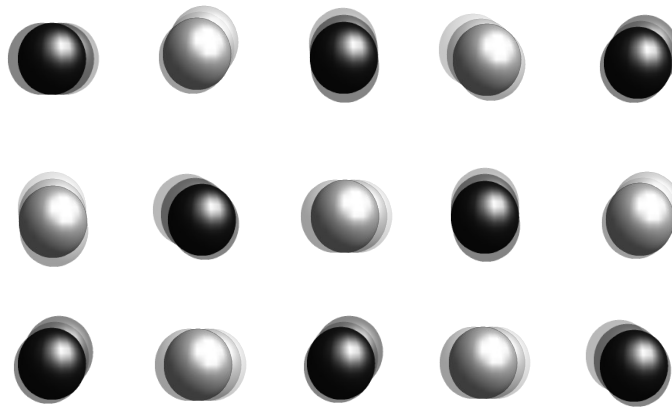


Figura 5-2: estructura microscópica de un aislante

## 6. Concepto de temperatura

Anteriormente se dijo que los átomos que componen la materia vibran alrededor de una posición de equilibrio. Además, en el caso de los conductores, también los electrones libres están moviéndose a lo largo y ancho del cuerpo. Para resumirlo en pocas palabras diremos que todas las partículas que componen los cuerpos se mueven, sin especificar el tipo de partículas (electrones libres o átomos).

En nuestra piel hay sensores que detectan dicho movimiento y producen la sensación de temperatura. Cuanto más rápido sea el movimiento de las partículas mayor será la sensación de temperatura. A nivel microscópico la temperatura no es más que el movimiento de partículas. Por eso, a este movimiento a veces se le denomina agitación térmica.



Figura 6-1: James Joule

James Joule fue un científico nacido en 1818 que ideó un experimento con el que demostró que la temperatura de los objetos se debía a la agitación térmica de las partículas que los componen. En la figura 6-2 se muestra dicho artefacto. Consiste en unas paletas sumergidas en un depósito de agua. Las paletas giran cuando cae una masa gracias a un mecanismo de poleas. Además, el artefacto disponía de un termómetro para medir la temperatura del agua. Con las paletas en reposo el termómetro marca una cierta temperatura. Al caer la masa las paletas agitaban el agua aumentando el movimiento de las partículas que la componen, con lo que aumentaba la temperatura registrada por el termómetro.

Más adelante veremos que la corriente eléctrica al circular por un conductor también aumenta la agitación de las partículas que lo componen. Por eso, los conductores se calientan al ser recorridos por una corriente eléctrica. Al fenómeno se le llamó efecto Joule en honor a este científico, aunque como puede ver el artefacto que ideó James Joule no tenía nada que ver con la electricidad.

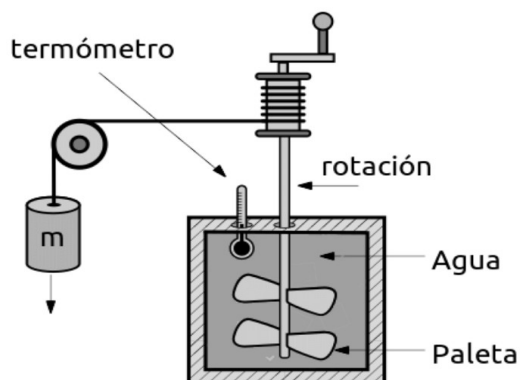


Figura 6-2: instrumento ideado por James Joule

## 7. Efecto triboeléctrico

Cuando los átomos de un material conductor se unen entre sí sucede lo que se muestra en la figura 4-5. Los átomos pierden algún electrón y se quedan cargados positivamente. Por otra parte, los electrones perdidos se convierten en libres, lo que significa que pueden moverse por el interior del material. Como consecuencia, la estructura atómica de un material conductor se imagina formada de átomos cargados positivamente rodeados de los electrones libres. A nivel microscópico dentro del cuerpo vemos que hay puntos positivos y puntos negativos. No obstante, cada trocito del conductor es neutro porque tiene la misma cantidad de átomos cargados positivamente que de electrones libres.

Por otra parte, como se muestra en la figura 5-2, los materiales aislantes se caracterizan por la ausencia de electrones libre y a nivel atómico solo vemos átomos. Cuando los átomos se unen para formar un aislante siempre ocurre que hay átomos que toman electrones y átomos que los ceden. Esta es la idea que se representa en la figura 5-2. Se supone que los átomos oscuros se han cargado positivamente porque han cedido electrones, mientras que los átomos claros se han cargado negativamente porque han tomado electrones. A nivel microscópico dentro del cuerpo vemos que hay puntos positivos y puntos negativos. No obstante, en conjunto el material sigue siendo neutro porque los electrones que han ganado unos átomos son exactamente los que han perdido otros.

La conclusión de lo anterior es que en principio todos los materiales son neutros por naturaleza. No obstante, la neutralidad natural de los cuerpos sólo es posible si están completamente aislados. Cuando dos cuerpos entran en contacto siempre sucede que uno tienden a captar electrones y el otro tiende a cederlos. A este fenómeno se le llama efecto triboeléctrico. La consecuencia es que el cuerpo que pierde electrones se carga positivamente y el que los gana negativamente. El efecto triboeléctrico es tan tan débil que pasa desapercibido, pero realmente se produce.

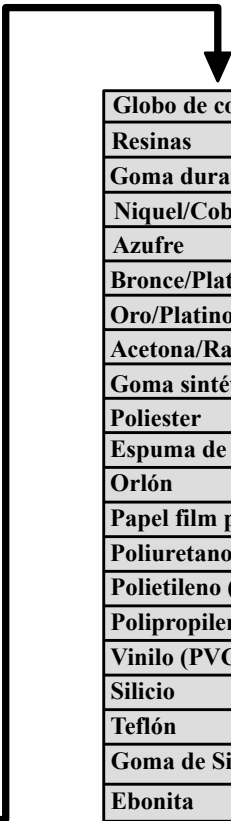
Un detalle importante es que lo que se transfieren de un cuerpo a otro siempre son electrones, nunca se transfieren protones. Esto es así porque cuando dos cuerpos se tocan lo que en realidad ocurre es que se se tocan las órbitas más externas de la corteza atómico de manera que solamente resultan afectados los electrones que se encuentran en dichas órbitas (véase la figura 3-4). Los protones están fijos en el átomo, sujetos en el núcleo por la fuerza nuclear y no resultan afectados.

La lista de la figura 7-1 ordena a los materiales atendiendo al efecto triboeléctrico. En la parte superior se encuentran los que ceden electrones con mayor facilidad y en la parte baja los que tienden a captar electrones con mayor fuerza. Observe que el aire es el material que mayor tendencia tiene a ceder electrones y la ebonita el que tiende a captarlos con mayor avidez. Con la lista de la figura 7-1 podemos predecir cómo se cargarán dos cuerpos al entrar en contacto. Por ejemplo, si tocamos un tubo de PVC con la mano, nuestro cuerpo tenderá a perder electrones y el tubo a ganarlos. Por tanto, nosotros nos cargaremos positivamente y el tubo negativamente.

El efecto triboeléctrico es tan débil que no se aprecia, pero podemos potenciarlo frotando los objetos entre si. Por ejemplo, un experimento típico consiste en frotar un globo contra el cabello. El cabello pierde electrones y el globo los gana. Inicialmente el cabello y el globo son neutros. Pero, al pasar electrones de uno hacia el otro se rompe la neutralidad de ambos. El cabello se carga positivamente por pérdida de electrones, mientras que el globo se carga negativamente por ganancia de electrones.

**MAYOR FACILIDAD A  
CEDER ELECTRONES**

Aire
Piel humana
Cuero
Piel de conejo
Vidrio
Cuarzo
Mica/Pelo humano
Nylon
Lana
Plomo
Piel de gato
Seda
Aluminio
Papel
Algodon
Acero
Madera
Polimetilmetacrilato
Ambar
Lacre
Acrílico
Poliestireno



Globo de coma
Resinas
Goma dura
Niquel/Cobre
Azufre
Bronce/Plata
Oro/Platino
Acetona/Rayón
Goma sintética
Poliester
Espuma de poliestireno
Orlón
Papel film para embalar
Poliuretano
Polietileno (cinta Scotch)
Polipropileno
Vinilo (PVC)
Silicio
Teflón
Goma de Silicono
Ebonita

**MAYOR TENDENCIA A  
CAPTAR ELECTRONES**

Figura 7-1: materiales ordenados según el efecto triboeléctrico



## 8. Unidad de la carga eléctrica

Al frotar un globo contra los cabellos se potencia el efecto triboeléctrico y se produce una transferencia significativa de electrones del cabello hacia el globo y ambos cuerpos adquieren una carga eléctrica que produce efectos visibles. Como se ve en la figura 8-1 utilizaremos la letra  $Q$  para referirnos a la carga adquirida por los cuerpos. El cabello pierde electrones por lo que adquiere una carga positiva  $+Q$  y el globo gana electrones por lo que adquiere una carga negativa  $-Q$ . Ambas cargas son iguales en magnitud porque el globo gana exactamente los mismos electrones que pierde el cabello. Si el cabello pierde un millón de electrones, entonces el globo ganará exactamente un millón de electrones.

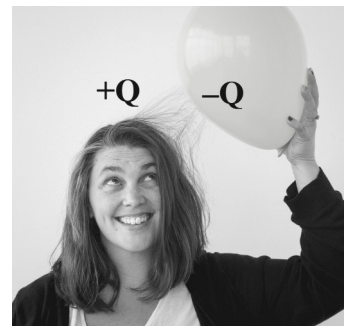


Figura 8-1: potenciación del efecto triboeléctrico por frotamiento

En la figura 8-2 se representa a un cuerpo A cediendo electrones a otro B. En consecuencia el cuerpo A se carga positivamente y el B negativamente. Observe que la carga adquirida por un cuerpo tiene que ser igual a un número entero de electrones ganados o perdidos. Un cuerpo puede perder o ganar 10 electrones, pero no 10,5. Por ello, se dice que la carga está cuantizada, es decir, aumenta o disminuye en cuantos o saltos igual a la carga de un electrón o protón.

La forma más inmediata de indicar la carga de un cuerpo consiste en dar el número de electrones ganados o perdidos. No obstante, el sistema internacional de unidades emplea una unidad denominada culombio que se designa con la letra  $C$ . Un culombio negativo equivale a la ganancia de  $6,242 \cdot 10^{18}$  electrones, y un culombio positivo equivale a la pérdida de esa misma cantidad de electrones.

Por ejemplo, en la figura 8-2 se supone que se produce una transferencia de  $8 \cdot 10^{17}$  electrones del cuerpo A al cuerpo B. Por tanto, ambos cuerpos adquieren una carga de 0,128 culombios. Pero, en el cuerpo A esta carga es positiva, mientras que en el cuerpo B es negativa. El culombio es una unidad grande y son frecuentes valores de carga del orden de las milésimas o millonésimas de culombio.

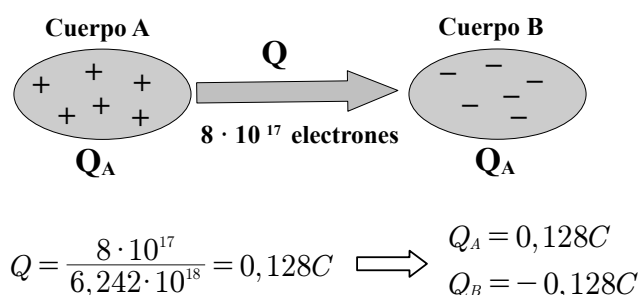


Figura 8-2: ejemplo de uso del culombio

**Ejercicio n.º 1**

Una barra de vidrio se frota con un paño de seda de manera que se produce la transferencia de  $5 \cdot 10^{16}$  electrones de un cuerpo al otro. ¿Cuál es el valor de la carga adquirida por dichos cuerpos?

**Solución**

Para hallar la carga en culombios equivalente a un grupo de  $5 \cdot 10^{16}$  electrones efectuamos la siguiente operación:

$$Q = \frac{5 \cdot 10^{16}}{6,242 \cdot 10^{18}} = 8,02 \cdot 10^{-3} C = 8,02 mC$$

donde la cantidad  $6,242 \cdot 10^{18}$  es el número de electrones de un culombio. El resultado es que se transfiere una carga de 8,02mC de un cuerpo al otro. Por otra parte, según la tabla de la figura 7-2 la barra de vidrio cede electrones al paño de seda. Por lo tanto, la barra de vidrio adquiere una carga de +8,02mC y el paño de seda adquiere una carga de -8,02mC

## 9. Concepto de corriente eléctrica o intensidad

En la figura 9-1 se muestra el circuito eléctrico más simple que podemos construir junto con su esquema. Se compone de una pila, una lámpara y un par de hilos de conexión. Los hilos de conexión son de cobre y el filamento de la lámpara de tungsteno. Por tanto, son conductores y contienen electrones que imaginamos como se muestra en la figura 4-5.

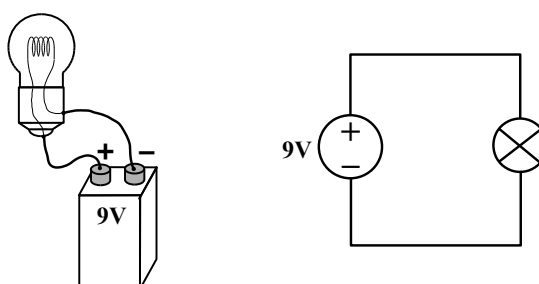


Figura 9-1: circuito elemental

Centremos la atención en el electrón libre que se representa en la figura 9-2. Como se muestra en la parte 'a', se supone que este electrón libre se encuentra inicialmente en el polo positivo de la pila. El electrón se quedaría pegado al polo positivo porque tiene carga negativa y siente atracción por dicho polo. Sin embargo, como se ve la parte 'b' la pila lo absorbe y lleva al polo negativo. Entonces, como se ve en la parte 'c', repelido el polo negativo y atraído por el positivo, el electrón se desplaza recorriendo el circuito hasta que nuevamente regresa al polo positivo. Entonces la fuente lo vuelve a absorber y se repite el proceso. El efecto de absorción de la fuente hace que el electrón esté dando vueltas indefinidamente. En el circuito existen muchos electrones libres y todos se mueven impulsados por la pila del modo que acabamos de describir. Consecuentemente, se genera una corriente de electrones.

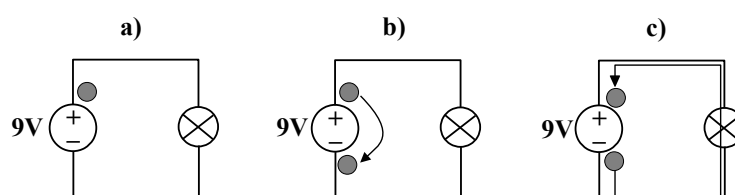


Figura 9-2: desplazamiento de un electrón libre a través del circuito

En la figura 9-3 se ilustra el concepto de corriente de electrones. Situémonos en el punto A del circuito. La pila impulsa los electrones libres en el sentido indicado por las flechas. Por lo tanto, veremos pasar electrones libres a través de A de derecha a izquierda. El efecto de impulsión de la pila depende del valor de su voltaje. Cuanto más grande sea el voltaje, mayor será la velocidad con que la fuente impulsará a los electrones y más electrones libres veremos pasar por segundo. En el caso de la figura 9-3 el voltaje de la pila es de 9V y se supone que origina una corriente de  $1,3 \cdot 10^{18}$  electrones por segundo.

Cada electrón transporta consigo una carga eléctrica, por lo que al moverse en grupo originan una corriente eléctrica o intensidad. En el sistema internacional de medida la unidad de la carga eléctrica es el culombio. Por lo tanto, la unidad de la corriente eléctrica o intensidad es el culombio por segundo. Para hallar el valor de la corriente eléctrica originada por una corriente de  $1,3 \cdot 10^{18}$  electrones tenemos que dividir esta cantidad por  $6,242 \cdot 10^{18}$  electrones que tiene un culombio, es decir:

$$I = \frac{1,3 \cdot 10^{18}}{6,242 \cdot 10^{18}} = 0,21 \frac{C}{s} = 0,21 A$$

Así, se obtiene una corriente eléctrica o intensidad de 0,21 culombios por segundo. El culombio por segundo se llama amperio y se designa con la letra A. Por eso, el resultado final es 0,21A.

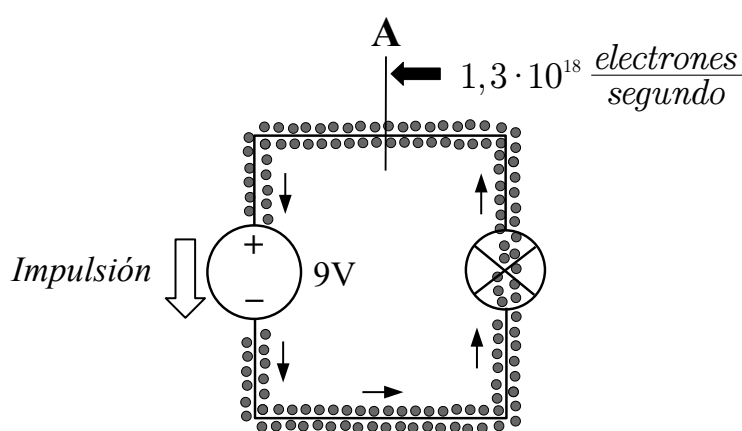


Figura 9-3: corriente de electrones.

### Ejercicio n.º 2

A través de un circuito circulan  $2,7 \cdot 10^{19}$  electrones por segundo. ¿Cuál es el valor de la intensidad?

### Solución

Para hallar la intensidad (culombios por segundo) equivalente a un corriente de  $2,7 \cdot 10^{19}$  electrones por segundo efectuamos la siguiente operación:

$$I = \frac{2,7 \cdot 10^{19}}{6,242 \cdot 10^{18}} = 4,33 \frac{C}{s} = 4,33 A$$

donde la cantidad  $6,242 \cdot 10^{18}$  es el número de electrones de un culombio. El resultado es que la intensidad es de 4,33A.

## 10. Concepto de voltaje

En el apartado anterior hemos utilizado un circuito muy simple para ilustrar el concepto de corriente eléctrica o intensidad (véase la figura 9-1). Dicho circuito se compone de una pila, un par de hilos de conexión y una lámpara. En este apartado centraremos la atención en la pila.

Una pila forma parte de una familia de dispositivos a los que se suele llamar fuentes de voltaje o también generadores de voltaje. En la figura 10-1 vemos algunos dispositivos pertenecientes a dicha familia. Su principal característica es que producen un efecto de impulsión capaz de empujar a los electrones libres existentes en los conductores de un circuito eléctrico. La magnitud de este efecto es equivalente a su voltaje. Así, una batería de 24V empujará a los electrones con mayor fuerza que otra de 12V, haciendo que circulen a mayor velocidad y causando mayor corriente eléctrica.

Todas las fuentes o generadores de la figura 10-1 producen un voltaje. Pero, de diferente forma. El voltaje de una batería o pila proviene de una reacción química. El panel solar produce un voltaje a partir de la luz debido al efecto fotoeléctrico. La dinamo de bicicleta convierte el trabajo mecánico en voltaje. En el presente tema no vamos a explicar cómo se produce el voltaje en estos dispositivos. Simplemente asumiremos que el voltaje de un generador o fuente se puede producir de distintas formas.



Figura 10-1: ejemplos de fuentes

Las fuentes o generadores de voltaje se representan utilizando los símbolos que se muestran en la figura 10-2. Los dos símbolos son igualmente válidos. En el símbolo de la izquierda el polo positivo se marca con el signo “+” y el polo negativo con el signo “-“. Estas indicaciones no son necesarias en el símbolo de la derecha ya que se da por entendido que el segmento fino y largo es el polo positivo y el segmento corto y ancho es el polo negativo.

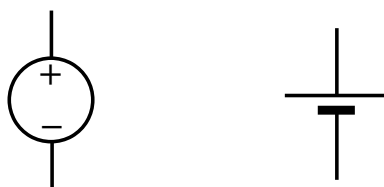


Figura 10-2: símbolos de las fuentes o generadores de voltaje

En la figura 10-3 se muestra dos circuitos eléctricos. En la parte “a” tenemos un circuito eléctrico que emplea como fuente un panel solar y en la parte “b” otro que utiliza una pila. Estos dos circuitos tienen la misma representación esquemática, que es la que se muestra en la parte “c”. La representación esquemática no cambia porque todas las fuentes o generadores de voltaje se representan en los esquemas utilizando el mismo símbolo ya que sobre el papel lo importante de una fuente de voltaje no es su principio de funcionamiento sino el hecho de que suministra un voltaje de valor,  $V$ .

Por lo que respecta a la presente unidad no es importante saber como se genera el voltaje de una fuente, solo importar su valor,  $V$ . Por eso, en todos los circuitos que veremos a partir de este momento, diremos que en el circuito hay una fuente o generador de voltaje, sin especificar si se trata de una pila, batería, panel solar o dinamo de bicicleta.

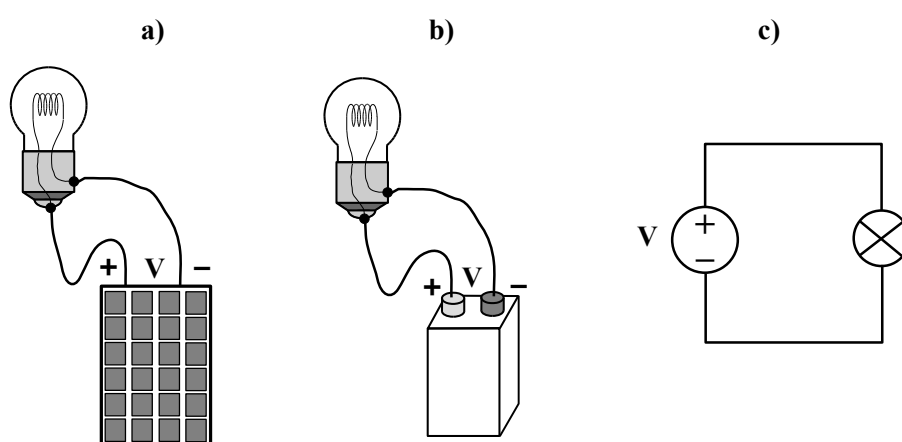


Figura 10-3: ejemplos de circuitos con distintos tipos de fuentes o generadores

Para medir voltajes se emplea un instrumento denominado voltímetro. Podemos medir el voltaje de una fuente mediante un voltímetro como se muestra en la figura 10-4. El voltímetro tiene dos terminales, uno de los cuales se marca con el signo “+”. En los voltímetros reales este terminal se identifica porque es de color rojo, mientras que el otro es de color negro.

En la figura 10-4 se conecta el voltímetro a los polos de una fuente de 9V de dos maneras diferentes. En la izquierda vemos que borne + del voltímetro está conectado al polo positivo de la fuente y el otro borne en el polo negativo. Así, en la pantalla del voltímetro aparecerá un número positivo, en este caso 9V. Por otra parte, a la derecha vemos que el voltímetro se ha conectado al revés. El borne marcado con el signo más está conectado al polo negativo de la fuente y el otro borne al polo positivo. Así, el voltímetro marcará un número negativo, en este caso -9V. En ambos casos el voltímetro indica el valor del voltaje de la fuente, el signo menos simplemente indica que la polaridad del voltímetro no coincide con la de la fuente.

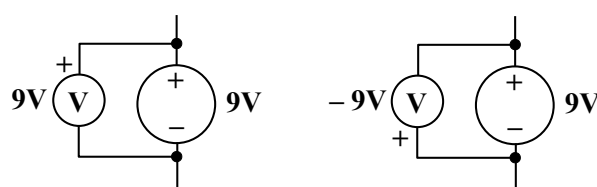


Figura 10-4: medición del voltaje de una fuente mediante un voltímetro

Para comprender mejor el funcionamiento del circuito podemos emplear un sistema como el que se muestra en la figura 10-5. Tenemos una bomba de compresión y un estrechamiento estrecho unidos mediante un par de tubos anchos. La bomba de compresión absorbe aire un tubo y lo comprime en el otro. De esta forma se crea una diferencia de presión entre los tubos que hace que el aire circule a través del estrechamiento.

Ahora supongamos que existe un instrumento, P, que mide diferencias de presión. Entonces, la diferencia de presión existente en este sistema la podríamos medir conectando el instrumento P de cualquiera de las tres formas que se muestra en la figura 10-5, es decir, entre los bornes de la bomba de compresión, entre dos puntos cualesquiera de los tubos o entre los bornes del estrechamiento. En cualquier caso mediríamos la misma presión porque solo existe una presión, la que existen entre los tubos.

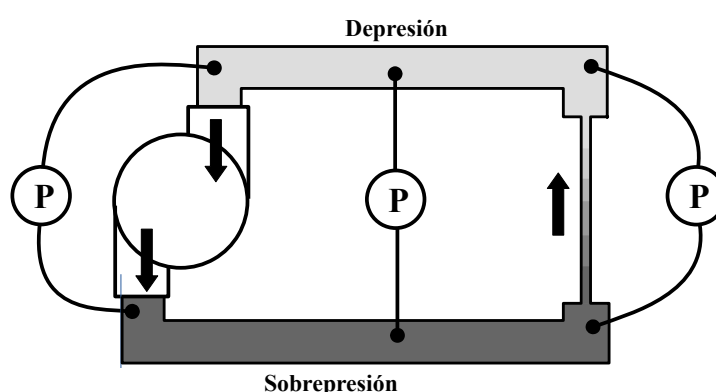


Figura 10-5: símil neumático de un circuito eléctrico

El circuito eléctrico de la figura 10-6 tiene semejanzas con el circuito neumático que acabamos de ver. Podemos imaginar que la fuente absorbe electrones por el polo positivo y los expulsa por el negativo, igual que la bomba de compresión absorbe aire por uno de sus extremos y lo expulsa por el otro. De esta forma podemos suponer que la fuente crea una especie de diferencia de presión eléctrica que empuja a los electrones. Esta diferencia de presión, a la que llamaremos voltaje, se mide mediante un voltímetro que se puede conectar de las tres formas mostradas en la figura 10-6, es decir, entre los polos de la fuente, entre dos puntos de los cables o en los bornes de la lámpara. En cualquier caso mediremos el mismo voltaje porque solo existe un voltaje o presión eléctrica, la que existe entre el conductor superior y el inferior.

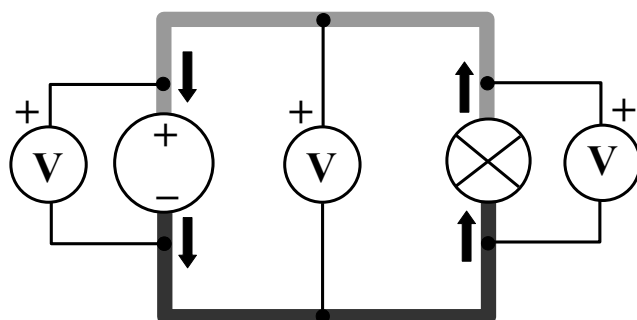


Figura 10-6: medición del voltaje en un circuito eléctrico



## 11. Efecto Joule

Al desplazarse por el interior del circuito los electrones libres chocan contra los átomos que componen los conductores, como se ilustra en la figura 11-1. Recordemos que los átomos están vibrando y que la magnitud de esa vibración es lo que nuestros sentidos interpretan como temperatura. Los choques de los electrones que se mueven impulsados por la fuente aumenta la velocidad de vibración de los átomos. En consecuencia, la corriente eléctrica origina un aumento en la temperatura de los hilos de conexión y el filamento de la lámpara. Este fenómeno se conoce como efecto Joule. Cuanto mayor sea la velocidad que imprime la fuente a los electrones libres, más violentos serán los choques y mayor la temperatura que alcanzarán los hilos de conexión y el filamento de la lámpara.

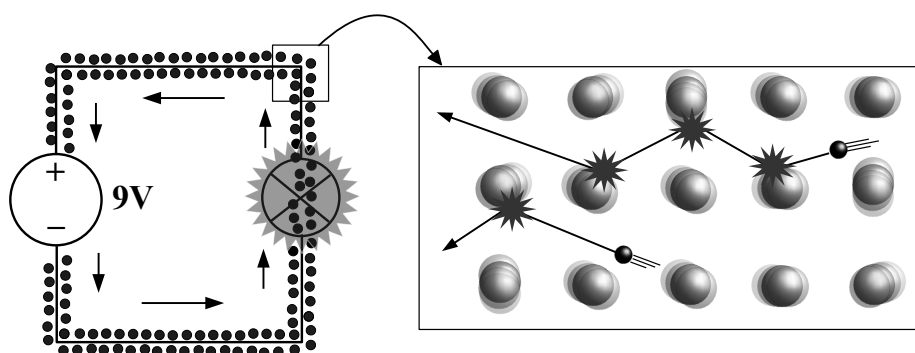


Figura 11-1: efecto Joule

El efecto Joule es el aumento de la vibración de las partículas (temperatura) debido a la corriente eléctrica y se produce tanto en los hilos de conexión como en el filamento de la lámpara. Pero, es mucho más intenso en el filamento de la lámpara. Los hilos de conexión, están diseñados para facilitar el paso de los electrones, mientras que el filamento está diseñado para potenciar el efecto Joule y así conseguir que se caliente hasta la incandescencia. El problema es que cuando los materiales se ponen incandescentes se reblandecen y funden. El tungsteno o volframio es un material capaz de ponerse incandescente sin llegar a fundirse, por eso se emplea para la fabricación de filamentos de lámparas.

Cuanto mayor sea el voltaje del generador, más rápido es el movimiento de los electrones y violentos los impactos contra los átomos. Por esto, la lámpara debe estar diseñada para soportar el efecto Joule producido por el voltaje de la fuente. En particular, la lámpara de la figura 11-1 debe estar diseñada para funcionar a 9V. Si el voltaje de la fuente fuera superior a 9V, el efecto Joule sería demasiado intenso y el filamento de la lámpara se fundiría. Por el contrario, si el voltaje de la fuente fuera inferior a 9V, el efecto Joule sería débil y la lámpara no luciría. Cada receptor está diseñado para trabajar a un voltaje determinado, al que se llama voltaje nominal.

En la práctica el efecto Joule se emplea para convertir la energía eléctrica en calor. Gracias al efecto Joule funcionan las lámparas incandescentes y también electrodomésticos tales como los calentadores de agua, estufas y cocinas eléctricas.



Figura 11-2: receptores cuyo funcionamiento está basado en el efecto Joule

En el caso de los cables el efecto Joule es perjudicial. En la figura 11-3 se muestra un cable compuesto por un alma de cobre recubierta por una funda aislante. Al ser recorrido por los electrones libres el alma de cobre se calienta por efecto Joule. Pero, el cobre es un material que se funde a una temperatura de unos 1000 grados centígrados. El problema está en la funda aislante.

Para la fabricación de cables se emplean tres tipos de materiales aislantes, a saber: PVC, XLPE y EPR. El PVC es un material termoplástico, lo que significa que se reblandece progresivamente conforme aumenta la temperatura. Por otra parte, el XLPE y EPR son termoestables. Esto significa que no se reblandecen con la temperatura, se mantienen igual de rígidos.

El PVC soporta por tiempo indefinido una temperatura de 70°C, mientras que el XLPE y EPR soportan 90°C. Por encima de estas temperaturas se acorta la vida de estos materiales, tanto más cuanto mayor sea la temperatura. Por tanto, la parte térmicamente débil de un cable siempre es el aislante.



Figura 11-3: el aislante es la parte termicamente más débil de un cable.

## 12. Resistencia eléctrica: concepto y cálculo

En la figura 11-1 vemos que por el interior de un conductor los electrones se mueven chocando contra los átomos que componen el conductor, lo que produce el calentamiento del mismo por efecto Joule. Debido a estos choques, también podemos decir que el material se opone a la circulación de los electrones. Dicha oposición se llama resistencia eléctrica.

En el circuito que se muestra en la figura 12-1 tanto los hilos de conexión como el filamento de la lámpara presenta una oposición o resistencia eléctrica al paso de los electrones. Esta resistencia se mide en una unidad que se llama Ohmio y se designa con la letra griega omega mayúscula ( $\Omega$ ).

Los hilos de conexión deben facilitar al máximo el paso de los electrones, por lo que se diseñan para tener una resistencia eléctrica lo más baja posible. Por ejemplo, en la figura 12-1 se supone que cada hilo de conexión tiene una resistencia de  $0,001\Omega$ . Por otra parte, el filamento de la lámpara se diseña para potenciar el efecto Joule con el fin de alcanzar la incandescencia. Para ello, se emplea un material peor conductor que para los hilos de conexión y se obtiene una resistencia eléctrica relativamente elevada. Por ejemplo, en la figura 12-1 se supone que la resistencia del filamento de la lámpara es de  $48\Omega$ .

Como se muestra a la derecha de la figura 12-1, la resistencia es una propiedad que se representa mediante un rectángulo, de manera que podemos utilizar este símbolo para dibujar cualquier componente cuya propiedad sea la resistencia. Por ejemplo, una lámpara, un termo eléctrico o una estufa.

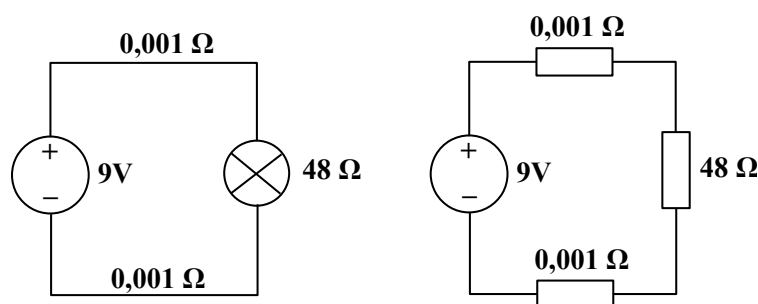


Figura 12-1: resistencia eléctrica de los hilos de conexión y el filamento de la lámpara

La resistencia eléctrica se mide mediante un instrumento denominado ohmetro cuyo símbolo se muestra a la izquierda de la figura 12-2. El instrumento tiene dos terminales que se conectan a los bornes del elemento cuya resistencia queramos conocer. En la figura 12-2 se mide la resistencia del filamento de una lámpara. Un detalle muy importante es que la resistencia nunca debe medirse cuando el dispositivo esté conectado al circuito, como se ilustra a la derecha de la figura 12-2. Si alguna vez se comete este error, existe la posibilidad de provocar la avería del instrumento.

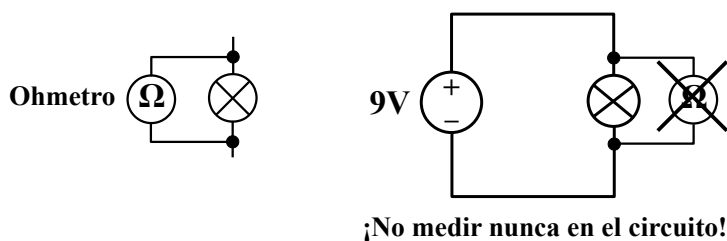


Figura 12-2: ohmetro

Experimentalmente se ha comprobado que la resistencia eléctrica de un conductor se puede calcular conociendo sus dimensiones físicas y constitución (material) mediante la siguiente fórmula:

$$R = \rho_t \frac{l}{S} \quad \text{Fórmula 12-1}$$

donde:

- $R$  es la resistencia del conductor, en óhmios ( $\Omega$ )
- $\rho_t$  (letra griega ro minúscula) es la resistividad del material, en ohmios por milímetro al cuadrado partido metro ( $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ ). Observe que se añade el subíndice  $t$  porque la resistividad del material depende de la temperatura, como veremos más adelante.
- $l$  es la longitud del conductor, en metros (m)
- $S$  es la sección del conductor, en milímetros al cuadrado ( $\text{mm}^2$ )

Como hemos dicho la fórmula 12-1 se obtiene experimentalmente. No obstante, tiene una justificación lógica que ilustraremos con la ayuda de la figura 12-3. Para ello, piense que la corriente eléctrica  $I$  es como un caudal de agua que circula por una tubería de longitud  $l$  y sección  $S$ . Cuanto mayor sea la sección  $S$  de la tubería más fácilmente circulará el agua (menor resistencia). Por eso, es lógico que en la fórmula 12-1 la sección  $S$  esté en el denominador. Por otra parte, cuanto mayor sea la longitud  $l$  de la tubería mayor oposición encontrará el agua (mayor resistencia). Por eso, es lógico que en la fórmula 12-1 la longitud  $l$  esté en el numerador. Todo lo anterior se resume diciendo que la resistencia es directamente proporcional a la longitud e inversamente proporcional a la sección.

Por otra parte, también es lógico que la resistencia del conductor dependa del material con el que está hecho. Por ejemplo, a igual sección y longitud un cable de aluminio tendrá mayor resistencia que un cable de cobre porque como sabemos el cobre es mejor conductor que el aluminio. La influencia del material se incluye en la fórmula 12-1 mediante el parámetro  $\rho$ , al que se llama resistividad del material. Cuanto mayor sea la resistividad peor conductor será el material. En la tabla de la figura 12-4 se da la resistividad de algunos materiales importantes.

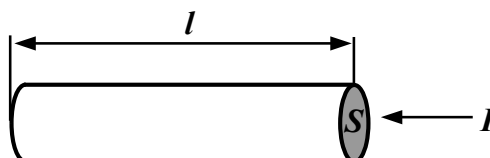


Figura 12-3: dimensiones físicas de un conductor, longitud y sección

La resistividad de un material depende de la temperatura a la que se encuentre. En la tabla de la figura 12-4 observe que las resistividades están dadas a 20°C. Para hallar la resistividad a una temperatura  $t$  que no sea 20°C se emplea la siguiente fórmula:

$$\rho_t = \rho_{20} (1 + \alpha(t - 20)) \quad \text{Fórmula 12-2}$$

donde:

- $\rho_t$  es la resistividad del material a una temperatura  $t$
- $\rho_{20}$  es la resistividad del material a 20°C
- $\alpha$  es el coeficiente de temperatura del material, en °C<sup>-1</sup>
- $t$  es la temperatura a la cual se desea conocer la resistividad, en °C

Un detalle interesante es que salvo raras excepciones la resistividad de los materiales conductores aumenta con la temperatura. Por tanto, la resistencia también crece con la temperatura. Esto es cierto para todos los materiales de la figura 12-4.

Material	Resistividad $\rho$ a 20°C $\frac{\Omega \cdot mm^2}{m}$	Coeficiente de temperatura $\alpha$ °C <sup>-1</sup>
Plata	0,0016	0,0037
Cobre	0,01786	0,00393
Oro	0,023	0,0034
Aluminio	0,02857	0,00446
Tungsteno	0,055	0,0041

Figura 12-3: resistividad y coeficiente de temperatura de materiales conductores

**Ejercicio n.º 3**

Calcule la resistencia de un hilo de cobre de 0,5 mm de diámetro y una longitud de 200m, suponiendo que está funcionando a una temperatura de 70°C.

**Solución**

Primer calcularemos la resistividad del cobre a 70°C mediante la fórmula 12-2, utilizando la resistividad del cobre a 20°C que obtenemos de la tabla de la figura 12-3:

$$\rho_t = \rho_{20} (1 + \alpha(t - 20))$$

$$\rho_{70} = 0,01786 (1 + 0,00393(70 - 20))$$

$$\rho_{70} = 0,02137 \frac{\Omega \text{ mm}^2}{\text{m}}$$

Seguidamente calcularemos la sección del hilo a partir del radio. Para ello, emplearemos la siguiente fórmula:

$$S = \pi r^2$$

donde:

- S es la sección del hilo, en milímetros cuadrados (mm<sup>2</sup>)
- r es el radio del hilo, en milímetros (mm)

Sabemos que el diámetro es de 0,5mm, por lo que el radio es de 0,25mm. Por tanto, la sección es:

$$S = \pi r^2 = \pi 0,25^2 = 0,19635 \text{ mm}^2$$

Finalmente, calcularemos la resistencia del hilo, mediante la fórmula 12-1. Para ello, emplearemos el valor de la resistividad a 70°C y la sección calculados previamente:

$$R = \rho_t \frac{l}{S} = 0,02137 \cdot \frac{200}{0,19635} = 21,77 \Omega$$

En conclusión: la resistencia del hilo es de 21,77Ω

### 13. Corriente eléctrica convencional

La figura 13-1 es un grabado que conmemora la inauguración de la instalación de alumbrado público de Londres, en 1878. En la actualidad sabemos que en los circuitos eléctricos la corriente eléctrica se debe al movimiento de electrones libres. Pero en aquella época, no se conocía la existencia de los electrones. El propio concepto de átomo era una mera especulación. A pesar de todo los ingenieros de entonces ya fueron capaces de construir circuitos eléctricos tan complejos como el alumbrado público de Londres. Aquellos ingenieros entendieron la electricidad aplicando el concepto de fluido introducido por Benjamin Franklin.

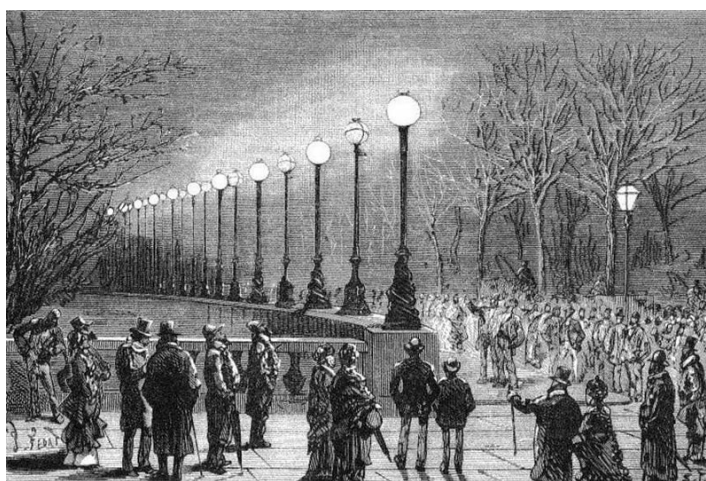


Figura 13-1: grabado conmemorativo de la inauguración del alumbrado público de Londres

En 1750 Benjamín Franklin imaginó que la electricidad era un fluido invisible. Pensó que todos los cuerpos tenían este fluido en la cantidad exacta para ser neutros, pero que la neutralidad se podía romper haciendo pasar fluido de un cuerpo a otro, como se ilustra en la figura 13-3. En dicha figura se transfiere fluido del cuerpo A al B. El cuerpo A queda con menos fluido del que tenía cuando era neutro y se dice que está cargado negativamente. Por otra parte, el cuerpo B queda con más fluido del que tenía cuando era neutro y se dice que está cargado positivamente.

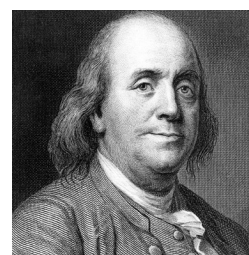


Figura 13-2: Benjamin Franklin

Para medir la carga adquirida por los cuerpos se adoptó como unidad el culombio (C). Por ejemplo, en la figura 13-3 se supone que se transfieren 0,5 culombios de fluido del cuerpo A al B. Por lo tanto, el cuerpo A queda con menos 0,5C y el cuerpo B queda con más 0,5C. En la actualidad sabemos que un culombio equivale a  $6,242 \cdot 10^{18}$  electrones, pero en su momento el culombio no tenía ninguna relación con los electrones. La relación fue hallada después cuando se descubrieron los electrones.

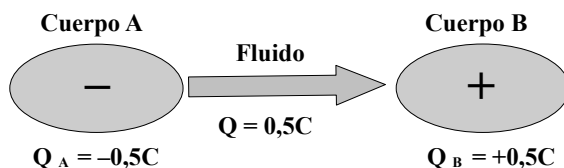


Figura 13-3: carga de cuerpos por la transferencia del fluido de Franklin

Como no se conocía la existencia de los electrones, los primeros ingenieros eléctricos aplicaron el fluido de Franklin para explicar el funcionamiento de los circuitos, como se ilustra en la figura 13-4. Imaginaron que los conductores del circuito contenían fluido. De manera similar a como el agua se cuantifica en litros, el fluido se cuantificó en culombios que se representan mediante círculos.

Las fuentes se consideraban dispositivo que algún modo conseguían arrancar fluido de un borne para llevarlo al otro. Entonces, el borne que perdía fluido quedaba con menos fluido del que le correspondía y se transformaba en el polo negativo. Contrariamente, el borne que ganaba fluido se quedaba con más fluido del que le correspondía y se transformaba en el polo positivo.

Se suponía que el fluido se movía siempre de manera que trataba de compensar los desequilibrios de fluido. Por eso, el fluido existente en los conductores del circuito se movían tratando de compensar el desequilibrio existente entre los polos del generador. Por tanto, se alejaba del polo positivo en dirección al negativo. Este movimiento se indica mediante flechas en la figura 14-4. No obstante, conforme el fluido llegaba al polo negativo la fuente lo absorbía y lo colocaba otra vez en el polo positivo, de donde volvía a salir. Así, el movimiento del fluido nunca llegaba a compensar el desequilibrio entre los polos de la fuente y se conseguía una corriente eléctrica permanente. En el caso de la figura 13-4 se supone que el valor de la corriente eléctrica es de 2 culombios por segundo, es decir, 2 amperios.

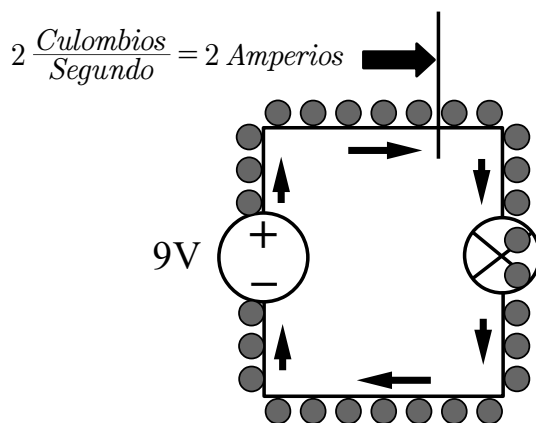


Figura 13-4: corriente eléctrica debida al fluido de Franklin



En la figura 13-5 se muestran las dos formas de entender la corriente eléctrica. A la izquierda tenemos a la corriente eléctrica ocasionada por el movimiento de los electrones y a la derecha a la corriente eléctrica debida al movimiento del fluido de Franklin. Los dos enfoques sirven para explicar el funcionamiento de los circuitos, la única diferencia relevante es el sentido en que fluye la corriente eléctrica o intensidad. Por eso, se dice que la intensidad puede tener dos sentidos diferentes: real y convencional. El sentido real de la intensidad es el que tienen los electrones libres, mientras que el convencional de la intensidad es el que tiene el fluido de Franklin. Curiosamente, en la práctica, para describir el funcionamiento de los circuitos eléctricos, se utiliza el sentido convencional de la intensidad, y así lo haremos nosotros a partir de ahora. Esto significa que en la práctica se olvida el hecho de que lo que realmente se mueve por el interior de los circuitos eléctricos son los electrones libres y en su lugar se supone que existe el fluido de Franklin.

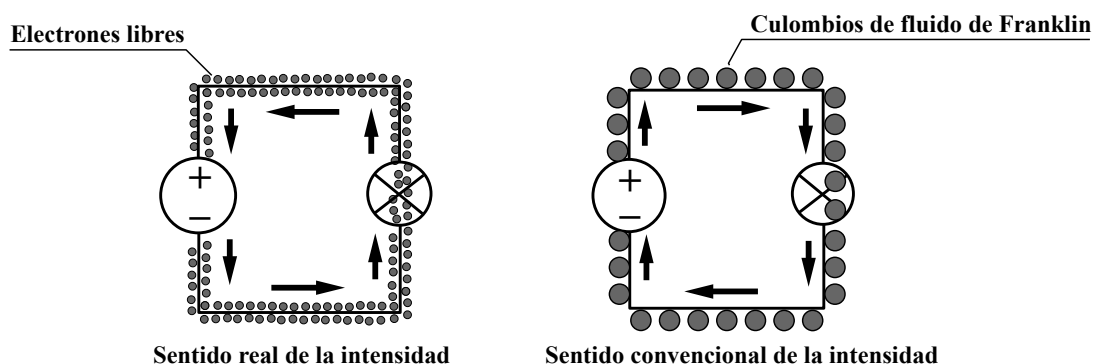


Figura 13-5: sentido real y convencional de la corriente eléctrica

Independientemente del sentido que se tome para la intensidad, su valor siempre es igual a la cantidad de carga que circula por segundo, es decir:

$$I = \frac{Q}{t} \quad \text{Fórmula 13-1}$$

donde:

- $I$  es la intensidad o corriente eléctrica, en culombios por segundo o amperios (A)
- $Q$  es la carga que pasa, en culombios (C)
- $t$  es el tiempo que tarda en pasar la carga, en segundos (s)

**Ejercicio n.º 4**

Un circuito es recorrido por una carga de 3C en 2s ¿Cuál es el valor de la intensidad?

**Solución**

El problema se resuelve por aplicación directa de la fórmula 13-1:

$$I = \frac{Q}{t} = \frac{3}{2} = 1,5 \frac{C}{s} = 1,5 A$$

En conclusión: la intensidad es de 1,5A

**Ejercicio n.º 5**

La intensidad en un circuito es de 2A ¿Cuánta carga circulará en 3s?

**Solución:**

El problema se resuelve despejando la carga de la fórmula 13-1:

$$Q = t \cdot I = 3 \cdot 2 = 6 C$$

En conclusión: la carga es de 6C

**Ejercicio n.º 6**

La intensidad en un circuito es de 1,5A ¿Cuánto tiempo tardará en pasar una carga de 4C?

**Solución:**

El problema se resuelve despejando la carga de la fórmula 13-1:

$$t = \frac{Q}{I} = \frac{4}{1,5} = 2,67 s$$

En conclusión: el tiempo es de 2,76s

## 14. Ley de Ohm

Consideremos la situación de la figura 14-2. Tenemos un circuito en el que aparecen las tres magnitudes que hemos visto a lo largo del tema, a saber: voltaje, intensidad y resistencia. Observe que no se ha considerado la resistencia de los hilos de conexión porque es despreciable frente a la resistencia de la lámpara. Como veremos enseguida, la relación entre estas tres magnitudes fue hallada en 1827 por el físico y matemático alemán Georg Simon Ohm.

En la época de Ohm no se conocía la existencia de los electrones libres y para explicar el funcionamiento de los circuitos eléctricos se empleó el fluido de Franklin. De hecho, observe que en el circuito de la figura 14-2 el sentido de la intensidad es el de la intensidad convencional. Recuerde que el fluido de Franklin circula saliendo del polo positivo de la fuente y entrando por el polo negativo. A pesar de no conocer la existencia de los electrones y utilizar un fluido que no existe realmente, Ohm dedujo una fórmula que describe correctamente la relación existente entre el voltaje, resistencia e intensidad.



Figura 14-1: Georg Simon Ohm

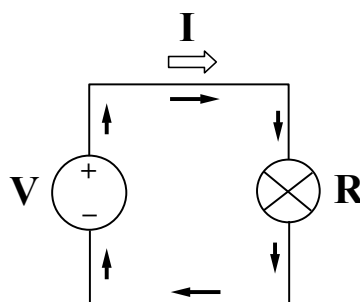


Figura 14-2: magnitudes del circuito eléctrico: voltaje, intensidad y resistencia

En el presente apartado trataremos de recrear la visión que se tenía del circuito eléctrico de la figura 14-2 en la época de Ohm. Para empezar, digamos que Ohm debió pensar que el fluido de Franklin debía moverse por el interior del circuito eléctrico de forma similar a como el aire lo hace a través de un circuito neumático o el agua a través de un circuito hidráulico. Por tanto, el circuito eléctrico debía parecerse al sistema representado en la figura 14-3. En dicha figura tenemos una bomba de compresión y un estrechamiento unidos mediante un par de tubos anchos por los que el fluido pasa sin dificultad. La bomba de compresión juega el papel de una fuente de voltaje  $V$ , el estrechamiento es como una resistencia  $R$  y los tubos anchos simulan los hilos de conexión.

En el sistema de la figura 14-3 la bomba de compresión absorbe aire de un tubo y lo comprime en el otro. Así, se crea una diferencia de presión entre los tubos equivalente al voltaje de la fuente,  $V$ . Observe que la polaridad del voltaje indica el tubo en que hay más presión (sobrepresión) y el tubo en el que hay menos presión (depresión). Esta diferencia de presión obliga al fluido por a circular a través del estrechamiento,  $R$ . Así, se origina una corriente de fluido equivalente a la corriente eléctrica o intensidad,  $I$ .

Es muy importante percatarse de que el voltaje es la causa de la intensidad, sin voltaje el fluido no se movería y no habría intensidad. Además, cuanto más grande sea el voltaje  $V$ , mayor será la diferencia de presión entre los tubos y mayor será la intensidad,  $I$ . Por otra parte, el fluido eléctrico encuentra una dificultad a pasar por el estrechamiento equivalente a la resistencia eléctrica,  $R$ . Cuanto mayor sea la resistencia más se frena el fluido y menor será la intensidad,  $I$ .

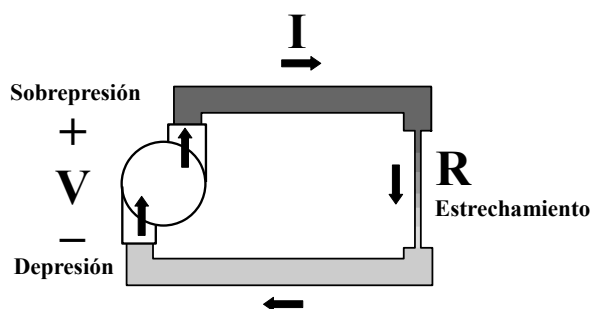


Figura 14-3: símil del circuito eléctrico

Como conclusión, tanto en el circuito eléctrico de la figura 14-2 como en el sistema equivalente de la figura 14-3, la intensidad dependerá del voltaje y la resistencia. El voltaje promueve la intensidad, pero la resistencia la entorpece. Así, Ohm dedujo que la intensidad se calcula a partir del voltaje y la resistencia mediante la siguiente fórmula:

$$I = \frac{V}{R} \quad \text{Fórmula 14-3}$$

donde:

- $I$  es la intensidad, en amperios (A)
- $V$  es el voltaje, en voltios (V)
- $R$  es la resistencia, en ohmios ( $\Omega$ )

La fórmula 14-1 se conoce como ley de Ohm. Observe que el voltaje está en el numerador. Por tanto, si crece el voltaje, también crece la intensidad. En palabras se dice que la intensidad es directamente proporcional al voltaje. Por otra parte, observe que la resistencia está en el denominador. Por tanto, si crece la resistencia, la intensidad disminuye. En palabras se dice que la intensidad es inversamente proporcional a la resistencia. En resumen, la ley de Ohm dice: “la intensidad es directamente proporcional al voltaje e inversamente proporcional a la resistencia”.

**Ejercicio n.º 7**

Calcule la intensidad en el circuito de la figura 14-4

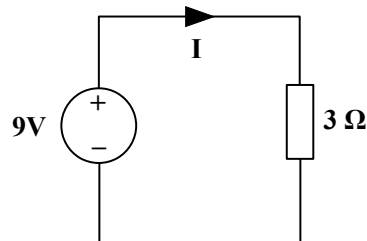


Figura 14-4

**Solución:**

El problema se resuelve por aplicación directa de la ley de Ohm:

$$I = \frac{V}{R} = \frac{9}{3} = 3 A$$

En conclusión: la intensidad es de 3A

**Ejercicio n.º 8**

Calcule el voltaje de la fuente en el circuito de la figura 14-5

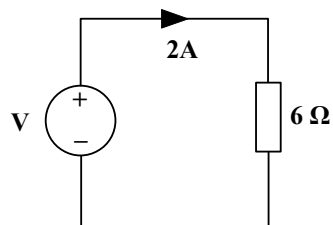


Figura 14-5

**Solución:**

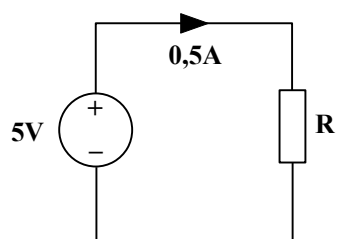
El problema se resuelve despejando el voltaje de la ley de Ohm:

$$V = R \cdot I = 6 \cdot 2 = 12 V$$

En conclusión: el voltaje es de 12V

**Ejercicio n.º 9**

Calcule la resistencia en el circuito de la figura 14-6



Fórmula 14-6

**Solución:**

El problema se resuelve despejando la resistencia de la ley de Ohm:

$$R = \frac{V}{I} = \frac{5}{0,5} = 10 \Omega$$

En conclusión: la resistencia es de  $10\Omega$

## 15. Voltaje alterno: valores de pico y periodo

En su sentido más general una fuente de voltaje alterno es aquella que suministra un voltaje que a veces es positivo y a veces negativo. Un voltaje alterno puede adoptar muchas formas diferentes, pero las más habituales son las mostradas en figura 15-1, a saber: rectangular, triangular y senoidal. En todos los casos el voltaje suministrado por la fuente se designa del siguiente modo:

$$v(t)$$

Los voltajes alternos se designan con la letra  $v$  minúscula seguida de un par de paréntesis entre los que se coloca la letra  $t$ . La letras minúsculas se emplean para designar magnitudes que no son constantes. En este caso, la letra  $v$  minúscula indica que los voltajes alternos no tienen un valor fijo. Además, los paréntesis con la letra  $t$  indican que los voltajes alternos toman un valor distinto en cada instante. Más apropiadamente se debe decir que el voltaje es función del tiempo.

Un detalle importante es que en los símbolos de todas las fuentes de la figura 15-1 hay un borne marcado con un signo “+”. Esto no quiere decir que dicho borne sea siempre positivo, solo indica la polaridad de referencia que es un concepto del que hablaremos más adelante.

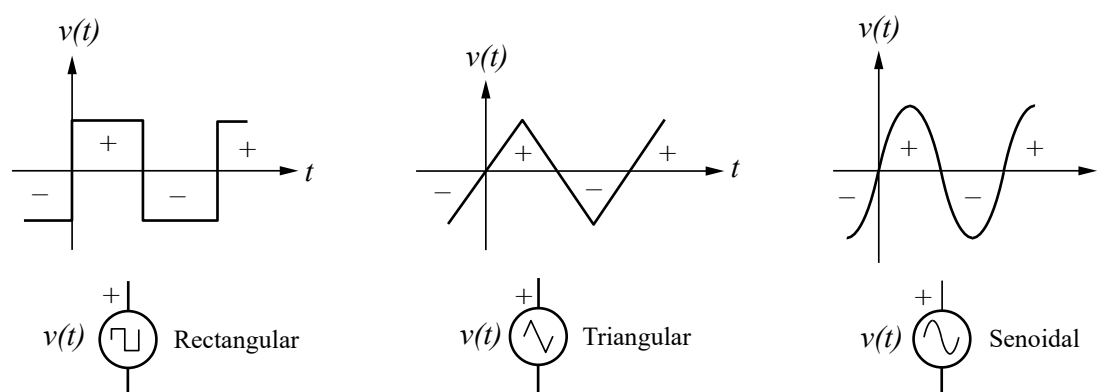


Figura 15-1. Ejemplos de voltajes alternos

Los cambios bruscos producen efectos indeseados en los circuitos eléctricos. La onda rectangular cambia bruscamente de positivo a negativo. La onda triangular es más suave, pero también tiene cambios bruscos en los vértices del triángulo. La única curva que no presenta cambios bruscos es la senoidal. Por eso, se ha elegido este tipo de onda para producir y distribuir la energía eléctrica. A partir de ahora se dará por entendido que un voltaje alterno tiene forma de curva senoidal.

Observe el voltaje alterno de la figura 15-2. Una característica evidente es que varía entre dos extremos a los que llamamos valores de pico,  $V_P$  y  $-V_P$ . Los dos picos tienen el mismo valor absoluto, pero de signo contrario. En el caso de la figura 15-2 los valores de pico son 150 y  $-150$  voltios.

Otra característica que se ve en la figura 15-2 es que el voltaje alterno se obtiene repitiendo una porción a la que llamamos ciclo. Observe que se ha sombreado el primer ciclo a la derecha del origen. Pero, el voltaje completo consta de infinitos ciclos que se extienden tanto hacia la derecha como hacia la izquierda del origen.

Cada ciclo tiene una duración a la que se denomina periodo y se designa con la letra T mayúscula. En el caso de la figura 15-2 el periodo tiene un valor de 20 milisegundos. Por tanto, el ciclo que se encuentra inmediatamente después del origen empieza en  $t = 0$  y termina en  $t = 20\text{ms}$ , el segundo ciclo empieza donde acaba el primero y llega hasta  $t = 40\text{ms}$ , y así sucesivamente.

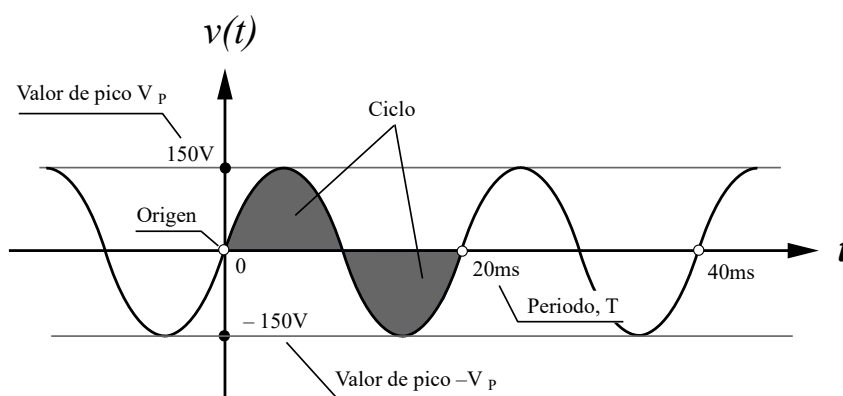


Figura 15-2. Voltaje alterno con valores de pico 150 y  $-150$  voltios, y periodo 20 milisegundos

En la figura 15-3 se vuelve a representar el voltaje anterior, pero centrando la atención en el primer ciclo. Dada la simetría de la curva senoidal es sencillo averiguar los instantes en los que el voltaje cruza por cero y toma los valores de pico. Para ello, se divide el periodo en cuatro intervalos básicos iguales de 5 milisegundos. Conocida la duración de los intervalos básicos resulta obvio que en el primer ciclo el voltaje alcanza el pico positivo en  $t = 5\text{ms}$ , cruza por cero en  $t = 10\text{ms}$  y llega al pico negativo en  $t = 15\text{ms}$ . Observe que el periodo siempre debe ser igual a 4 intervalos básicos.

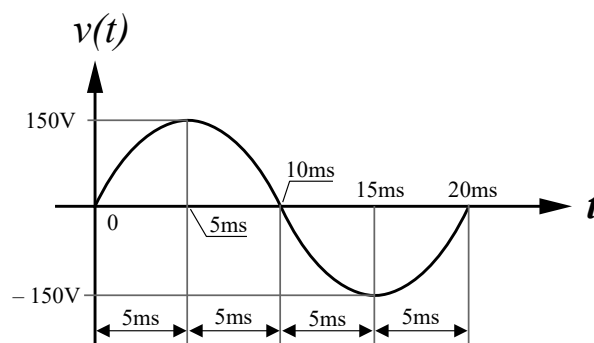


Figura 15-3. Instantes de cruce por cero y picos



Como hemos dicho un voltaje alterno a veces es positivo y a veces negativo. Por ejemplo, en la figura 15-3 vemos que para  $t = 5\text{ms}$  el voltaje es de 150V, positivo; mientras que para  $t = 15\text{ms}$  el voltaje es de -150V, negativo. Pero, ¿qué significado tiene un voltaje positivo o negativo? Para responder a esta pregunta debemos introducir primero el concepto de polaridad de referencia.

En la figura 15-4 se representa la fuente que produce el voltaje de la figura 15-3. Observe que uno de los terminales está marcado con el signo “+”. De esta forma se indica lo que se llama polaridad de referencia. Además, a la derecha de la fuente se coloca el voltaje producido por la misma en  $t = 5\text{ms}$  y  $t = 15\text{ms}$ .

Según la gráfica de la figura 15-3 en el instante  $t = 5\text{ms}$  el voltaje tiene un valor de 150V, positivo. Es positivo porque su polaridad instantánea coincide con la de referencia, es decir, el “+” de los 150V suministrados por la fuente está en el “+” de referencia, como se ve a la izquierda de la figura 15-4. Contrariamente, según la gráfica de la figura 15-3 en el instante  $t = 15\text{ms}$  el voltaje es de -150V, negativo. Es negativo porque su polaridad instantánea es contraria a la de referencia, es decir, el “+” de los 150V suministrados por la fuente no está en el “+” de referencia, como se ve a la derecha de la figura 15-4.

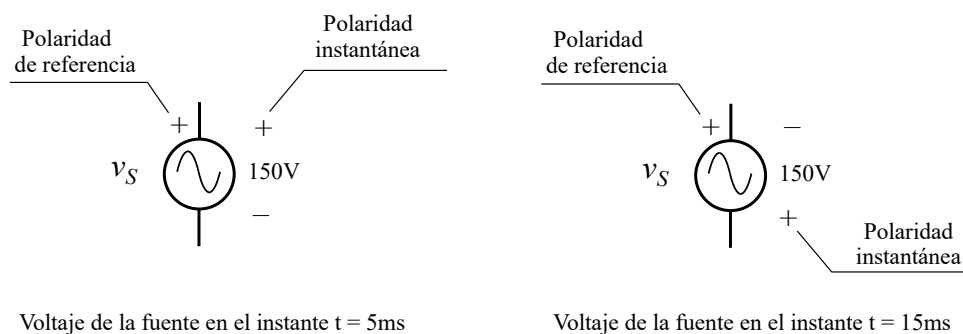


Figura 15-4. Polaridad de referencia y polaridad real

Es importante darse cuenta de que el signo “+” que indica la polaridad de referencia no significa que dicho borne sea siempre positivo. La polaridad de referencia es fija y forma parte del propio símbolo de la fuente, mientras que la polaridad instantánea es la que realmente adopta el voltaje en cada momento. Si en un determinado instante la fuente suministra un voltaje cuya polaridad coincide con la de referencia, diremos que dicho voltaje es positivo y negativo en caso contrario.

Los voltajes alternos varían según una curva u onda a la que se llama senoidal. Esta curva tiene una fórmula que es la siguiente:

$$v(t) = V_p \cdot \text{sen}\left(\frac{360}{T} \cdot t\right)$$

Aplicando esta fórmula se halla el valor del voltaje para cualquier instante. Esta fórmula se estudiará más adelante en la unidad dedicada a los circuitos de corriente alterna. Por ahora, nos conformaremos con hallar los valores del voltaje para los instantes indicados en la figura 15-5.

En la figura 15-5 se ha dividido el periodo,  $T$ , en 8 intervalos iguales para obtener los siguientes instantes:

$$0, \frac{T}{8}, \frac{T}{4}, \frac{3}{8}T, \frac{T}{2}, \frac{5}{8}T, \frac{3}{4}T, \frac{7}{8}T, T$$

Observe que en los instantes

$$\frac{T}{8}, \frac{3}{8}T, \frac{5}{8}T \text{ y } \frac{7}{8}T$$

el voltaje tiene un valor absoluto igual al valor de pico dividido por la raíz de dos. A este valor se le denomina eficaz y su significado se comprenderá más adelante.

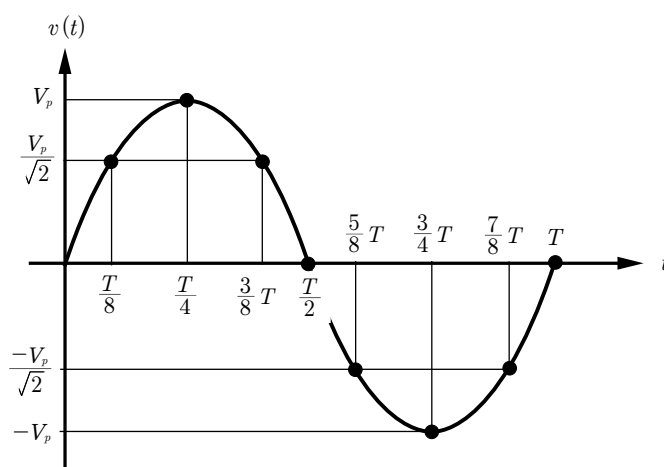


Figura 15-5: valores representativos de la curva senoidal

Consideremos el voltaje mostrado en la figura 15-6. Tenemos un voltaje de periodo 20ms y valores de pico 20 y  $-20V$ . Observe que en este caso el valor eficaz es de 14,14V

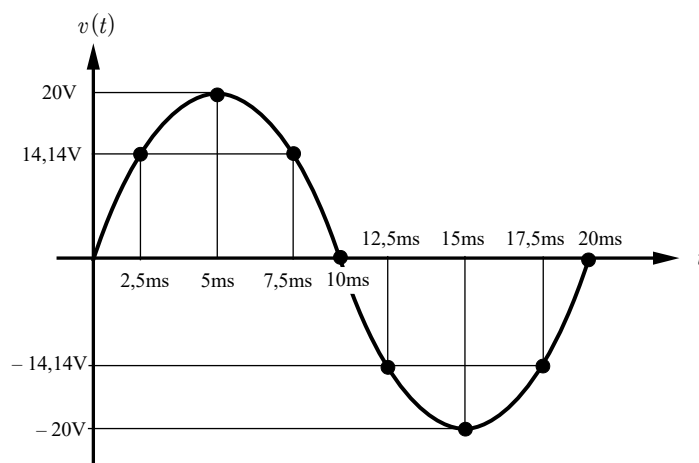


Figura 15-6: valores representativos de un voltaje de periodo 20ms y valores de pico 20 y  $-20V$

**Ejercicio n.º 10**

Determine el valor del periodo en el caso de la figura 15-5

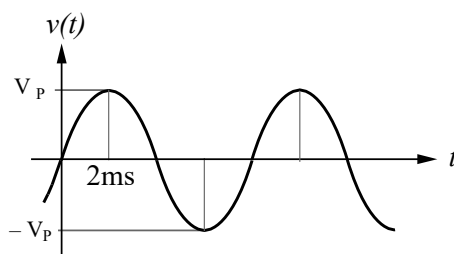


Figura 15-5

**Solución:**

En la figura 15-3 se ve que el periodo se compone de 4 intervalos básicos de 5ms. Lo mismo ocurre en la figura 15-5, pero ahora el intervalo básico tiene otro valor. En este caso, vemos que un intervalo básico vale 2ms. Como el periodo siempre es igual a 4 intervalos básicos, se obtiene un periodo de 8ms.

**Ejercicio n.º 11**

Determine el valor del periodo en el caso de la figura 15-6

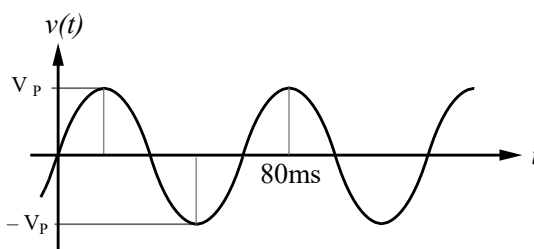


Figura 15-6

**Solución:**

En la figura 15-3 se ve que el periodo se compone de 4 intervalos básicos de 5ms. Lo mismo ocurre en la figura 15-6, pero ahora el intervalo básico tiene otro valor. En este caso, vemos que 5 intervalos básicos ocupan de 80ms. Por tanto, la duración de cada intervalo básico es de 16ms. Como el periodo siempre es igual a 4 intervalos básicos, se obtiene un periodo de 64ms.

**Ejercicio n.º 12**

Una fuente suministra un voltaje cuyo periodo es 8ms y cuyos valores de pico son 120 y -120V. Se pide calcular los valores de los instantes

$$\frac{T}{4} \text{ y } \frac{5}{8}T$$

así como el valor del voltaje en dichos instantes.

**Solución:**

El periodo es de 8ms, por lo que el valor del instante  $T/8$  es:

$$\frac{T}{4} = \frac{8 \cdot 10^{-3}}{4} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ s} = 2 \text{ ms}$$

Por otra parte, en la figura 15-5 vemos que el instante  $T/4$  el voltaje adopta el valor de pico positivo. Por tanto, en dicho instante su valor es:

$$v(2 \text{ ms}) = 120 \text{ V}$$

Análogamente, el valor del instante  $(2/8)T$  es:

$$\frac{5}{8}T = \frac{5}{8} \cdot 8 \cdot 10^{-3} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ s} = 5 \text{ ms}$$

Por otra parte, en la figura 15-5 vemos que en el instante  $(5/8)T$  el voltaje adopta un valor negativo cuyo valor absoluto se obtiene dividiendo el de pico por raíz de dos. Por lo tanto, en dicho instante el voltaje es:

$$v(5 \text{ ms}) = \frac{V_P}{\sqrt{2}} = \frac{120}{\sqrt{2}} = 84,85 \text{ V}$$

Aunque no se pide en el enunciado en la figura 15-7 se dibuja la curva de un ciclo del voltaje.

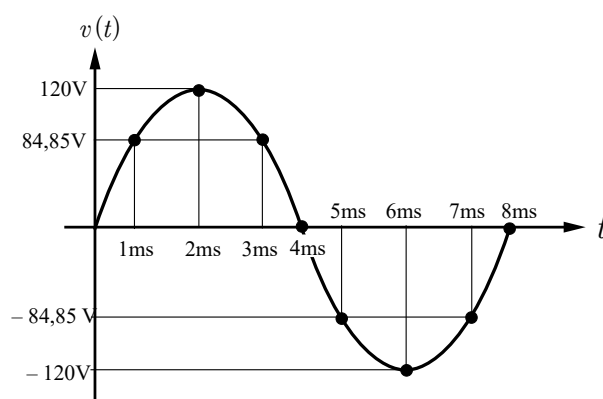


Figura 15-7

## 16. Ley de Ohm para circuitos con fuentes de voltaje alterno.

Consideremos el circuito de la figura 16-1. La resistencia es de  $10\Omega$  y el voltaje de la fuente varía de la forma que se indica, es decir, tiene un periodo de 20ms y unos valores de pico de 20 y  $-20V$ . Con estos datos se desea hallar la intensidad. Sabemos que la intensidad se calcula aplicando la ley de Ohm:

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

Pero, ahora nos encontramos con la dificultad de que el voltaje adopta un valor diferente en cada momento y para cada uno se obtiene una intensidad distinta al aplicar la ley de Ohm. En la figura 16-1 se muestra como se halla la intensidad en los instantes  $t = 5ms$  y  $t = 15ms$ . En  $t = 5ms$  el voltaje es positivo y aplicando la ley de Ohm se obtiene el siguiente valor de intensidad:

$$I = \frac{V}{R} = \frac{20}{10} = 2A$$

Por otra parte, en  $t = 15ms$  el voltaje es negativo y al aplicar la ley de Ohm se obtiene el siguiente valor de intensidad:

$$I = \frac{V}{R} = -\frac{20}{10} = -2A$$

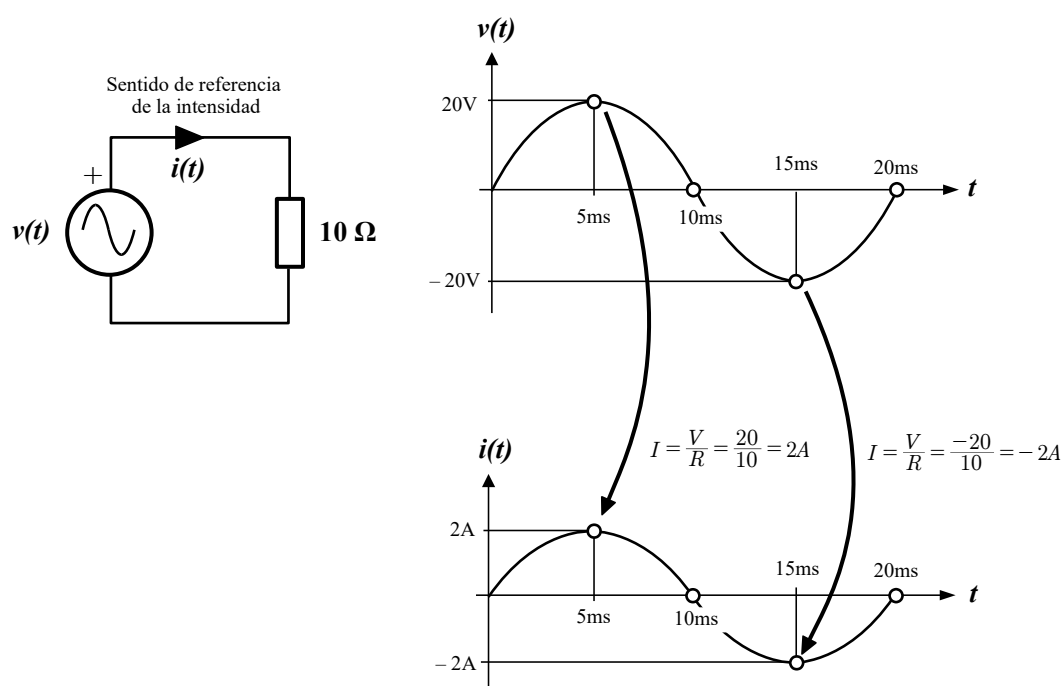


Figura 16-1: intensidad en un circuito alimentado por una fuente de voltaje alterno

Una característica relevante de la intensidad es que es positiva cuando el voltaje es positivo y negativa cuando el voltaje es negativo. El significado del signo de la intensidad se ilustra en la figura 16-2.

A la derecha de derecha de la figura 16-2 se representa el estado del circuito de la figura 16-1 en  $t = 5\text{ms}$ . En la figura 16-1 vemos que en dicho instante el voltaje es positivo de 20V y la intensidad es positiva de 2A. El voltaje es positivo porque su polaridad coincide con la de referencia. De acuerdo con el sentido convencional el voltaje siempre impulsa la intensidad saliente por el “+” que en este caso coincide con la de referencia. Por tanto, una intensidad positiva significa que sale de la fuente por el “+” de referencia.

Por otra parte, a la izquierda de la figura 16-2 vemos el estado del circuito de la figura 16-1 en  $t = 15\text{ms}$ . En la figura 16-1 vemos que en dicho instante el voltaje es negativo de 20V y la intensidad es negativa de 2A. El voltaje es negativo porque su polaridad no coincide con la de referencia. De acuerdo con el sentido convencional el voltaje siempre impulsa la intensidad saliente por el “+” que en este caso no coincide con el “+” de referencia. Por tanto, una intensidad positiva significa que sale de la fuente por el borne de la fuente que no es el de de referencia.

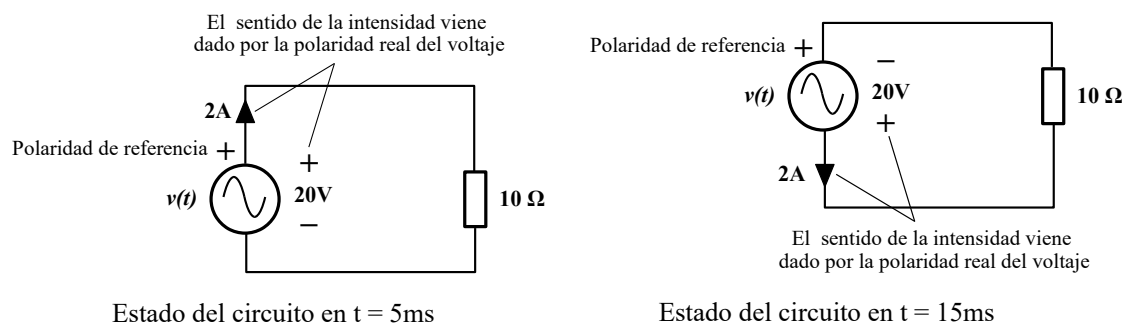


Figura 16-2: significado del signo de la intensidad

En los circuitos alimentados por fuentes de voltaje alterno se debe tener en cuenta tanto la polaridad de referencia del voltaje como el sentido de referencia de circulación de la intensidad. Como se muestra en la figura 16-3 se considera positiva la intensidad cuando sale del borne marcado con el “+” y negativa en caso contrario. De este modo, los voltajes positivos producen intensidades positivas y los voltajes negativos producen intensidades negativas, como se ve en la figura 16-1.

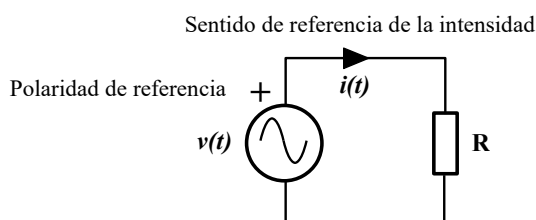


Figura 16-3: sentido de referencia de la intensidad

En la figura 16-1 se halla la intensidad para los instantes  $t = 5\text{ms}$  y  $t = 15\text{ms}$ . Del mismo modo se podría hallar la intensidad para cualquier otro instante, si supiéramos el valor del voltaje. Para ello, tendríamos que conocer la fórmula que da el valor del voltaje para cualquier instante. Como se dijo en el apartado anterior, dicha fórmula la estudiaremos más adelante en la unidad dedicada a los circuitos de corriente alterna. Por ahora, nos conformaremos con hallar la intensidad en los instantes que se muestran en la figura 15-5 que por comodidad se repite en la parte superior de la figura 16-4. Aplicando la ley de Ohm a cada valor del voltaje, punto a punto, se obtiene la curva de la intensidad. Por tanto, cada valor de intensidad es igual al del voltaje dividido por  $R$ .

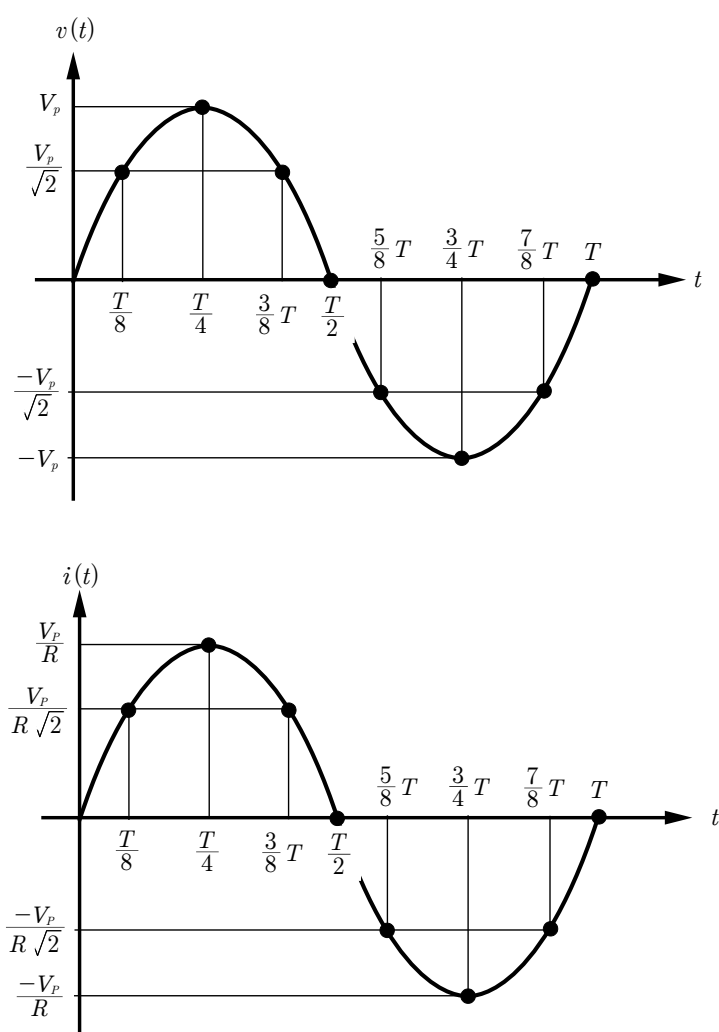


Figura 16-4: obtención de la curva de la intensidad

En la figura 16-5 se aplica lo anterior para obtener la curva de intensidad en el circuito de la figura 16-1. Observe que al aplicar la ley de Ohm a cada valor del voltaje se obtiene una curva de intensidad cuyos valores son simplemente los del voltaje dividido por la resistencia que en la figura 16-1 es de  $10\Omega$ .

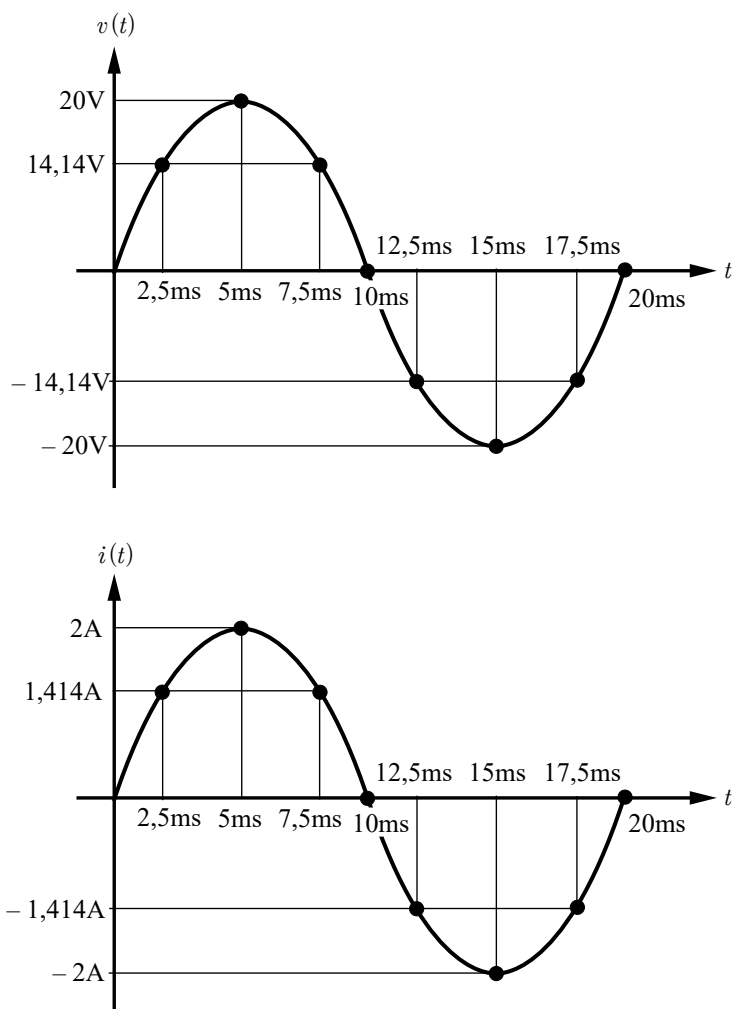


Figura 16-5: curva de la intensidad en el circuito de la figura 16-1.

Puesto que el voltaje e intensidad son funciones del tiempo, la forma correcta para la ley de Ohm en circuitos alimentados por fuentes de voltaje alterno es la siguiente:

$$i(t) = \frac{v(t)}{R} \quad \text{Fórmula 16-1}$$



## 17. Frecuencia

Con lo que hemos visto hasta el momento podría dar la impresión de que los valores de pico y periodo son absolutamente necesario para saber cómo es la curva de un voltaje o una intensidad alternos. Sin embargo, en la práctica es más habitual utilizar la frecuencia como sustituto del periodo y el valor eficaz como sustituto de los valores de pico.

La frecuencia se define como el número de periodos por segundo, se designa con la letra  $f$  y se mide en hercios (Hz). Por ejemplo, en la figura 17-1 el periodo es  $T = 0,25$  segundos. Por tanto, en 1 segundo hay 4 periodos y se dice que su frecuencia es de 4Hz. Observe que para hallar la frecuencia simplemente hay que dividir un segundo por el periodo:

$$f = \frac{1}{0,25} = 4 \text{ Hz}$$

A la vista de este caso particular podemos generalizar diciendo que la frecuencia es la inversa del periodo, es decir:

$$f = \frac{1}{T} \quad \text{Fórmula 17-1}$$

Despejando de esta expresión se deduce que el periodo es la inversa de la frecuencia:

$$T = \frac{1}{f} \quad \text{Fórmula 17-2}$$

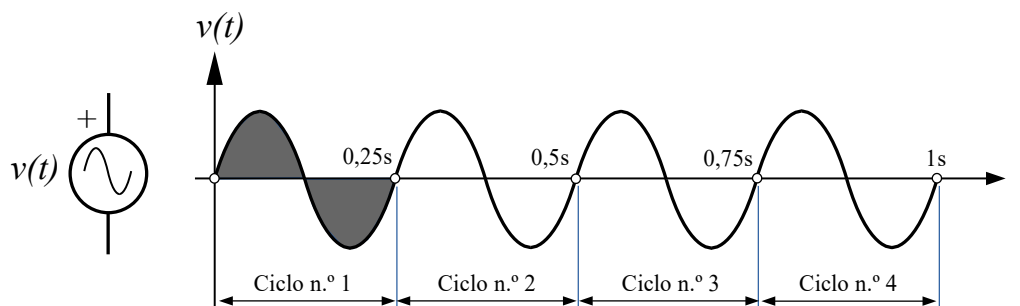


Figura 17-1. Definición de frecuencia

Las fórmulas 17-1 y 17-2 indican que el valor de la frecuencia se deduce a partir del periodo y viceversa. Por eso, son dos parámetros equivalentes, es decir, si se conoce uno, también se conoce el otro. En la práctica rara vez se especifica el periodo de un voltaje alterno y en su lugar se suele dar la frecuencia. Por ejemplo, en España la energía eléctrica se genera y distribuye en forma de voltaje alterno cuya frecuencia es de 50Hz. Por tanto, el periodo es de 20ms:

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{50} = 20 \text{ ms}$$

En la figura 17-2 se representan tres voltajes cuyos periodos son 20, 10 y 5ms. Por tanto, sus frecuencias son 50, 100 y 200Hz. Con este ejemplo se pretende hacer visible la relación inversa existente entre la frecuencia y el periodo. Cuanto más pequeño sea el periodo más grande será la frecuencia y viceversa. A simple vista se reconoce que la curva senoidal de más frecuencia es la que presenta mayor oscilación.

Un detalle que no debe pasar desapercibido es que las frecuencias no pueden ser negativas. Como hemos visto la frecuencia es el número de ciclos que se producen en un segundo. También podríamos decir que es el número de oscilaciones por segundo. Entonces ¿que significado podría tener una frecuencia de, por ejemplo,  $-50\text{Hz}$ ? Una frecuencia puede adoptar un valor pequeño incluso puede aproximarse a cero tanto como se quiera, pero nunca podrá ser negativa.

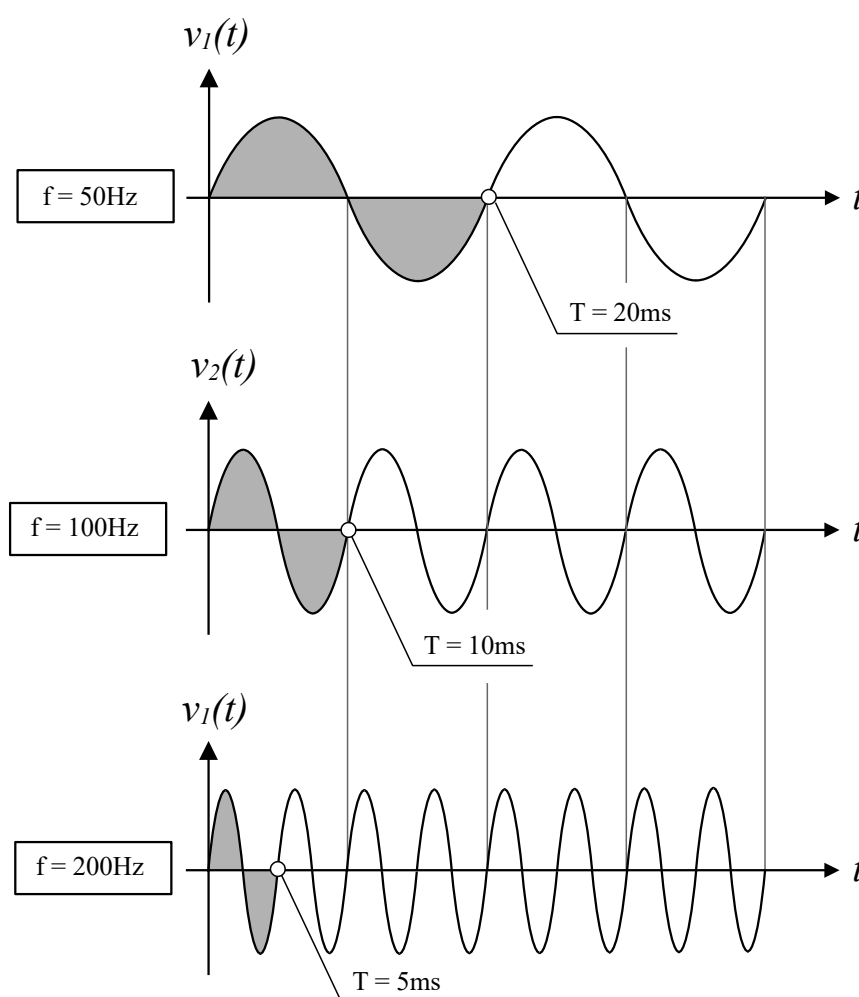


Figura 17-2. Curvas senoidales de diferentes frecuencias.

## 18. Valor eficaz

El valor eficaz de un voltaje alterno es un valor muy especial que se obtiene dividiendo el valor de pico por la raíz de dos:

$$V_{ef} = \frac{V_p}{\sqrt{2}} \quad \text{Fórmula 18-1}$$

Por ejemplo, el generador de la figura 18-1 suministra un voltaje cuyo valor eficaz es:

$$V_{ef} = \frac{V_p}{\sqrt{2}} = \frac{120}{\sqrt{2}} = 84,85 \text{ V}$$

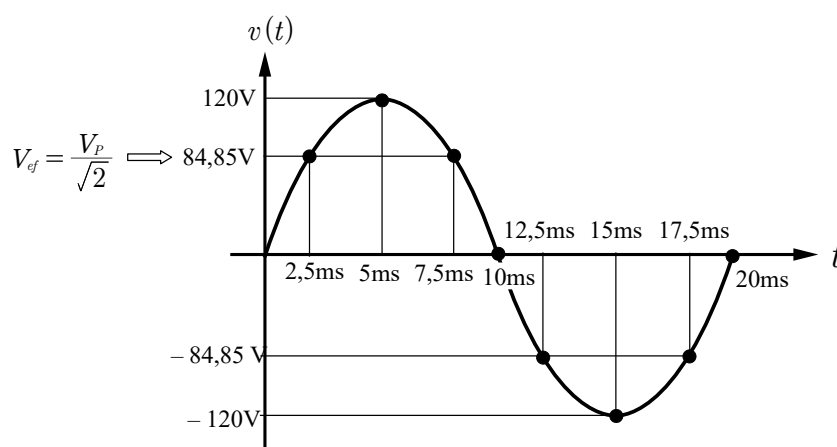


Figura 18-1: definición del valor eficaz

Del mismo modo que la frecuencia se utiliza como sustituto del periodo, el valor eficaz se usa como sustituto de los valores de pico. De hecho, en la práctica rara vez se especifica el valor de pico de un voltaje alterno y en su lugar se suele dar el valor eficaz. Entonces, el valor de pico se puede hallar despejando de la fórmula 17-1:

$$V_p = \sqrt{2} \cdot V_{ef} \quad \text{Fórmula 18-2}$$

Por ejemplo, en España la energía eléctrica se distribuye a las viviendas en forma de voltaje alterno cuyo valor eficaz es de 230V. Por tanto, el valor de pico es:

$$V_p = \sqrt{2} \cdot V_{ef} = \sqrt{2} \cdot 230 = 325,27 \text{ V}$$

Las fórmulas 18-1 y 18-2 indican que el valor eficaz se deduce a partir del valor de pico y viceversa. Por eso, son dos parámetros equivalentes. Si se conoce uno, también se conoce el otro. Pero, ¿qué tiene de especial el valor eficaz de un voltaje alterno? Para responder a la pregunta digamos que el valor eficaz de un voltaje alterno es el valor de voltaje continuo que produce el mismo efecto Joule que el voltaje alterno. Por ejemplo, si conectar el generador de la figura 18-1 a una lámpara se producirá el mismo efecto Joule que si se conecta una batería de 84,85V.

## 19. Voltaje disponible en las tomas de corriente.

En la figura 19-1 se representa una toma de corriente (enchufe) como los que hay en cualquier vivienda. En otro tema veremos con más exactitud cómo son las instalaciones eléctricas en realidad. Por ahora, imaginaremos que detrás de la toma de corriente hay una fuente que suministra un voltaje alterno. El voltaje que se muestra en dicha figura es el que hay en una toma de corriente en España. Observe que:

- El valor eficaz es de 230V, por lo que los valores de pico son 325,27V y  $-325,27V$ .
- El periodo es de 20ms, por lo que la frecuencia es de 50Hz.

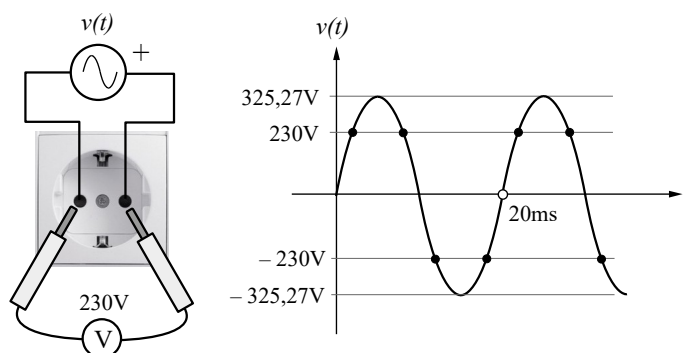


Figura 19-1. Voltaje disponible en una toma de corriente (enchufe) en España

La frecuencia y el valor eficaz disponible en las tomas de corriente varía según el país, como se muestra en el mapamundi de la figura 19-2. Respecto a la frecuencia es importante recalcar que en todo el mundo solamente se emplean dos valores, a saber, 50Hz y 60Hz. Observe que en España y el resto de la Unión Europea la frecuencia es de 50Hz. No obstante, hay países con un gran peso político y económico en los que la frecuencia es de 60Hz, como por ejemplo, EE.UU. Respecto al valor eficaz del voltaje observe que en los países de la Unión Europea está comprendido entre 220 y 240 voltios. En particular, como hemos dicho, en España el voltaje presente en las tomas de corriente tiene un valor eficaz de 230 voltios.

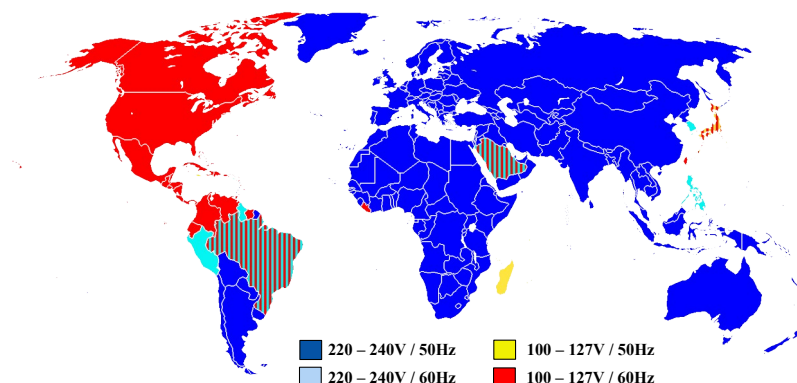


Figura 19-2. Frecuencia y valor eficaz del voltaje según país.