

## **UNIDAD 5: Electricidad**

### **Bases Físicas de los Fenómenos Bioeléctricos**

#### **Electrostática**

Carga eléctrica. Conservación de la carga. Conductores y aisladores. Campo eléctrico. Energía potencial eléctrica. Diferencia de potencial. Relación entre campo y diferencia de potencial. Gradiente de potencial. Capacitores. Energía almacenada. Asociación en serie y en paralelo.

#### **Electrodinámica**

Intensidad de corriente eléctrica. Régimen estacionario: corriente continua. Ley de Ohm: resistencia eléctrica. Resistividad. Fuerza electromotriz. Potencia eléctrica. Asociación de resistencias en serie y en paralelo. Circuitos simples. Amperímetro y voltímetro. Seguridad eléctrica.

#### **Electrolitos**

Ley electroquímica de Faraday. Conductancia en electrolitos. Los fenómenos bioeléctricos en el hombre.

#### **Fenómenos ondulatorios**

Características básicas de la luz y el sonido. Bases físicas de la visión y la audición.

## Electrostática

### Las cargas eléctricas

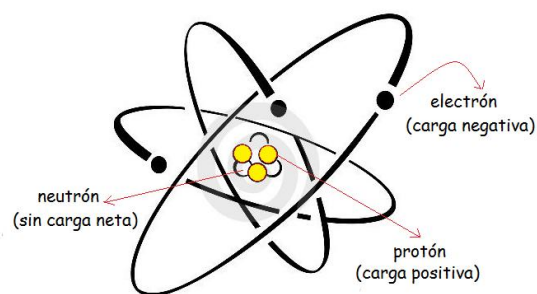
Como la mayoría de los fenómenos físicos, el efecto de las cargas eléctricas se observa cotidianamente. Si ponemos pedacitos de papel sobre una mesa, raspamos una birrome contra la ropa o el pelo, y acercamos la birrome a los papelitos, veremos que esta los atrae. Algo parecido se observa si frotamos un peine contra el pelo y luego vemos cómo el pelo se mueve hacia el peine cuando lo retiramos. Estas propiedades tienen su origen en las cargas generadas, dado que los objetos quedan cargados al frotarse.

Desde tiempos antiguos, las culturas del Mediterráneo sabían que ciertos objetos, como barras de ámbar, se podían frotar con una piel de gato para atraer objetos ligeros como las plumas. Tales de Mileto (600 a. C.) hizo observaciones sobre la electricidad estática, de las cuales creía que la fricción era ámbar magnético, en contraste con minerales como la magnetita, que no necesitaba frotar. El tema de la "electricidad estática" seguiría siendo poco más que una curiosidad intelectual por más de 2.000 años!!! hasta que el científico inglés William Gilbert hizo un estudio cuidadoso, distinguiendo el efecto de la piedra magnética del de la electricidad estática producida frotando el ámbar. Acuñó una nueva palabra latina "electricus" o "como ámbar", de ἤλεκτρον [elektron], la palabra griega para "ámbar") para referirse a la propiedad de atraer objetos pequeños después de ser frotada. Esta asociación dio lugar a la palabra "electricidad", que hizo su primera aparición impresa en 1646.

La **Electrostática** estudia la interacción entre cargas eléctricas en reposo, que, por estar cargadas y a una cierta distancia, ejercen fuerzas unas sobre otras. Para comprender todo esto, comenzaremos por el principio, el átomo.

### El átomo

Un átomo es la unidad más pequeña que forma la materia con propiedades de un elemento químico. Los átomos tienen tamaños de alrededor de la diez mil millonésima parte de un metro (en el orden del Ångström,  $\text{Å} = 10^{-10}$  m). Se han propuesto diferentes modelos atómicos para explicar y predecir su comportamiento.

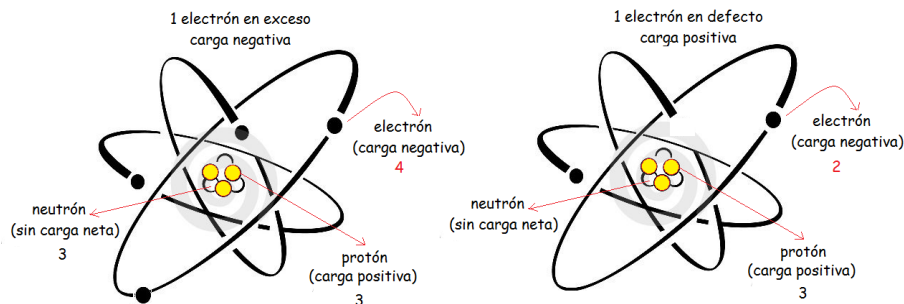


Cada átomo se compone de un núcleo y uno o más electrones que se mueven alrededor del mismo. El núcleo está compuesto de protones y un número similar de neutrones (o ninguno en el hidrógeno). Los **protones** y los **neutrones** constituyen más del 90% de la masa del átomo. Los **protones** tienen una carga eléctrica positiva y los neutrones son

neutros (sin carga neta). Alrededor del núcleo se mueven los **electrones** que tienen carga eléctrica negativa. En balance, cuando el átomo no está ionizado, la cantidad de electrones y protones es la misma, teniendo carga total cero. Si un átomo tiene más o menos electrones respecto de los protones, entonces tiene una carga global neta negativa o positiva y se lo denomina ión.

## Concepto de carga

La carga eléctrica es una propiedad física intrínseca que se manifiesta mediante fuerzas de atracción y repulsión entre ellas por la mediación de campos electromagnéticos.

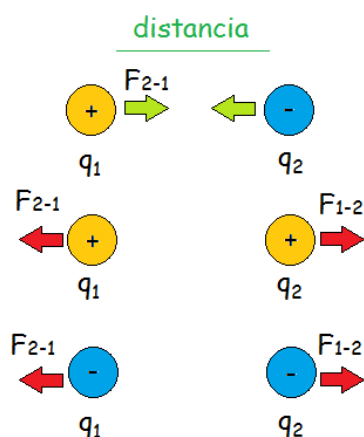


Como dijéramos, existen dos tipos de cargas, que llamaremos "**positivas**" y "**negativas**". Por razones históricas, a las sustancias que poseen un exceso de electrones respecto de los protones se les asigna carga negativa. A las sustancias que tienen un defecto de electrones respecto de los protones se les asigna una carga positiva.

La carga más pequeña es la de un electrón ( $e$ ) y es similar y opuesta a la carga de un protón (ojo!!! No su masa). El valor de la carga elemental es  $e = 1,602 \times 10^{-19} \text{ C}$ , donde la  $C$ , que acompaña, es la unidad de medida de la carga, llamada Coulomb. Un átomo al que se le adiciona un electrón, se le otorga una unidad de carga negativa (o sea,  $-1$ ), para dos electrones,  $-2$ , y así sucesivamente. Lo inverso por pérdida de electrones, otorga valores  $+1$ ,  $+2$ , ...,  $+3$ , etc.

## Ley de Coulomb

Charles-Augustin de Coulomb (Físico francés, 1736 - 1806) fue quien determinó las propiedades de la fuerza electrostática mediante la medición de la torsión de una fibra colgada de una barra cargada, como vimos en el ejemplo de la birrome. **La ley de Coulomb** describe la fuerza entre dos cargas puntuales en reposo, estableciendo que si existen dos cargas puntuales  $q_1$  y  $q_2$  situadas a una distancia  $d_{12}$ , aparecerá una fuerza eléctrica entre ellas.



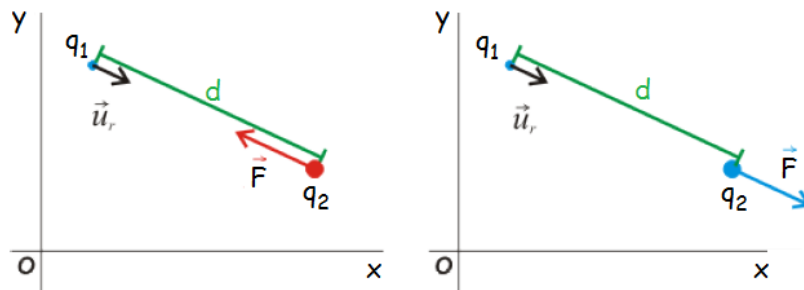
Esta ley establece que la fuerza de interacción entre dos cargas  $q_1$  y  $q_2$  es proporcional al producto de las cargas. Si la distancia entre las cargas es  $d$ , al duplicarla, la fuerza de interacción disminuye en un factor del cuadrado de  $d$ . En consecuencia, la fuerza de interacción entre dos cargas puntuales es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia. Introduciendo una constante de proporcionalidad para transformar la relación anterior en una igualdad se obtiene que:

$$\vec{F}_{1 \rightarrow 2} = k_e \times \left( \frac{q_1 \times q_2}{d_{12}^2} \right) \times \vec{u}$$

Siendo  $k_e$ , una constante cuyo valor es  $9 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$  y  $\vec{u}$  es el vector unitario que indica la dirección de la fuerza. En cuanto a sus unidades:

$$[\vec{F}_{1 \rightarrow 2}] = \left( \frac{\text{N} \times \text{m}^2}{\text{C}^2} \right) \times \left( \frac{\text{C}_1 \times \text{C}_2}{\text{m}^2} \right) = \text{N}$$

Donde la fuerza (como para cualquier otro tipo) es medida en Newton (N).



Las cargas de signo opuesto se atraen, y las de igual signo se repelen!!!!

### Medio

La magnitud del fenómeno eléctrico depende del medio en el cual se manifieste dicho fenómeno. La intensidad máxima se alcanza en el vacío, tal como lo describe la Ley de Coulomb. Para describir el fenómeno en otros medios basta con corregirla dividiendo por un factor,  $\epsilon_r$  (épsilon minúscula, sub-erre), que recibe indistintamente los nombres de constante dieléctrica, o constante de permisividad relativa. En la tabla que sigue, se muestran algunos valores típicos:

Constante dieléctrica a 20°C ( $\epsilon_r$ )	
Vacío	1
Aire seco (1 atm)	1,00059
Agua	80
Membrana plasmática (37 °C)	8
Papel	3,5
Plásticos	3-20
Vidrio	5-10

El comportamiento en aire o vacío es prácticamente el mismo, por lo que despreciaremos la diferencia. Los valores para el agua y las membranas plasmáticas (compuestas principalmente por lípidos) tienen gran importancia biológica, especialmente para comprender la actividad eléctrica de las células, y en particular la función nerviosa.

La forma general de expresar la ley de Coulomb es:

$$\vec{F}_e = 9 \times 10^9 \frac{\text{N} \times \text{m}^2}{\text{C}^2} \times \frac{k_0}{\epsilon_r} \times \frac{q_1 \times q_2}{d^2} \times \vec{u}$$

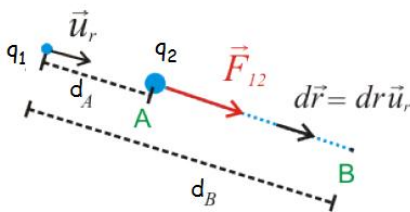
Como toda fuerza, la eléctrica es una magnitud vectorial.

*Nota de interés biológico. El axón, que es la prolongación del cuerpo celular de una neurona, cubierto por su membrana plasmática, está a su vez revestido con un aislante llamado mielina. A nivel de la membrana plasmática se producen fenómenos eléctricos que resultan en la transmisión del impulso nervioso. Es gracias a estos procesos que caminamos, pensamos, reímos, comemos y vivimos.*

### Trabajo de una carga

La **Ley de Coulomb** es formalmente igual a la **Ley de Gravitación Universal** de Newton, que permite calcular la fuerza de atracción entre dos masas. Al igual que esta última, la fuerza electrostática dada por la ley de Coulomb es una fuerza conservativa. Por lo tanto, el trabajo es independiente de la trayectoria y se puede calcular a partir de una función escalar denominada **Energía Potencial Electrostática** ( $U$ ). Supongamos que bajo la acción de una fuerza electrostática la carga de prueba  $q_2$  se desplaza desde un punto A, a un punto B, por lo que el trabajo  $W$  realizado por la fuerza electrostática será:

$$W_{AB} = -\Delta U = -(U_B - U_A) = U_A - U_B$$



Cuando se encuentra bajo la única acción de la fuerza electrostática, la carga de prueba se moverá siempre en el sentido en el que disminuye su energía potencial ( $U_A > U_B$ ). De forma general se toma como origen para la energía potencial el infinito, de modo que cuando la distancia entre las dos cargas es infinita, la energía potencial entre ambas es nula. La energía potencial de

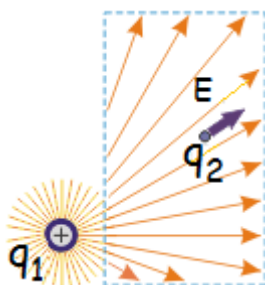
un sistema de dos cargas puntuales  $q_1$  y  $q_2$  que están separadas una distancia  $d$  es:

$$U = k \frac{q_1 q_2}{d}$$

donde  $k = k_0 / \epsilon_r$ .

### Nociones de campo eléctrico

Para comprender el concepto de **campo eléctrico**, veremos un ejemplo. En algún lugar del espacio colocamos una carga. Esa carga " $q_1$ ", que en este caso llamaremos carga fuente. El área que nos interesa ver es la marcada en el recuadro azul del esquema. Ahora tomaremos una carga (que llamamos carga exploradora) y le damos el nombre " $q_2$ ". Colocaremos a esa carga  $q_2$  en nuestro rectángulo.



¿Qué le ocurrirá a nuestra  $q_2$ ? Sentirá una fuerza dada por la existencia de  $q_1$ . Esta fuerza es "sentida" por  $q_2$ , bajo la influencia de  $q_1$  en toda la región del rectángulo. Sabiendo el valor de la fuerza eléctrica ( $F_e$ ) y el de la carga  $q_1$ , podremos definir al **campo eléctrico** como:

$$E = \frac{F_e}{q_2}; [E] = \frac{N}{C} = \frac{[Newton]}{[Coulomb]} = \frac{V}{m} = \frac{[Volt]}{[metro]}$$

Así definido, el campo eléctrico es una entidad independiente de la carga con la que se explora el lugar que se describe, dado que el valor de la carga  $q_2$  se cancela. Veamos:

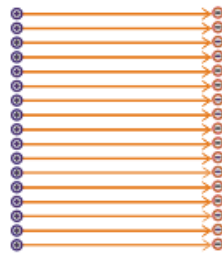
$$E = \frac{F_e}{q_2} = \frac{k_0 \times q_1 \times q_2}{q_2 \times d^2}$$

El campo eléctrico  $E$  generado por una carga puntual sólo depende de la carga generadora del campo ( $q_1$ , la carga fuente) y de la distancia entre ella y el punto en el que estudiamos el campo.

$$E = \frac{k_0 \times q_1}{d^2}$$

### Líneas de campo

El campo es una magnitud vectorial. Esto se puede observar en el esquema donde figuran las líneas que describen la configuración geométrica del campo. Estas líneas con sus respectivas flechas constituyen las líneas de campo (*Recuerden que estas líneas son invisibles, no existen, pero tan sólo se muestran para indicar la dirección del campo*). Acá se



muestran dos ejemplos de importancia biológica: el campo producido por una carga puntual y el campo uniforme producido por cargas paralelas.

El campo uniforme se produce cuando se tienen dos planos paralelos cargados uniformemente con cargas opuestas. Esto

es lo que ocurre en la membrana plasmática de todas las células, que es similar a un capacitor de placas paralelas.

El campo eléctrico uniforme en esta región del espacio se calcula de la siguiente manera:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$$

donde  $\sigma$  (sigma) es la densidad de carga, que es el cociente entre la carga total que hay en uno de los planos y el área ( $A$ , o superficie) del plano ( $\sigma = q_{total} / A$ ) y  $\epsilon_0$  es la permisividad del vacío.

$$\epsilon_0 = (12,57k_0)^{-1}$$

$$\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \frac{C^2}{N \times m^2}$$

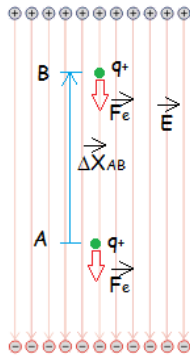
De tal manera que las unidades resultan las de campo eléctrico. Cuando el campo eléctrico no se halla en el vacío, la constante no será  $\epsilon_0$  sino  $\epsilon_0 \times \epsilon_r$ :

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0 \times \epsilon_r}$$

### Energía potencial eléctrica ( $E_{pe}$ )

Si una carga se encuentra dentro de un campo eléctrico, adquiere energía, dado que si la soltáramos, comenzaría a moverse impulsada por la fuerza eléctrica.

Si se mueve una carga de prueba positiva,  $q+$ , en un campo uniforme,  $E$ , desde la posición A hasta la posición B (ver diagrama), en contra de la fuerza eléctrica de repulsión que se opone a este movimiento, se estará haciendo un trabajo negativo. Como el campo es constante, la fuerza eléctrica también lo será, de modo que podemos calcular su trabajo con la expresión de trabajo para fuerzas constantes:



$$W_{AB} = F_e \times \Delta x \times \cos \alpha$$

$$W_{AB} = E \times q \times \Delta x \times \cos 180^\circ$$

$$W_{AB} = -E \times q \times \Delta x$$

Luego de haberse realizado trabajo para mover la carga, la misma tiene más energía que antes. Esta descripción es análoga a la de subir un cuerpo en el campo gravitatorio, cuanto más arriba se encuentre, mayor será su energía potencial gravitatoria (los campos eléctrico y gravitacional funcionan de manera similar!!!).

$$W_{AB} = -(E \times q \times x_B - E \times q \times x_A)$$

$$W_{AB} = -\Delta E_{pe}$$

### Potencial eléctrico

El potencial ( $V$ ) en un punto del espacio debido al campo,  $E$ , generado por una carga  $q$ , es igual al valor del campo en ese punto por la distancia ( $d$ ) entre la carga y el punto.

$$V = E \times d$$

Dado que el campo,  $E$ , se puede calcular en función de la carga  $q$  como  $E = \frac{k_0 \times q}{d^2}$ , entonces

$$V = \frac{k_0 \times q}{d}$$

por lo que se evidencia que, cuanto más cerca nos encontremos de una carga, mayor será el potencial, y cuanto más alejados, menor. A una distancia infinita, el potencial valdrá cero. A través de esta ecuación, también se puede ver que todas las superficies ubicadas a igual distancia de una carga tendrán el mismo potencial, son **superficies equipotenciales**.

### Diferencia de potencial eléctrico o Voltaje

Si dividimos la energía por el valor de la carga, la magnitud que obtenemos es el la **diferencia de potencial eléctrico**, que se simboliza como  $\Delta V$ , donde:

$$\Delta V_{AB} = \frac{W_{AB}}{q} = V_B - V_A$$

La unidad en la que se mide la diferencia de potencial eléctrico es el Volt ( $V$ ), que se relaciona con otras unidades de esta manera:

$$[\Delta V] = V = \frac{J}{C} \quad 1 \text{ Volt} = \frac{1 \text{ Joule}}{1 \text{ Coulomb}}$$

*Nota importante: Con el potencial eléctrico ocurre lo mismo que con la energía. No importa cuánto vale en forma absoluta sino cuánto vale su diferencia con el potencial de otro lugar, por ello que hablaremos habitualmente del  $\Delta V$  y no de  $V$ .*

*Nota de interés biológico: Las células nerviosas de todos los animales, desde el hombre hasta los calamares, y otras células también llamadas excitables, utilizan súbitas variaciones de la diferencia de potencial eléctrico de su membrana plasmática (potencial de acción) que se auto-propaga por la superficie para transmitir señales.*

## Electrocinética

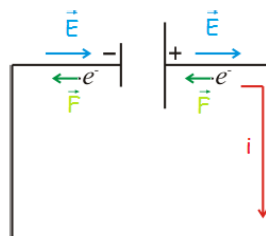
Cuando sobre un conductor se aplica un campo eléctrico, las cargas experimentan una fuerza y por lo tanto se ponen en movimiento. La corriente eléctrica es el flujo de estas cargas en movimiento a través del conductor. La intensidad de corriente eléctrica “ $i$ ” se define como la cantidad de carga eléctrica “ $q$ ” (medida en Coulomb,  $C$ ) que atraviesa el área de un conductor en cada unidad de tiempo. La corriente es una magnitud escalar:

$$i = \frac{q}{\Delta t}$$

La unidad de corriente eléctrica en el Sistema Internacional es el Ampere ( $A$ ). La carga eléctrica que está en movimiento (en este caso), son los electrones libres. Estos electrones, experimentan una fuerza dada por la ecuación:

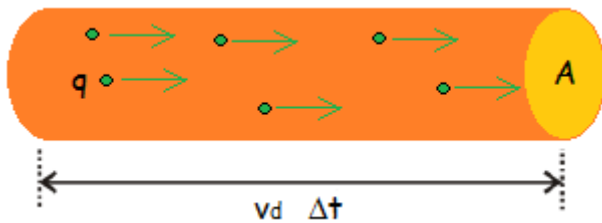
$$\vec{F} = q \times \vec{E}$$

Históricamente se creía que la corriente eléctrica estaba producida por el movimiento de cargas positivas y por ello se adoptó como sentido de la corriente eléctrica el contrario al que en realidad llevan los electrones. Esta convención se mantiene en la actualidad.



En ausencia de campo eléctrico, los electrones (u otros portadores de carga) están en movimiento aleatorio. Sin embargo, bajo la influencia de un campo eléctrico externo, su movimiento no será completamente aleatorio sino que se desplazará en la dirección del campo eléctrico pero sentido contrario. La velocidad a la que lo hacen se denomina velocidad de desplazamiento  $v_d$ , que es del orden de 1 mm/s.





Si por un alambre conductor circulan  $n$  cargas  $q$  por unidad de volumen, la intensidad de corriente vendrá dada por:

$$I = q \times n \times v_d \times A$$

Los metales permiten la conducción de la corriente eléctrica. Cuando se conecta una pila entre los dos extremos de un cable, la pila obliga a los electrones a moverse provocando la aparición de la corriente eléctrica.

### Circuitos eléctricos. Ley de Ohm.

Imaginemos un filamento de un material conductor. Al aplicar entre sus extremos una diferencia de potencial  $\Delta V$ , circulará por él una corriente eléctrica de intensidad  $i$  (carga que atraviesa el filamento por unidad de tiempo). Cuando dicho material es un metal, y en otros muchos casos, se observa que la diferencia de potencial  $\Delta V$  que se debe aplicar para que circule una intensidad  $i$  es proporcional a dicha intensidad, es decir,

$$\Delta V = i \times R$$

La constante de proporcionalidad  $R$  se denomina **resistencia**, que es la dificultad que tienen las cargas para atravesar un elemento conductor, y depende del material y de la forma del conductor, pero no de la corriente  $i$ . Esta ley es la conocida **Ley de Ohm**, en honor al científico alemán Georg Ohm (1787-1854), su descubridor. Esta ley es fundamental en el análisis de circuitos, incluidos los que observamos en células en funcionamiento.

La resistencia de un conductor depende de las características del material, es decir, de su propiedad intrínseca llamada **resistividad**, así como de la longitud y el área del conductor. En un hilo metálico de área transversal  $A$  y longitud  $l$ , la resistencia estará dada por la expresión

$$R = \frac{\rho \times l}{A}$$

conocida como **Segunda Ley de Ohm**, donde  $R$  es la resistencia y su unidad es el Ohm ( $\Omega$ ),  $\rho$ , es la resistividad del material y se mide en  $\Omega/\text{m}$ ,  $l$  la longitud del hilo conductor (m) y  $A$  es el área del hilo conductor ( $\text{m}^2$ ). La resistividad  $\rho$  es característica del material y de la temperatura. En el estudio de las soluciones electrolíticas (sales en agua) es más usual la **conductividad** kappa,  $\kappa$ , que es la inversa de la resistividad, y que depende de la viscosidad del solvente, de la temperatura y del tipo de iones diluidos en la solución. Así, tendremos que

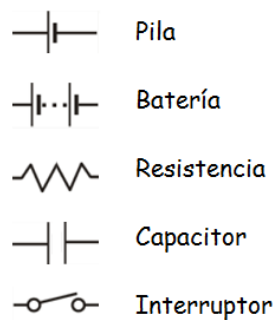
$$R = \frac{l}{\kappa \times A} \Rightarrow \kappa = \frac{1}{\rho}$$

Se acostumbra a utilizar también la inversa de la resistencia, que recibe el nombre de **conductancia**.

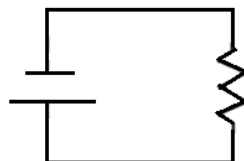
Resistividades a 20°C de algunos materiales			
Clasificación	Materiales	Aplicación	$\rho, \Omega\text{m}$
Buenos conductores	Plata	Contactos	$1,59 \times 10^{-8}$
	Cobre	Hilos y cables	$1,67 \times 10^{-8}$
	Aluminio	Chasis y blindaje	$2,65 \times 10^{-8}$
	Wolframio	Filamento incandescente	$5,52 \times 10^{-8}$
	Tungsteno	Filamento incandescente	$5,60 \times 10^{-8}$
	Hierro	Chasis	$9,71 \times 10^{-8}$
	Estaño	Soldadura	$12,0 \times 10^{-8}$
Malos conductores	Carbón	Resistencias	20-100
	Agua de mar		0,19
	Agua potable		200
	Agua destilada		10.000
	Agua ultrapura		182.000
Aislantes	Baquelita	Regletas de conexión	$10^{10}$
	Madera	Varios	$10^8 - 10^{11}$
	Aire	Remontar barriletes	$(2 - 4) \times 10^{13}$
	Vidrio	Aisladores	$10^{12} - 10^{14}$

### Representación de elementos de un circuito

Los elementos que componen un circuito se suelen representar de forma muy sencilla. Algunos de los símbolos más utilizados son:



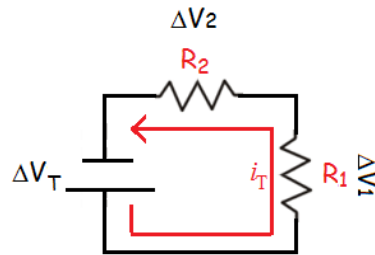
Nótese que en la pila, el polo positivo está representado por la placa de mayor longitud, siendo el polo negativo de menor longitud. Varias pilas conforman una batería. El **capacitor** se representa con dos líneas de igual longitud. Un ejemplo del circuito más sencillo con una resistencia y una pila en serie, sería:



### Circuitos en serie

En un circuito en serie las resistencias están conectadas una a continuación de la otra de tal forma que la corriente atraviesa todas las resistencias por igual, siendo la misma en todo el circuito. Además, la diferencia de potencial está aplicada a todas las resistencias,

de tal forma que la caída de voltaje total es igual a la suma de las caídas en cada una de las resistencias.



En este tipo de conexión resulta que:

$$\Delta V_T = \Delta V_1 + \Delta V_2 \quad R_{ES} = R_1 + R_2 \quad i_T = i_1 = i_2$$

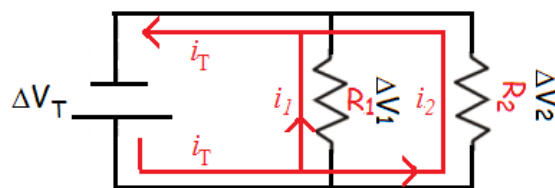
De forma generalizada:

$$\Delta V_T = \sum_{i=1}^n \Delta V_n \quad R_{ES} = \sum_{i=1}^n R_i \quad i_T = i_n$$

Donde  $R_{ES}$  es la resistencia equivalente del circuito en serie.

### Circuito en paralelo

En un circuito en paralelo, las resistencias están todas conectadas a la fuente de alimentación de forma independiente. En este tipo de circuito, la corriente total se divide para pasar por las resistencias, pero el  $\Delta V$  es el mismo en todas las ramas del circuito.



En este tipo de conexión resulta que:

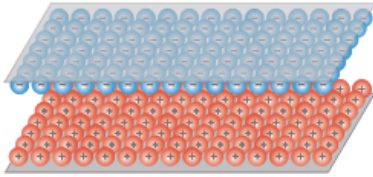
$$\Delta V_T = \Delta V_1 = \Delta V_2 \quad \frac{1}{R_{EP}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad i_T = i_1 + i_2$$

y de forma generalizada:

$$\Delta V_T = \Delta V_n \quad \frac{1}{R_{EP}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_n} \quad i_T = \sum_{i=1}^n i_n$$

### Capacitores

Los **capacitores** son dispositivos que constan de dos placas paralelas distanciadas. Cada una de las placas acumula cargas opuestas, y debido a que en el medio de las placas hay un medio no conductor (dieléctrico), las cargas opuestas se mantendrán alejadas.



De esta manera se pueden alojar cargas de un mismo signo en cada una de las placas ya que, si bien se repelen intensamente entre ellas, al mismo tiempo van a estar siendo atraídas fuertemente por las de la placa de enfrente.

Un capacitor tendrá más capacidad de albergar cargas cuanto más cercanas estén las placas y cuanto más grande sea el área de las placas. La capacidad de contener cargas, se llama **capacitancia**, y se simboliza con la letra  $C$ , siendo la magnitud eléctrica característica de los capacitores, que está determinada, en principio, por esos dos parámetros: su área,  $A$ , y su distancia entre placas,  $d$ .

$$C = \frac{\epsilon_0 \times A}{d}$$

donde  $\epsilon_0$  es la **permisividad** del vacío, que funciona aquí como una constante de proporcionalidad. Su valor es:

$$\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \frac{C^2}{N \times m^2}$$

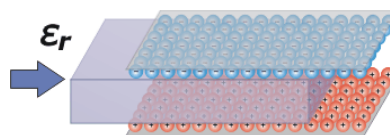
Resulta así que las unidades en las que habrá que medir las capacidades será el Faraday:

$$[C] = \frac{C}{V} = F \text{ (Faraday)}, \quad \text{Faraday} = \frac{\text{Coulomb}}{\text{Volt}}$$

La carga y la capacidad (medida como capacitancia) son directamente proporcionales, ya que si aumenta la capacidad es porque hay más lugar para acumular cargas. Por otro lado, cuanto mayor sea la carga, mayor será la diferencia de potencial entre ellas, ya que mayores serán las fuerzas de repulsión y atracción. Estas dos relaciones básicas se pueden juntar en una única expresión que describe el comportamiento eléctrico de los capacitores:

$$C = \frac{q}{\Delta V} \quad \text{Capacitancia} = \frac{\text{Carga}}{\text{Voltaje}}$$

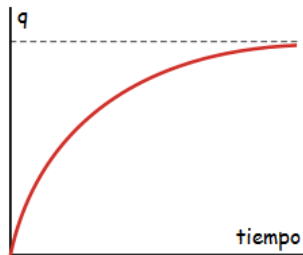
La carga neta de los capacitores siempre es cero dado que siempre tiene tantas cargas positivas de un lado como negativas del otro. Si en el espacio entre las placas colocamos un material aislante cualquiera, la capacidad del dispositivo se modificará. Para corregir el cálculo, bastará con incluir la constante dieléctrica relativa del material,  $\epsilon_r$ , junto a  $\epsilon_0$ .



$$C = \epsilon_0 \times \epsilon_r \times \frac{A}{d}$$

Ese material aislante que se introduce entre las placas suele denominarse **dieléctrico**. La introducción del dieléctrico aumenta la capacitancia.

### Energía en los capacitores



Los capacitores almacenan energía eléctrica que después se puede aprovechar para otros fines como por ejemplo el encendido de un aire acondicionado, un tubo de luz fluorescente, o el potencial de acción de una célula nerviosa. En el gráfico se muestra la carga de un capacitor, desde que empieza a cargarse hasta que adquiere la carga completa (*Importante! Una vez cargado el capacitor, no hay más movimiento de cargas por esa rama del circuito, o sea, la corriente eléctrica será cero*).

La diferencia de potencial eléctrico establecida por el capacitor (cargado) es la misma que la de la fuente que cargó al capacitor. La energía almacenada en el capacitor,  $U$ , se puede calcular como:

$$U = \frac{1}{2} \times \frac{q^2}{C}$$

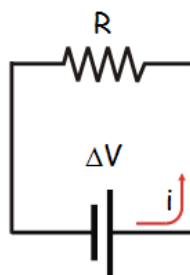
Dado que la carga de los capacitores se puede calcular como:  $q = C \Delta V$ , podemos hallar otras dos expresiones que, en forma equivalente, permiten calcular la energía acumulada.

$$U = \frac{1}{2} \times C \times V^2 = \frac{1}{2} \times q \times V$$

*Nota de interés biológico. La estabilidad de las membranas plasmáticas de las células se logra gracias a la fuerza atractiva de las cargas de sus caras enfrentadas. Es decir, a su capacidad eléctrica. Al igual que con las nubes, separar las capas de la bicapa lipídica requiere que las células vivas realicen un trabajo. Es esperable que la fuerza hidrofóbica de las cadenas lipídicas no alcance para mantener estable la membrana. Existen distintos sistemas de transporte que mantienen ese capacitor activo, y que verán en distintas materias de la carrera de Ciencias Médicas.*

### Potencia y Energía

Veamos el siguiente ejemplo, que representa al circuito más simple:



La corriente  $i$  representa la cantidad de cargas que se mueven en un intervalo de tiempo. De allí que:

$$i = \frac{q}{\Delta t}$$

y sus unidades serán el Coulomb/segundo, que se define como Ampere (A). Importante! En ninguna parte del circuito se crean ni se destruyen cargas, de modo que todo lo que sale por el polo positivo vuelve a entrar por el negativo. R es la resistencia del circuito, el resto de las partes (pila y cables) se considera que tienen resistencia nula. Entre estas tres magnitudes se verifica la Ley de Ohm.

El trabajo de mover cargas implica una disminución de energía que se convierte en otros tipos de energía. El lugar donde se realiza mayoritariamente esta transformación de energía es la resistencia. Para mencionar este fenómeno se ha generalizado el término **disipación de la energía** en la resistencia. Si consideramos el intervalo de tiempo en que ocurre esta transformación, podemos calcular la **potencia eléctrica (Pot)**, o potencia disipada en la resistencia. El cálculo surge de:

$$Pot = \Delta V \times i$$

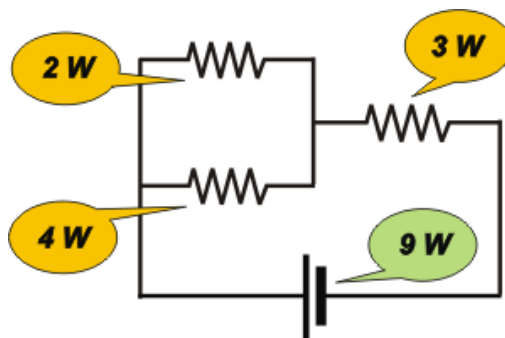
La unidad en la que se mide la potencia, es el Watt.

$$[Pot] = V \times A = \frac{J}{C} \times \frac{C}{s} = \frac{J}{s} = W$$

La potencia eléctrica indica el consumo de energía, y se calcula mediante:

$$Pot = i^2 \times R = \frac{\Delta V^2}{R}$$

Las potencias disipadas en las resistencias de un circuito se suman entre sí para conocer la potencia total disipada. Esto se puede ver en el siguiente ejemplo. Las potencias disipadas por las resistencias, sin importar cómo estén agrupadas, suman la misma cantidad que la potencia entregada por la pila.



Las fuentes, pilas o baterías entregan energía, el resto de los elementos, disipan toda la energía en su totalidad (aunque parte de la energía se "pierda" como calor).

El kilowatt-hora, kWh, es una unidad de energía, no de potencia. Tiene un nombre engañoso, se trata del producto entre dos unidades: kilowatt y hora. La primera es indudablemente de potencia, mil watts; y la segunda de tiempo. El producto de potencia por tiempo, da energía.

$$1 \text{ kW} = 1.000 \text{ W} \times 1 \text{ h} = 1.000 \frac{J}{\text{seg}} \times 3600 \text{ seg} = 3.600.000 \text{ J}$$

La energía se puede calcular multiplicando la potencia por el intervalo de tiempo:

$$\Delta U = Pot \times \Delta t = \Delta V \times i \times \Delta t = \Delta V \times q$$

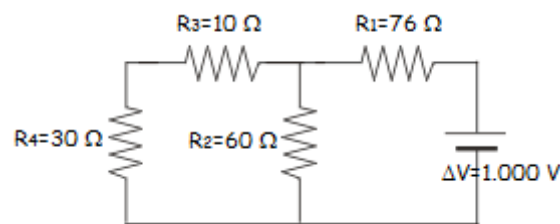
Respecto de las unidades

$$[\Delta U] = V \times C = J$$

*Nota importante: El trabajo eléctrico, voltaje por carga, se expresa en Joule, como toda forma de trabajo.*

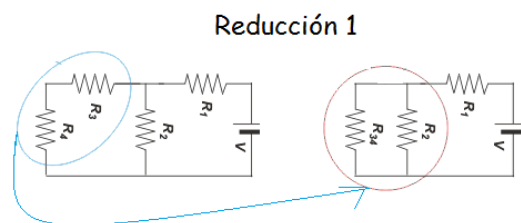
### Ejemplos de resolución de circuitos

Dado un circuito eléctrico como el que se muestra a continuación, vamos a calcular la corriente que atraviesa cada resistencia ( $i_1, i_2, i_3, i_4$ ), la diferencia de potencial a la que está sometida cada una de ellas ( $V_1, V_2, V_3, V_4$ ) y la potencia que disipa ( $Pot_1, Pot_2, Pot_3, Pot_4$ ).



Lo primero que se debe hacer es simplificar el circuito a su mínima expresión. Para ello, buscaremos en cada paso un circuito equivalente más sencillo. Para ello, evaluaremos si las resistencias están en serie o paralelo, y así calcular su resistencia equivalente.

¿La resistencia 1 está en serie con la resistencia 3? ¿La resistencia 2 está en paralelo con la resistencia 4? Algunas no son tan sencillas de responder. El par de resistencias del que no cabe duda cuál es su asociación es el par 3 y 4, que están en serie. A ese par y sólo a ese lo reemplazamos por su resistencia equivalente.



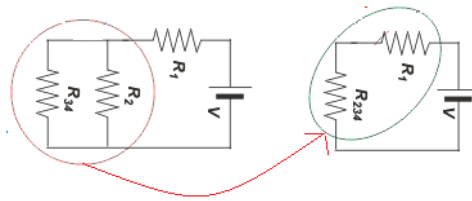
Y calculamos cuál es el valor

$$R_{34} = R_3 + R_4$$

$$R_{34} = 10\Omega + 30\Omega = 40\Omega$$

En este nuevo circuito reducido, el par de resistencias cuya asociación es segura, son las resistencias 2 y la equivalente 3-4, que se hallan asociadas en paralelo. La reemplazamos:

## Reducción 2



Y calculamos cuál es el valor

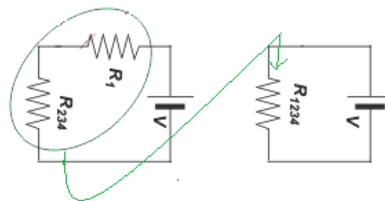
$$\frac{1}{R_{234}} = \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_{34}}$$

$$\frac{1}{R_{234}} = \frac{1}{60\Omega} + \frac{1}{40\Omega} = \frac{40+60}{2400\Omega} = \frac{100}{2400\Omega} = \frac{1}{24\Omega}$$

$$\frac{1}{R_{234}} = \frac{1}{24\Omega} \Rightarrow R_{234} = 24\Omega$$

Todavía queda una reducción más, ahora es claro que las dos resistencias que quedan están asociadas en serie. La reemplazamos.

## Reducción 3



$$R_{1234} = R_1 + R_{234}$$

$$R_{1234} = 76\Omega + 24\Omega = 100\Omega$$

El circuito que nos quedó es equivalente al primero, pero es el más sencillo que podríamos imaginar: una sola resistencia, una sola corriente y una sola diferencia de potencial.

$$R_1 = 76\Omega; R_2 = 60\Omega; R_3 = 10\Omega; R_4 = 30\Omega; R_{34} = 40\Omega; R_{234} = 24\Omega; R_{1234} = 100\Omega$$

Ahora, aplicamos la ley de Ohm y vamos recorriendo el circuito de vuelta (del más simple al más complejo). Sabemos que la diferencia de potencial a la que está sometida la resistencia que llamamos 1234 es la de la pila (ver esquema arriba). La única incógnita que resta en este circuito es la corriente que atraviesa esa resistencia, que no es otra cosa que la corriente total. Así, podemos calcular la corriente total (o  $i_{1234}$ ) como:

$$i_{1234} = \frac{V}{R_{1234}} \Rightarrow i_T = \frac{V}{R_T} = \frac{1000V}{100\Omega} = 10A$$

Dado que si miramos la última reducción del circuito,  $i_{1234} = i_1 = i_{234}$ , entonces  $i_1 = i_{234} = 10A$ . Ahora podemos calcular la  $\Delta V$  a través de cada una de estas resistencias.



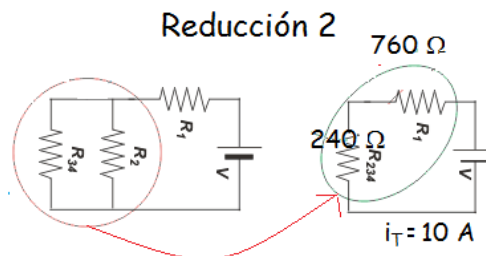
$$V_1 = i_1 \times R_1 = 10 \text{ A} \times 76 \Omega = 760 \text{ V}$$

$$V_{234} = i_{234} \times R_{234} = 10 \text{ A} \times 24 \Omega = 240 \text{ V}$$

Cada paso que retrocedemos ofrece una oportunidad de revisar el resultado. Como estas resistencias están en serie, la suma de las diferencias de potencial deberá ser igual a la diferencia de potencial total:

$$V_{1234} = V_1 + V_{234} = 760 \text{ V} + 240 \text{ V} = 1000 \text{ V}$$

Vamos un paso más atrás, a la Reducción 2, donde anotamos los datos que calculamos recién:



En un circuito en paralelo, la diferencia de potencial de cada resistencia integrante es igual a la diferencia de potencial de su equivalente. Por lo tanto:

$$V_{234} = V_2 + V_{34} = 240 \text{ V}$$

Queda averiguar la corriente que atraviesa cada resistencia mediante la Ley de Ohm:

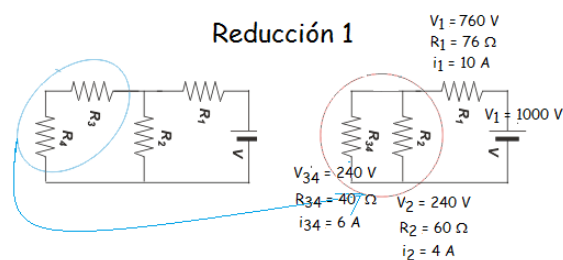
$$i_2 = \frac{V_2}{R_2} = \frac{240 \text{ V}}{60 \Omega} = 4 \text{ A}$$

$$i_{34} = \frac{V_{34}}{R_{34}} = \frac{240 \text{ V}}{40 \Omega} = 6 \text{ A}$$

Revisamos la suma de las corrientes en las que se divide un circuito en paralelo, que debe ser igual a la corriente que atravesaba la resistencia 34:

$$i_{234} = i_2 + i_{34} = 4 \text{ A} + 6 \text{ A} = 10 \text{ A}$$

Ahora seguimos hacia atrás, revisando la Reducción 1, a la que le agregamos los valores que ya tenemos:



Observando el circuito original, entonces:

$$i_{34} = i_3 + i_4 = 6A$$

Y aplicando la ley de Ohm para cada resistencia:

$$V_3 = i_3 \times R_3 = 6A \times 10\Omega = 60V$$

$$V_4 = i_4 \times R_4 = 6A \times 30\Omega = 180V$$

Revisamos que la suma del voltaje resulte en el valor total:

$$V_{34} = V_3 + V_4 = 60V + 180V = 240V$$

Finalmente, calculamos las potencias a través de cada resistencia:

$$Pot_1 = V_1 \times i_1 = 760V \times 10A = 7600W$$

$$Pot_2 = V_2 \times i_2 = 240V \times 4A = 960W$$

$$Pot_3 = V_3 \times i_3 = 60V \times 6A = 360W$$

$$Pot_4 = V_4 \times i_4 = 180V \times 6A = 1080W$$

Siendo la potencia total del circuito:

$$Pot_T = V_T \times i_T = 1000V \times 10A = 10.000W$$

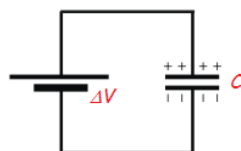
Si sumamos las potencias disipadas por cada resistencia, su valor debe ser igual a la potencia total (toda la energía se transforma pero no se pierde ni se crea, según el **Primer Principio de la Termodinámica**).

$$Pot_T = Pot_1 + Pot_2 + Pot_3 + Pot_4 = 7.600W + 960W + 360W + 1.080W = 10.000W$$

Este mismo método es aplicable a circuitos con capacitores, sólo que en vez de utilizar la ley de Ohm, se aplica el principio del funcionamiento de los capacitores:  $C = Q/V$ . Los capacitores se suman en paralelo, y en serie se suman sus inversas, como veremos a continuación.

### Asociación de capacitores

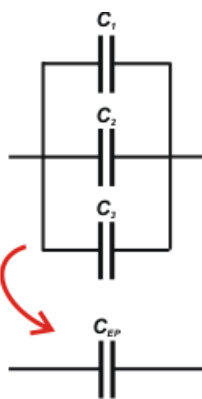
Los capacitores pueden asociarse como las resistencias, en serie o en paralelo. Pero ambas formas recién adquieren sentido cuando el grupo de capacitores asociados está conectado a una pila, o a una batería, o a cualquier otra fuente capaz de suministrarle cargas. Para un único capacitor, el circuito más sencillo posible en el cual adquiere cargas es el que se esquematiza a continuación.



Una vez conectados de esta manera, de los extremos de la pila salen cargas que van a almacenarse en las placas del capacitor hasta que el mismo alcanza una diferencia de potencial igual a la de la pila. Recordemos que entre las placas no podrá haber conducción eléctrica, dado que el medio que las separa no es conductor de cargas (dieléctrico). El proceso de carga puede tardar más o menos dependiendo de las propiedades del capacitor, durante el cual, habrá una corriente que se detendrá en el momento que  $C$  esté cargado completamente. La placa conectada a la cara positiva de la pila queda definida como positiva y la otra como negativa, y la diferencia de potencial entre las placas será idéntica a la diferencia de las pilas.

### Conexión en paralelo de capacitores

Dos o más capacitores están conectados en paralelo cuando sus placas de igual polaridad están conectadas entre sí. Este grupo puede reemplazarse por un único capacitor, capaz de acumular la misma carga que el conjunto, y que por ello recibe el nombre de capacitor equivalente del paralelo,  $C_{EP}$ . El valor del capacitor equivalente se obtiene mediante:



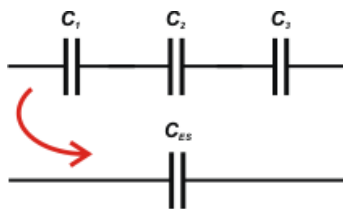
$$C_{EP} = C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_n$$

Cuando un conjunto en paralelo se conecta a una fuente de cargas, todos los capacitores del grupo adquieren la misma diferencia de potencial,  $\Delta V_{EP} = \Delta V_1 = \Delta V_2 = \Delta V_3 = \Delta V_n$  y la suma de las cargas de cada uno es igual a la carga del capacitor equivalente:

$$q_{EP} = q_1 + q_2 + q_3 + \dots + q_n$$

El capacitor equivalente de un circuito paralelo siempre tiene más capacidad que el mayor de los capacitores del grupo.

### Conexión en serie



Dos o más capacitores están conectados en serie cuando están conectados entre sí por sus placas de polaridad opuesta. El grupo puede reemplazarse por un único capacitor, capaz de acumular la misma carga que el conjunto, y que por ello recibe el nombre de capacitor equivalente en serie,  $C_{ES}$ .

Si se conoce el valor de las capacidades de los capacitores que integran el grupo en serie, puede conocerse el valor inverso del capacitor equivalente sumando las inversas:

$$\frac{1}{C_{ES}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots + \frac{1}{C_n}$$

Cuando un conjunto en serie se conecta a una fuente de cargas, todos los capacitores del grupo adquieren la misma carga,  $q_1 = q_2 = q_3 = \dots = q_n$  y la suma de las diferencias de potencial de cada una es igual a la diferencia de potencial del capacitor equivalente:

$$\Delta V_{ES} = \Delta V_1 + \Delta V_2 + \Delta V_3 + \Delta V_n$$

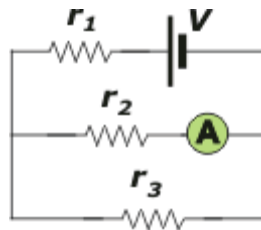
El capacitor equivalente de una serie siempre tiene menor capacidad que el más chico de los capacitores del grupo.

### El amperímetro

Como su nombre lo indica este instrumento mide la corriente que pasa por alguna rama del circuito. Su símbolo es:



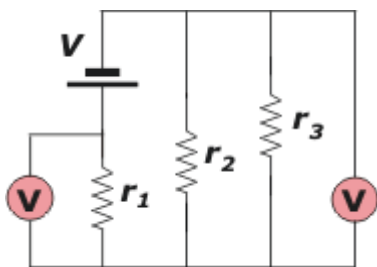
Siempre que esté conectado en serie con una resistencia, podrá medir la corriente que pasa a través de la misma. Por ejemplo:



Para que no afecte la circulación de corriente ni las caídas de voltaje, el amperímetro ideal es aquel de resistencia nula ( $R_A = 0$ ). Como esto no es posible en la práctica, se buscan para su elaboración materiales de resistencia despreciable respecto a las del circuito.

### El voltímetro

Este instrumento mide diferencias de potencial. Su símbolo es:



El voltímetro mide la diferencia de potencial que existe entre los dos puntos que toquen sus cables, de modo que para medir una diferencia de potencial cualquiera, basta con apoyar las puntas en los lugares de conexión de cualquier elemento eléctrico de un circuito (una resistencia, una batería, un capacitor). Por ejemplo:

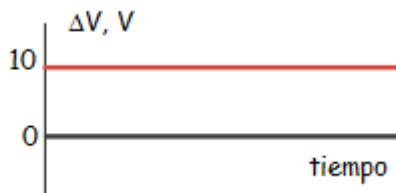
Nótese que los voltímetros se conectan en paralelo a la resistencia a través de la cual se desea medir la diferencia de voltaje. Para que la corriente no pase a través del voltímetro, este deberá tener idealmente una resistencia infinita ( $R_V = \infty$ ). Dado que el valor infinito es inalcanzable, los voltímetros se construyen con las resistencias más altas posibles, para ignorar su presencia.

En la actualidad, amperímetro y voltímetro vienen integrados en un único instrumento llamado **multímetro**. Tienen además otras funciones, entre las que se destaca el óhmetro, que mide valores de resistencias.



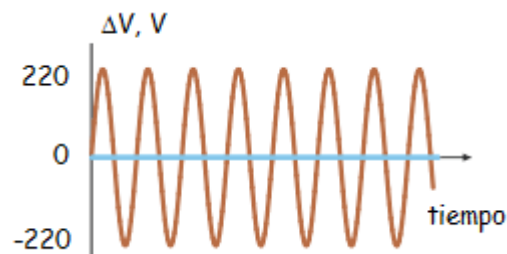
### Nociones de corriente alterna

Hasta aquí hemos hablado siempre de lo que se conoce como corriente directa. Por ejemplo, si graficamos la diferencia de potencial de una pila, obtendríamos algo así:

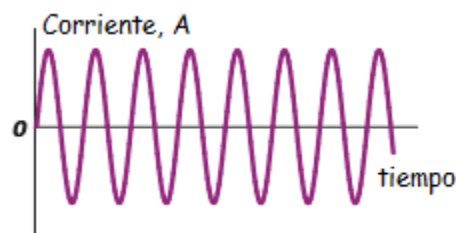


La diferencia de potencial no cambia con el tiempo, es decir es constante.

La red eléctrica que llega a nuestros hogares a través de los tomacorrientes, suministra un tipo de corriente que se llama alterna, justamente porque no es constante. Si graficáramos la diferencia de potencial eléctrico en función del tiempo, obtendríamos lo siguiente:



El gráfico es sinusoidal, es decir que sigue la función seno. Oscila periódicamente unas cincuenta veces por segundo (50 Hertz). La diferencia de potencial, va de 220 V a -220 V. La consecuencia inmediata de esto es que las corrientes eléctricas en una casa son muy diferentes a las generadas con pilas o baterías, donde las cargas (los electrones) viajan siempre en un único sentido. En la corriente eléctrica domiciliaria, las cargas van y vienen todo el tiempo, pero en definitiva se quedan siempre en el mismo lugar. Cuando se prende una lamparita, los electrones vibran en la dirección de los cables. Si graficamos la corriente en función del tiempo, el gráfico resulta enormemente parecido al de potencial.



A este tipo de corriente se la llama corriente alterna, que se simboliza AC (de su nombre en inglés).

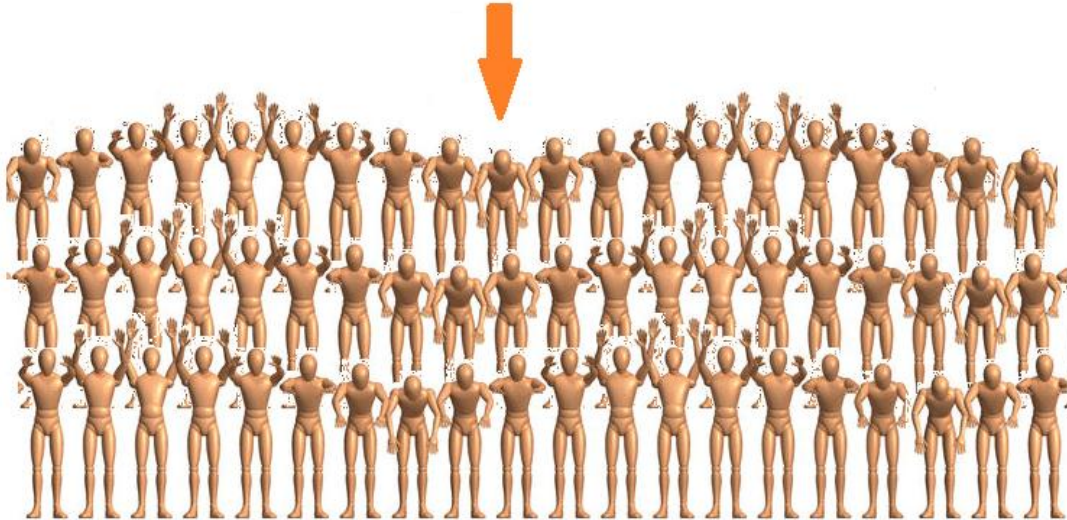
**Por qué se usa corriente alterna**

Cuando alguien toca un cable o un alambre electrificado y es atravesado por la corriente, sus músculos se contraen. Por más voluntad que ponga uno en ordenarle a la mano que suelte el cable, la mano no obedece y la corriente continúa pasando por el cuerpo. Con la corriente alterna el riesgo disminuye enormemente ya que la víctima tiene cien oportunidades por segundo, en que la corriente se hace cero para soltar el cable.

## Nociones de ondas

### ¿Qué son las ondas?

Conceptualmente una onda es el movimiento de una perturbación, una señal, o una cantidad de energía. Un ejemplo de esto sería la conocida ola en la tribuna de un espectáculo deportivo. Observemos el siguiente esquema:



Cada renglón representa la misma fila de una tribuna vista a intervalos de tiempo. Uno de ellos, está indicado por la flecha en rojo, que tomaremos como referencia, aunque con todos los espectadores ocurre lo mismo. Secuencialmente, se observa cómo los espectadores se agachan y se paran mientras pasa la ola. De modo que aquí tenemos algo que viaja de izquierda a derecha, una señal, una que no es materia.

Hay dos ondas muy conocidas en la física: **la luz** y **el sonido** son dos ejemplos. En ellas también hay algo que viaja, que no es materia.

### Perturbación en función de la posición

Volvamos al ejemplo de la ola (ver arriba), pero supongamos que en lugar de tener una fila de espectadores, son millones de espectadores y, además, diminutos. Lo más práctico para representar esa fila es con una línea llena.



Esta línea llena representa a los millones de espectadores de la fila. En las ordenadas ( $y$ ) se indica la perturbación, que en nuestro caso podría ser cuánto ascienden las cabezas y en el eje de las abscisas ( $x$ ) las posiciones de todos los espectadores. Este gráfico es una instantánea de la fila.

### Perturbación en función del tiempo

El siguiente gráfico, en cambio, muestra toda la secuencia de la ola, pero referida para un solo espectador (por ejemplo el indicado con la flecha roja), es decir para una sola partícula material. Las ordenadas representan lo mismo que en el anterior, pero el eje de las abscisas indica el paso del tiempo. En la medida que le llega la ola, el espectador se agacha (mínimo valor del eje  $y$ ) y cuando la ola pasa se para (máximo valor del eje  $y$ ).



### Propiedades de las ondas

- La velocidad con la que avanzan las ondas recibe el nombre de **velocidad de propagación**.
- La velocidad de propagación de las ondas depende del medio en que se propagan. Si el medio es uniforme y no cambia, la velocidad de propagación de las ondas será constante, lo cual representa la situación más común en la física.
- Cuando las ondas viajan en un plano o en un volumen, y no en una línea (como en los ejemplos dados), suelen viajar todas juntas. Ese avance conjunto genera una propiedad denominada **frente de onda**. Si en el ejemplo de la tribuna tomamos cuatro o cinco filas en lugar de una sola, entonces ya no es uno el que se levanta en cada momento sino que son cuatro o cinco, simultáneamente, uno en cada fila y en la misma columna.



### Ondas transversales y longitudinales

Observamos que la velocidad de avance o de propagación de una onda define una dirección, y el movimiento de las partículas materiales, otra. Entonces puede ocurrir que las partículas se muevan en una dirección transversal a la de propagación. En ese caso decimos que estamos frente a una onda transversal. Ese es, justamente, el caso de nuestro primer ejemplo, la ola en la tribuna. Cada espectador se para o se sienta y eso es un movimiento vertical, mientras que la ola se desplaza por la tribuna en forma horizontal.

Cuando el movimiento de las partículas (sin cambiar de lugar) coincide con la velocidad de propagación, estamos en presencia de una onda longitudinal. Las ondas longitudinales son sencillas de producir, ya que sólo hace falta empujar a la partícula de al lado para producir en ella un pequeño desplazamiento, y que ésta haga lo mismo con la de más allá y así sucesivamente. También si una se retira hacia atrás y deja el espacio vacío, enseguida vendrá a ocuparlo la vecina.

Para una onda transversal es un poco más difícil, ya que si una partícula se mueve de costado y pretende arrastrar consigo a la vecina, debo tener con ella cierta cohesión. Si no, no puede desplazarla lateralmente, y no se produciría el fenómeno de la onda.

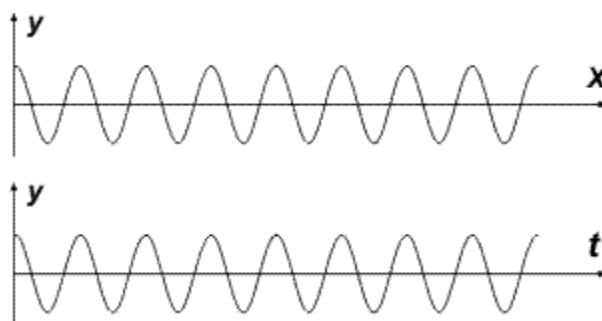


### Ejemplos de ondas transversales y longitudinales

1. Las ondas en las cuerdas son transversales. Basta con ver cómo se logra producirlas (siempre perturbándolas en forma perpendicular a la cuerda, por donde viaja la onda).
2. Las ondas en el agua son transversales. Si ponemos a flotar un corchito se ve que cuando pasa una ola (horizontalmente) el corchito sube y baja, se desplaza verticalmente, es decir que es transversal a la propagación de la ola.
3. La luz y todas las ondas electromagnéticas son transversales.
4. El sonido es un fenómeno de ondas longitudinales.

### Ondas periódicas

Las ondas más interesantes de la naturaleza son periódicas. Eso quiere decir que no es una única perturbación la que viaja, sino que son muchas perturbaciones, una atrás de la otra, todas iguales y a igual distancia entre sí. Eso es una **onda periódica**.

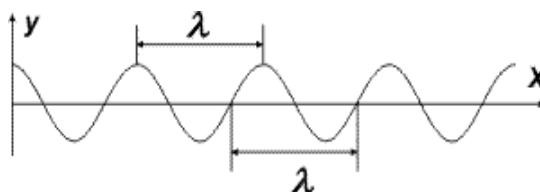


El gráfico de arriba nos muestra cómo están perturbadas todas las partículas afectadas en la propagación de la onda en un único instante. Y el gráfico de abajo nos muestra cómo se perturba una única partícula material mientras se halla sometida al pasaje de la onda periódica. La forma que se ha elegido para mostrar el fenómeno de la periodicidad en este caso es arbitraria. A esta se la llama **sinusoidal**, porque tiene la forma de la función seno.

La función sinusoidal es muy importante en la Física, dado que muchos fenómenos de relevancia tienen naturaleza sinusoidal, en particular las ondas del sonido y de la luz.

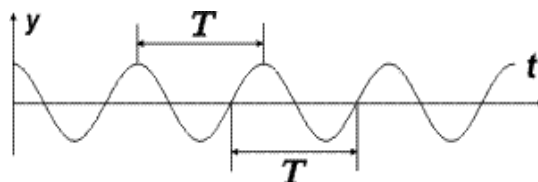
### Características fundamentales de una onda

Si consideramos el gráfico (y-x), la distancia entre dos "picos" de máxima perturbación, o lo que es lo mismo entre dos partículas que están igualmente perturbadas, se llama longitud de onda.



Se representa con la letra griega minúscula lambda,  $\lambda$ , y se mide en cualquier unidad de longitud, por ejemplo, metros. A menos que cambiemos de onda o de medio, la longitud de

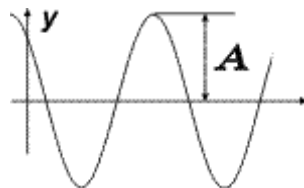
una onda será constante. Si consideramos el gráfico (y-t). El intervalo de tiempo que transcurre entre dos perturbaciones máximas que sufre una partícula material cualquiera se llama **período**. Se representa con la letra mayúscula  $T$ , y se mide en cualquier unidad de tiempo, por ejemplo, segundos. A menos que cambiemos de onda, el período será constante.



Otra forma de caracterizar el período es formularnos la siguiente pregunta: ¿cuántas veces por unidad de tiempo se alcanza el máximo? La respuesta a esta pregunta se llama **frecuencia**,  $f$ , y es la recíproca del período.

$$f = \frac{1}{T}$$

La magnitud de la perturbación va cambiando. Cuando alcanza un máximo, recibe el nombre de **amplitud**.



Se representa con la letra mayúscula  $A$ , y se mide en la misma unidad en que se miden las perturbaciones (diferentes en cada tipo de onda).

Si una perturbación máxima (que se mueve junto a toda la onda periódica a velocidad constante,  $v$ ) tarda un período de tiempo,  $T$ , en desplazarse un tramo igual a una longitud de onda,  $\lambda$ , entonces, su velocidad (sólo por el hecho de ser constante) será:

$$v = \frac{\lambda}{T}$$

Reemplazando el período por su igual (la inversa de la frecuencia) se llega a la expresión fundamental de las ondas:

$$f = \lambda \times v$$

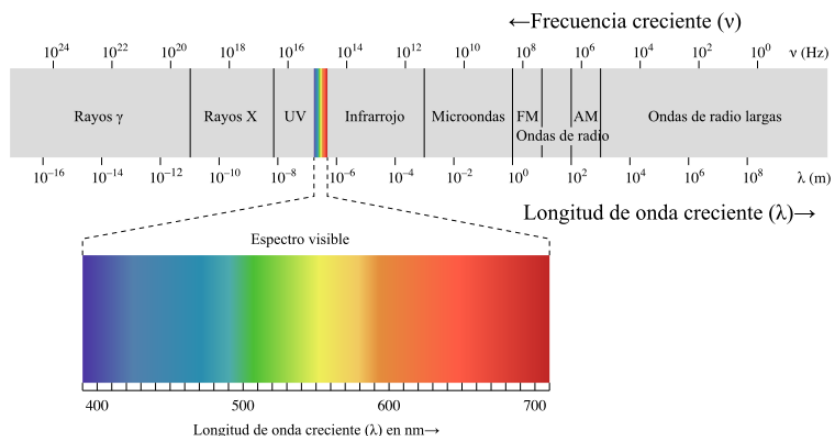
La **velocidad de propagación** de una onda periódica es igual al producto entre la longitud de onda y la frecuencia.

### Ondas luminosas

La luz es un fenómeno ondulatorio. Se propaga de un lado a otro pero lo que viaja no es materia sino una perturbación del medio. Una de las características más importantes de la luz es que puede propagarse en el vacío. De modo que la perturbación oscilatoria del medio es una perturbación de tipo inmaterial. Efectivamente, lo que cambia en el medio mientras la luz se propaga son pequeños campos eléctricos y magnéticos. Por eso a la onda luminosa

se la conoce como **onda electromagnética** y la perturbación transporta la energía almacenada en estos campos.

El fenómeno electromagnético es muy amplio y la luz es apenas una porción estrecha de este fenómeno. Podemos graficar al fenómeno de las ondas electromagnéticas ordenándolas según la frecuencia ondulatoria, o la longitud de la onda.



El gráfico anterior muestra las ondas electromagnéticas ordenadas por longitud de onda de menor a mayor. Si ordenásemos según la frecuencia obtendríamos el mismo gráfico, con frecuencias más altas a la izquierda y menores a la derecha. El producto entre longitud de onda y frecuencia es constante para un mismo fenómeno, **la velocidad de propagación**.

$$v = \lambda \times f$$

Y en este caso se trata de la velocidad de la luz, que se denomina con la letra "c", cuyo valor (aproximado) es  $c = 300.000.000 \text{ m/s}$ .

$$c = \lambda \times f$$

Según todos los experimentos hechos hasta la fecha, la velocidad de la luz es un máximo insuperable en nuestro universo. Nada puede viajar más rápido que la luz u otra onda electromagnética en el vacío.

### Índice de refracción, velocidad de la luz en diferentes medios

Se llama **índice de refracción**,  $n$ , al cociente entre la velocidad de la luz en el vacío,  $c$ , y la velocidad en otro medio cualquiera por el que viaja la luz,  $v$ .

$$n = \frac{c}{v}$$

Se trata de una propiedad característica de cada medio. A continuación se muestra una tabla con los medios más utilizados. Dado el índice de refracción de una sustancia puede conocerse el valor de la velocidad de la luz en ella.

Medio	n
Aire	1,0003
Agua (20°C)	1,3333
Vidrio (varios tipos)	1,4 a 1,7
Diamante	2,412
Silicona	1,6
Fibra óptica (varias)	<1,45

## Color

Isaac Newton fue uno de los primeros en estudiar la composición de la luz blanca y descomponerla en los colores del arco iris al hacer pasar un fino haz de luz blanca solar por un prisma de vidrio de caras oblicuas. Cada longitud de onda del espectro visible se corresponde con un color diferente. Así, por ejemplo el color rojo se corresponde con la longitud de onda de 700 nm, y la del amarillo 580 nm (*nm* representa nanometro, o sea,  $10^{-9}$  m). Percibimos como color azul las longitudes de onda que van aproximadamente desde 450 hasta 495 nm.

V   B   G   Y   O   R	
color	long. onda (nm)
violeta	380-450
azul	450-495
verde	495-570
amarillo	570-590
naranja	590-620
rojo	620-750

En general cuando vemos algo azul nuestros ojos están recibiendo un conjunto de longitudes de onda mayoritariamente azules (450-495 nm), en ese caso lo llamamos color policromático. Si nos llegase una única longitud diríamos que ese azul es monocromático.

La visión es una cuestión de sensaciones. Lo que percibimos como luz solar en una luz blanca que es una suma bastante homogénea de casi todos los colores del espectro visible.

## Origen del sonido

El **sonido** es una propiedad de objetos vibrantes. Estos objetos pueden ser sólidos, líquidos o gaseosos. Si hay un medio elástico, es decir, un medio que es capaz de ser comprimido, entre el objeto vibrante y un aparato adecuado, tal como un micrófono o la oreja de los animales, se detectará ruido o sonidos.

El sonido puede producirse de diversas maneras, normalmente como resultado de alguna perturbación mecánica en un objeto, haciendo que vibre. Por ejemplo,

Un golpe por un martillo en un trozo de hierro hace que el hierro (y el martillo vibren) por un corto tiempo.

Una cuerda de la guitarra se puede hacer vibrar, y una cuerda de violín vibra bajo la acción de frotamiento del arco.

Los altavoces consisten en un cono, que vibra bajo influencias eléctricas.

Una piel fuertemente estirada en un tambor se pone a vibrar cuando se golpea.

Las cuerdas vocales vibran cuando el aire de los pulmones pasa a través de la laringe.

En todos los casos, las **vibraciones** se transmiten al medio circundante, típicamente aire, y se establecen **ondas longitudinales**. De esta manera, parte de la energía de las vibraciones puede transmitirse a lo largo de una distancia.

### Características de las ondas longitudinales

Las ondas longitudinales son **ondas mecánicas** donde la perturbación se transmite en una dirección **paralela** a la dirección de desplazamiento de las ondas. Tanto las ondas sonoras como las llamadas ondas P producidas por los terremotos, son ejemplos de ondas longitudinales. Requieren un medio para propagarse.

Las ondas longitudinales viajan a través de un fluido creando regiones de **compresión** y **rarefacción** del fluido, que viajan en la dirección de la onda. La longitud de onda,  $\lambda$ , es la distancia entre los centros de dos zonas consecutivas de compresión o rarefacción. Una partícula P del fluido oscilará en un rango  $2A$ , donde  $A$  es la amplitud de la onda (similares a los conceptos de ondas transversales).

La velocidad  $v$  de la onda es la velocidad a la que las zonas de compresión y rarefacción viajan en la dirección de la onda. Como en el caso de las ondas transversales, la frecuencia de la onda viene dada por

$$\text{Frecuencia, } f = v / \lambda$$

La unidad de frecuencia es el Hertz, Hz donde  $1 \text{ Hz} = 1 \text{ s}^{-1}$ . El período,  $T$ , de la onda, al igual que en otro tipo de ondas, es el tiempo que toma el centro de una zona para mover una longitud de onda en la dirección de desplazamiento. Es la recíproca de la frecuencia:

$$T = 1 / f.$$

### Propagación del sonido

El sonido se propaga mediante ondas longitudinales a través de un medio elástico. Típicamente, tal medio sería el aire, aunque el sonido pueda ser transmitido a través de líquidos y sólidos. El medio, el aire por ejemplo, tendrá en cualquier instante zonas de **compresión**, donde el aire es más denso, y regiones de **rarefacción**, donde el aire es menos denso. El sonido no puede transmitirse a través del vacío. Esto puede demostrarse mediante el siguiente experimento:

Un pequeño altavoz, conectado a una computadora, se coloca en una campana que se puede evacuar con una bomba de vacío para sacar todo el aire contenido en ella. Se genera un sonido mientras la campana todavía está llena de aire, y puede ser claramente oído. La bomba de vacío se enciende, y el sonido gradualmente se atenúa, hasta que se convierte en inaudible.

En el caso de un instrumento musical de viento, se instala una onda estacionaria dentro de un tubo. Las ondas sonoras resultantes se propagan fuera del instrumento, y se vuelven audibles.

Cuanto mayor es la amplitud de la onda sonora, más fuerte suena a nuestros oídos, pero cambiar la amplitud no tiene ningún efecto sobre la frecuencia.

## La velocidad del sonido

El sonido viaja a diferentes velocidades en diferentes medios. En el aire a 20°C, el sonido viaja a 344 m.s<sup>-1</sup>. Esta cifra varía con la temperatura y la presión. En el agua a 20°C, el sonido viaja a 1498 m.s<sup>-1</sup>. En general, cuanto más incompresible sea un medio, más rápido viajará el sonido en ese medio. Si un objeto viaja más rápido que la velocidad del sonido, dicho objeto se dice que viaja a una velocidad supersónica. Recuérdese que la relación entre la velocidad  $v$  de una onda, su frecuencia  $f$ , y su longitud de onda,  $\lambda$  viene dada por  $f = v / \lambda$ .

Ondas de sonido	Ondas de luz
El sonido no puede viajar en un vacío	Las ondas de luz pueden viajar en el vacío
El sonido transfiere energía cinética	La luz transfiere energía electromagnética
Las ondas sonoras son ondas longitudinales	Las ondas luminosas son ondas transversales
La velocidad del sonido aumenta a medida que las ondas se mueven de un medio más ligero a un medio más denso.	La velocidad de la luz disminuye a medida que las ondas se mueven de un medio más ligero a un medio más denso.

## Bibliografía

Alvarenga M. Física General. Ed. Harla, México 1983.

Cabrera R. No me salen. Apuntes teóricos de Física y Biofísica del CBC, UBA.  
<https://ricuti.com.ar/>

Coulomb's Law. [https://en.wikipedia.org/wiki/Coulomb's\\_law](https://en.wikipedia.org/wiki/Coulomb's_law).

Cromer A. Física para las ciencias de la vida. 2º Ed. Reverte, 2007.

Cussó F, López C, Villar R. Física de los Procesos Biológicos. Ariel, 2004.

De Simone I, Turner M. Matemática, Funciones y Probabilidades. A-Z. 2006.

Gettys W, Keller F, Skove M. Física Clásica y Moderna. MacGraw-Hill, 1991.

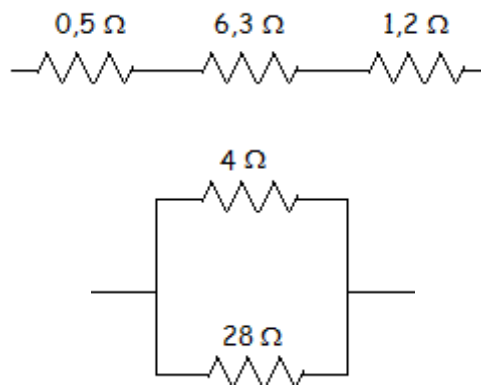
Jou Mirabent D, Llebot Rabagliati J, Pérez García C. Física para ciencias de la vida. 2º Edición. McGraw-Hill, 2009.

MacDonald DGG, Burns DM. Física para las Ciencias de la Vida y de la Salud. Bogotá, Fondo Educativo Interamericano, 1978.

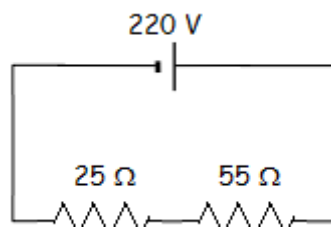
Lea - Burke-La naturaleza de la cosas. Ediciones Paraninfo. 2001.

## UNIDAD 5: Ejercicios de Electricidad

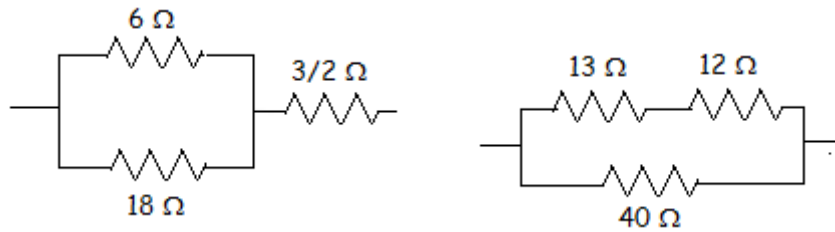
1. Cuando se disuelve sal de mesa en agua, el NaCl (cloruro de sodio) se disocia en dos partes, cada una cargada por igual: el ión cloruro con carga negativa y el ión sodio con carga positiva. ¿Cuánto vale la carga de cada uno medida en  $C$ ?
2. La fuerza eléctrica crece cuadráticamente al reducirse la distancia entre los cuerpos cargados. ¿Cuánto vale la fuerza con que se repelen dos protones a una distancia de  $10^{-15}$  m? (aproximadamente el diámetro del núcleo) ¿Cuánta tendrá que ser la fuerza nuclear para los protones se mantengan en el núcleo?
3. ¿Cuánto vale la intensidad del campo eléctrico en una membrana plasmática típica de un axón, si su espesor vale 5 nm y la diferencia de potencial 70 mV?
4. ¿A qué se debe la resistencia de los distintos materiales?
5. Se tienen dos cargas puntuales:  $q_1 = 5$  nC y  $q_2 = -5$  nC a una distancia de 1  $\mu$ m. Esquematizar las cargas y calcular la fuerza creada entre  $q_1$  y  $q_2$ .
6. Determinar el valor de la resistencia total ( $R_T$ ) del conjunto de resistencias siguientes:



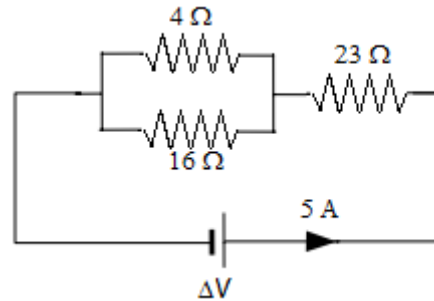
7. Aplicando la Ley de Ohm, determinar la intensidad de corriente ( $i$ ) que circula por el circuito siguiente



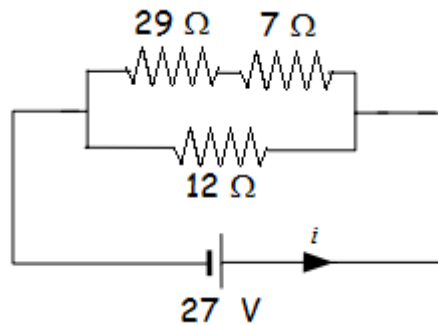
8. Determinar el valor de la resistencia equivalente de los siguientes circuitos:



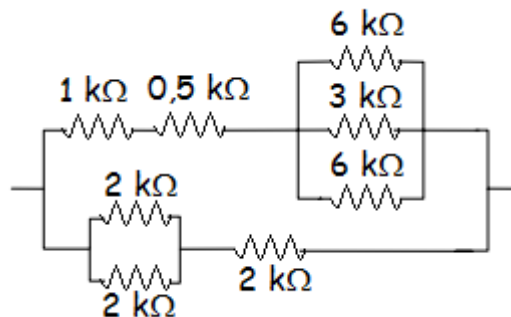
9. Dado el circuito de la figura, calcular el valor del voltaje aplicado ( $\Delta V$ )



10. Dado el circuito de la figura, calcular el valor de la intensidad de corriente ( $i$ )



11. Dado el circuito de la figura, calcular la resistencia equivalente



12. Un circuito eléctrico está formado por una lamparita cuya resistencia es de  $3 \Omega$  y está alimentada por una fuente de alimentación de  $6 \text{ V}$ . Calcular la potencia de la bombilla.

13. Calcular la potencia disipada en una resistencia de  $6 \Omega$  si la diferencia de potencial entre sus extremos es de  $50 \text{ V}$ .



14. Se diseña una resistencia de calefacción de 0,5 kW para funcionar a 220 V. ¿Cuál es su resistencia y qué corriente circulará por ella?

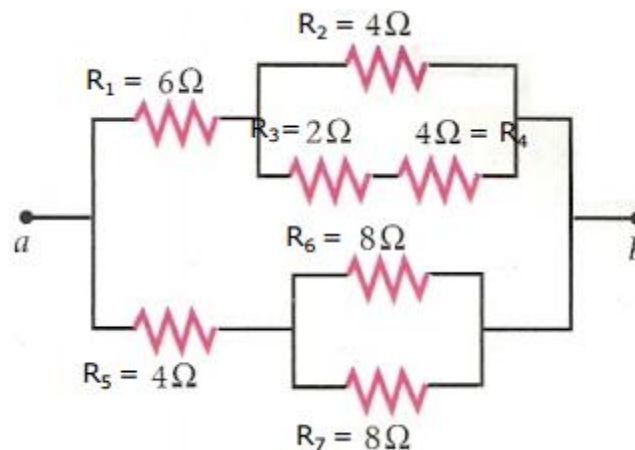
15. Un ventilador se conecta a una tensión de 220 V y consume una intensidad de 0,52 A. Calcular:

a. El valor de la resistencia del ventilador.

b. La potencia consumida en kW.

16. Dos alambres A y B de sección transversal circular están hechos del mismo metal y tienen igual longitud, pero la resistencia del alambre A es tres veces mayor que la del alambre B. ¿Cuál es la razón de las áreas de sus secciones transversales?

17. Hallar la resistencia equivalente entre los puntos a y b de la figura.



18. El tercer carril de una vía de tren está hecho de acero y tiene un área de sección transversal de aproximadamente  $55\ \text{cm}^2$ . ¿Cuál es la resistencia de 10 km de esta vía? ( $\rho = 10 \times 10^{-8}\ \Omega\text{m}$ ).

19. El período de un movimiento ondulatorio que se propaga por el eje de abscisas es de  $3 \times 10^{-3}\ \text{s}$ . La distancia entre dos puntos consecutivos cuya diferencia de fase es  $\pi/2$  es 30 cm. Calcular la longitud de onda y su velocidad de propagación.

20. La nota musical "La" tiene una frecuencia de 440 Hz. Si en el aire se propaga con una velocidad de 340 m/s y en el agua lo hace a 1400 m/s, calcule su longitud de onda en esos medios

21. Esquematice la amplitud en función del tiempo para una onda cuya  $\lambda$  es 10 cm y su amplitud máxima es 0,2 mm.

22. ¿Cuál es la velocidad de propagación y la longitud de onda de la luz amarilla del sodio en el aire ( $n = 1,00029$ ) si su frecuencia es de  $5,09 \times 10^{14}\ \text{Hz}$ ?