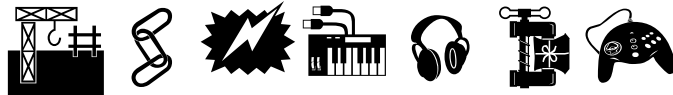


Publicación de Física II para *Diseño Industrial*



Electrodinámica: Tensión, Corriente y Resistencia

Ing. Cristian Alejo Zujew

INDICE:

De las chispas a las corrientes.....	2
Ley de Ohm.....	4
Resistencia eléctrica.....	4
Buscando Resistencias	5
Circuitos y Diagramas Eléctricos.....	6
Conexión de resistencias.....	7
Conexión en serie.....	7
Conexión en paralelo.....	7
Ejercicios de Ejemplo	8
Circuitos combinados	9
Conclusiones y advertencias.....	10
Leyes de Kirchoff.....	11
Nomenclatura Topológica.....	11
1ª Ley: Ley de Corrientes en los Nodos	11
2ª Ley: Ley de Tensiones en las mallas	12
Planteo del problema y ejemplo	12
Preparación psicológica del circuito	13
Anexo 1: Compendio de Definiciones	14
Anexo 2: Historia de descubrimientos.....	16
Bibliografía	16

De las chispas a las corrientes

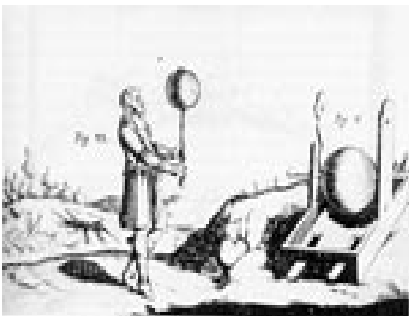
Las primeras noticias del descubrimiento de la electricidad se remontan al siglo VII a.C. cuando **Tales de Mileto** (640-548 a.C.), uno de los Siete Grandes Sabios de la antigua Grecia, estableció que al frotar un trozo de ámbar (resina fosilizada) con un paño, éste empezaba a atraer pequeñas partículas como hojas secas, plumas e hilos de tejido. Tales de Mileto creyó que esto se producía debido a un "espíritu" que se encontraba dentro del ámbar, al cual llamó **elektron** (que en griego significaba ámbar) y de ello se deriva la palabra electricidad.

A pesar de esta primera experiencia, ni la civilización Griega en su apogeo, ni Roma en su esplendor, ni siquiera el mundo feudal europeo, contribuyeron de manera significativa a la comprensión de la electricidad, del magnetismo, y mucho menos de la interactividad entre ambos fenómenos (llamado electromagnetismo). Es más: durante toda la edad media la ciencia cayó en una época oscura en la cual las creencias religiosas "la amordazaron de pies y manos".

Con el Renacimiento (s XVII) se produjo en Europa un cambio importante y las ciencias tomaron un nuevo impulso. En **1600 Guillermo Gilbert**, médico privado de la reina Elizabeth, tenía gran inquietud por el experimento de Mileto y realizó rudimentarios experimentos produciendo el primer estudio científico sobre el tema, que se convertirían luego en los antecedentes de la energía eléctrica. Gilbert publicó en latín un tratado titulado "De Magnete", sobre el magnetismo y las propiedades de atracción del ámbar.

Se sumaron a esto las observaciones del jesuita italiano Niccolo Cabeo, en 1629, quien determinó que los cuerpos cargados previamente por frotación, unas veces se atraían y otras se repelían.

Éste fue el punto de partida de la historia de la electricidad, cuyo estudio y desarrollo durante los siglos XVII y XVIII se limitó únicamente a los fenómenos electrostáticos.



Otto Von Guericke, (de Magdeburgo, inventor de la máquina neumática) construyó en **1660**, la primera máquina que generó una carga eléctrica. Esta era una gran bola de azufre atravesada de lado a lado por una varilla montada sobre dos ranuras, formando un eje. Con ayuda de una manivela y de una correa se le imprimía un rápido movimiento de rotación continuo que producía una carga muchísimo mayor a la del frotamiento ordinario. **Van deer Graff** mejoró esta máquina electrostática con el diseño actualmente conocido generando grandes cantidades de electricidad.

En 1707 Francis Hawkesbee construyó en Inglaterra una nueva máquina eléctrica de fricción perfeccionada: un globo de vidrio sustituía a la bola de azufre. Durante uno de sus experimentos, un tubo que contenía un poco de mercurio recibió una carga de la máquina eléctrica y produjo un chispazo que iluminó la habitación (producto de este descubrimiento son las lámparas de vapor de mercurio).

Uno de los problemas importantes a resolver era determinar cuántas clases de electricidad había y quien finalmente consiguió establecerlo fue **Francois de Cisternay Du Fay** en **1733**, quien tras realizar numerosos estudios sobre la electricidad, estableció que tan sólo había dos tipos de electricidad, la vítrea que se liberaba frotando el vidrio –que más adelante se asignará como positiva –y la resinosa liberada frotando ebonita –que corresponderá a la carga negativa.

Además de estos experimentos también observó que las electricidades del mismo tipo se repelían, mientras que las de distinto tipo se atraían. Sin embargo, aún los conocimientos sobre la electricidad no pasaban de fenómenos de laboratorio.



En **1745** El físico holandés **Pieter van Musschenbroek** descubre que un alambre conductor que atraviesa un corcho en el cuello de un frasco puede almacenar una carga eléctrica generada por una máquina de Van Deer Graff. El frasco (ver gráfico) se denomina "Frasco de Leyden" o "Botella de Leyden" llamado así en honor de la universidad belga en que fue creada.

La llamada **botella de Leyden** fue el primer condensador de la historia.

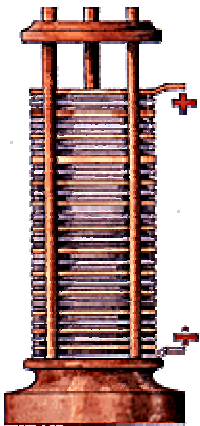
Con un frasco de Leyden en 1746, Jean Antoine Nollet, físico francés y tutor de la familia Real de Francia mandan una corriente eléctrica a través de 180 Guardias Reales durante una demostración ante el Rey Luis XV.

Mientras tanto en los Estados Unidos, en **1752**, aprovechando una tormenta, el científico **Benjamin Franklin** elevó una cometa provista de una fina punta metálica y de un largo hilo de seda, a cuyo extremo ató una llave. La punta metálica de la cometa consiguió captar la electricidad de la atmósfera, la cual produjo varias chispas en la llave. Con este experimento Franklin llegó a demostrar dos cosas: que la materia que compone el rayo es idéntica a la de la electricidad, y que un conductor terminado en forma aguda y de cierta longitud puede emplearse como descarga de seguridad de las nubes tormentosas. Estas conclusiones le sirvieron para inventar el pararrayos.

Aunque actualmente sabemos que la gran variedad de características que poseen los rayos impide garantizar la seguridad absoluta, pero la estadística señala que un edificio sin protección tiene 57 veces más probabilidades de ser alcanzado por una descarga.

Charles Coulomb en **1776**, utilizando una balanza de torsión para medir la fuerza entre cargas eléctricas, corroboró que dicha fuerza era proporcional al producto de las cargas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que separaba las cargas, este enunciado se conoció como **Ley de Coulomb**.

En **1780**, **Luis Galvani**, profesor de anatomía de la Universidad de Bolonia, Italia, realizó un experimento donde observó que las patas de una rana recién muerta se crispaban y pateaban al tocárselas con 2 barras de metales diferentes. Galvani atribuyó esto a una electricidad propia de los seres vivos, pensó que se trataba de una "electricidad animal" contenida en los músculos.



Alessandro Volta, científico e inventor italiano, basó sus estudios en los trabajos de su amigo Galvani y dedujo que entre los dos metales se creaba una corriente que detectaban los músculos. Siendo profesor de Física de la Universidad de Pavía, Italia, en **1793** demostró que la corriente eléctrica es engendrada por la combinación de dos metales diferentes y entonces la corriente eléctrica procedía de los metales y no de los tejidos animales (ahora sabemos que tanto Galvani como Volta tenían razón).

Para demostrar su teoría él desarrolla la pila voltaica en 1800 (una columna de discos de metal alternados - zinc con cobre o plata - separados por cartón empapado en salino; ver gráfico) que puede liberar una corriente constante de la electricidad. En honor a Volta y a su "Pila de Volta" se denominó a la diferencia de potencial suficiente para producir una corriente eléctrica como "voltio".

Los avances más importantes se han verificado a partir de esta invención, ya que el hombre pudo disponer por primera vez de una fuente continua de electricidad. Éste es el origen de la electrodinámica, con el que se abre todo un mundo de experiencias. Cualquier pila de las numerosas que hoy en día son de uso tan corriente, está basada en el mismo funcionamiento ideado por Volta.

El alemán **Georg Ohm** formuló en **1827** la famosa Ley que lleva su nombre, según la cual y dentro de un determinado circuito, la corriente es directamente proporcional a la tensión eléctrica.*

Pocos años después (**1831**) **Miguel Faraday** descubrió el Dinamo, es decir el generador eléctrico, cuando se dio cuenta de que un imán en movimiento, dentro de un disco de cobre, era capaz de producir electricidad. Hasta ese momento la controversia entorno a la fuente de electricidad voltaica estaba íntimamente ligada a la electrólisis. Pero Faraday desentrañó los problemas y creó la terminología fundamental: electrolito, electrólisis, ánodo, cátodo, ion, empleada hasta hoy.

El físico inglés **James Prescott Joule** y el alemán **Hermann Helmholtz** llegaron a demostrar que los circuitos eléctricos cumplían la ley de conservación de la energía y que por lo tanto la Electricidad era una forma de energía, **Ley de Joule**.

Otro alemán **Gustav Kirchoff** se dedicó al estudio de las propiedades de los circuitos eléctricos, enunciando en **1845** unas leyes conocidas como **Leyes de Kirchoff I y II** que veremos más adelante en este apunte.

En **1879** **Thomas Alva Edison**, inventó la lámpara incandescente, empleando filamentos de platino alimentados a sólo 10 voltios. Él mismo en 1882 instaló el primer sistema eléctrico para suministrar electricidad a la ciudad de Nueva York, con una potencia total de 30 Kw. Esto fue el despegue para el uso masivo de la energía eléctrica que continúa en nuestros días.

* La ley de Ohm es el objetivo básico de esta publicación y la ampliaremos más adelante.

Ley de Ohm

Nació el 16 de marzo de 1787 en Erlangen, Bavaria. Fue el mayor de los siete hijos de una familia de clase media baja. Mientras trabajaba en la cerrajería junto a su padre cursó estudios en la universidad de la ciudad. Más adelante sería profesor.

En 1825 todos los descubrimientos de la física hasta el momento preparaba el terreno para que alguien despierto uniera los cabos y revelara la secreta relación entre tensiones eléctricas y corrientes. Por un lado estaba la pila de Volta, por otro ya existía el galvanoscopio: un rudimentario artefacto armado entorno a una brújula que podía medir la intensidad de corriente que circulaba por un cable.

Con unas cuantas mediciones, una fuerte agilidad matemática e intuición experimental fue dando forma a su ley. Tuvo que reemplazar la pila de volta por una fuente de tensión más estable y de baja resistencia interna (fue la batería termoelectrica de Seebeck conocida como "Termocupla")

Así obtiene la relación existente entre intensidad de corriente y la diferencia de potencial. Ohm cuantifica esta relación como una proporcionalidad, en efecto sólo una constante vincula corriente y tensión en un circuito y esa constante es la resistencia eléctrica de forma que:

$$V = I \times R \quad \text{①}$$

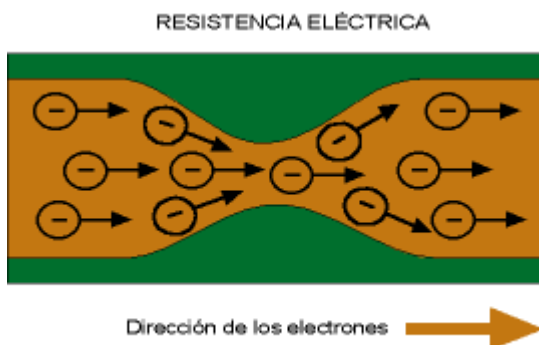
Donde V es la diferencia de potencial en Voltios de la fuente que alimenta al circuito, I es la corriente medida en amperes y R es la resistencia eléctrica conectada a la fuente.

Una ecuación increíblemente sencilla, demasiado, una verdadera afrenta para los físicos y matemáticos de su época que llevaban décadas tratando de encontrar la relación. A causa de esto sufrió durante mucho tiempo la reticencia de los medios científicos europeos y tuvo que esperar casi veinte años para que su hallazgo fuera definitivamente reconocido.

Resistencia eléctrica

La resistencia eléctrica es la propiedad por la cual un conductor se opone al paso de la corriente y se mide en ohms cuyo símbolo es la omega mayúscula: Ω . Efectivamente: si observamos la ecuación ① para una fuente de tensión V determinada si conectamos un conductor de baja resistencia circulará más corriente que con otro de resistencia elevada.

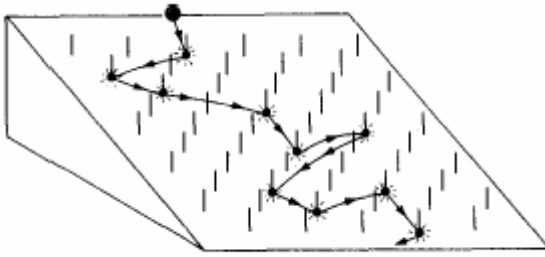
Hay diversas formas de hacer representaciones mentales de lo que significa una resistencia. Una de ellas es imaginar la circulación de electrones en un cable como la que ocurre con un fluido cualquiera en una cañería:



Una oposición típica al paso de líquido es una obstrucción en la sección del caño.

Cuanto más angosto sea el pasaje por la obstrucción mayor dificultad de circulación habrá.

Eléctricamente sería una mayor resistencia.



Otra forma de verlo es mediante el modelo mecánico.

Una pequeña bola se deja caer por una pendiente repleta de clavos.

La bolita desciende chocando contra los clavos y evidentemente se le dificulta el descenso. Ella representa el viaje del electrón por el conductor.

El electrón en su avance va colisionando contra los átomos de la estructura en la que viaja.

Una mayor pendiente sería equivalente a conectarle una batería de mayor potencial a la resistencia con lo que el movimiento sería más rápido aunque la resistencia sea la misma – recordemos que el movimiento del electrón, que en el modelo es la bolita, es corriente eléctrica.

De ambos modelos se desprende una serie de consecuencias lógicas muy importantes:

1. Cuanto menor sea la sección del conductor mayor será la resistencia eléctrica
2. Cuanto mayor sea la longitud que deben recorrer los electrones mayor será la resistencia.

En resumen la resistencia eléctrica tiene la ecuación:

$$R = \rho \times L / A$$

En donde ρ se llama resistividad del material medida en [$\Omega \cdot m$], L es la longitud en [m] y A es la sección en [m^2]

He aquí algunos valores de ρ en [$\Omega \cdot m$] para metales comunes:

Plata	$1,59 \times 10^{-8}$
Cobre	$1,67 \times 10^{-8}$
Oro	$2,35 \times 10^{-8}$
Aluminio	$2,66 \times 10^{-8}$
Níquel	$6,84 \times 10^{-8}$
Hierro	$9,71 \times 10^{-8}$
Platino	$10,6 \times 10^{-8}$
Plomo	$20,7 \times 10^{-8}$

Por ejemplo un alambre de plomo de un metro y de $1mm^2$ de sección tendrá:

$$R = 20,7 \times 10^{-8} / 0,000001 = 0,207 \Omega.$$

Buscando Resistencias

Hay varios caminos para proveerse de resistencias eléctricas en la práctica:

1. darle forma y cortar un trozo de metal
2. adquirir un alambre calibrado en negocios del ramo
3. comprar una resistencia eléctrica de las usadas en electrónica

Para la primera opción sólo hace falta conocer la resistividad de un material y maquinarlo.

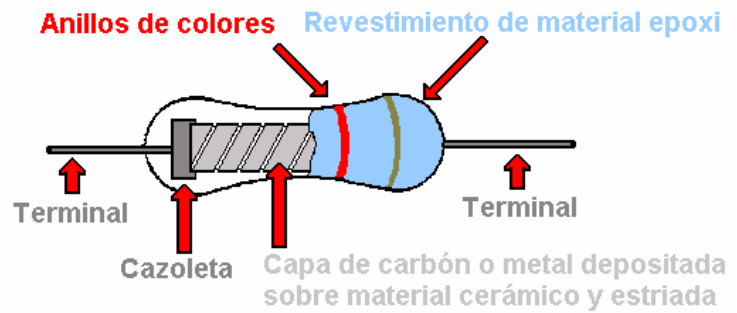
Para la segunda la resistividad por unidad de sección es dato del fabricante y sólo resta cortar el largo adecuado.

Para la tercera se requiere conocer el valor en ohms necesario y que exista en el mercado o bien conformarnos con el valor estándar más cercano.

Las resistencias comerciales están hechas sobre un sustrato aislante cerámico sobre el que se enrolla un alambre o deposita electrolíticamente un espesor apropiado de carbono y luego se revisten por protección y se imprime su valor en ohms. Resultando algo como esto:

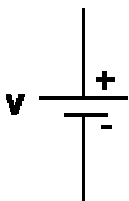
La representación codificada en anillos de colores para indicar cuanto vale una resistencia es un estándar industrial muy útil desde el momento que los anillos siempre van quedar visibles aunque se despinte un lado de la resistencia o quede oculto en el montaje.

En cambio un sencillo número impreso puede quedar oculto o borrarse perdiendo así la información.



Circuitos y Diagramas Eléctricos

Para trabajar cómodamente con la ley de ohm se representan los elementos mediante símbolos gráficos:



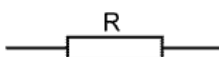
Una batería o fuente de Fuerza Electromotriz (FEM) se representa con dos líneas, una mayor que la otra.

Efectivamente una batería o FEM tiene dos bornes de conexión.

La línea mayor representa la conexión de mayor potencial o potencial positivo. La menor es la de menor potencial o potencial negativo.



Aquí dos de las representaciones más comunes para la resistencia eléctrica que vamos a encontrar en la mayoría de la bibliografía.

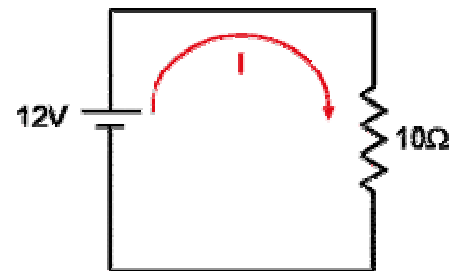


También tiene dos bornes de conexión indistintos y sin signo particular.

Entonces un circuito eléctrico elemental estará formado por una batería y una resistencia, por ejemplo: una fuente de tensión de 12Volts, una resistencia de 10 ohms quedan:

Los elementos mencionados se unen mediante líneas que representan conductores para formar un circuito.

Establecida la conexión entre los elementos se observa la característica de "circuito cerrado" que es indispensable para la circulación de corriente.

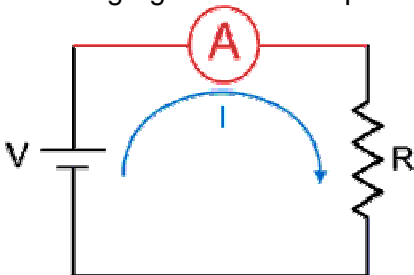


En nuestro ejemplo es establecerá una corriente: $I = 12V / 10\Omega = 1,2 A$

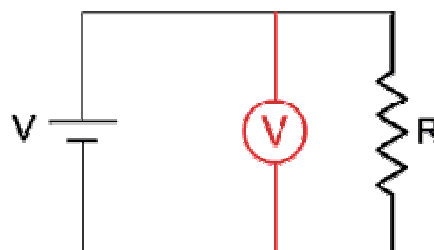
Otros elementos que se pueden conectar en un circuito son los instrumentos de medición.

Tenemos dos posibles: Amperímetros para medir corrientes o Voltímetros para medir tensión.

El diagrama quedaría así con el agregado de un amperímetro:



Y así con un voltímetro:



Nótese que el Amperímetro mide corrientes entonces el flujo de electrones debe hacerse pasa a través del instrumento. La única forma de hacer esto es intercalarlo en el circuito.

En cambio el voltímetro mide tensión y por lo tanto se conecta entre los puntos en donde se quiere tomar la diferencia de potencial.

Conexión de resistencias

Si todos los circuitos posibles serían como el que acabamos de ver la electricidad sería muy aburrida.

Por el contrario las resistencias se pueden vincular entre ellas formando dos patrones conocidos:

- Conexión en Serie
- Conexión en Paralelo

La conexión en serie implica conectar varias resistencias concatenadas una a continuación de la otra.

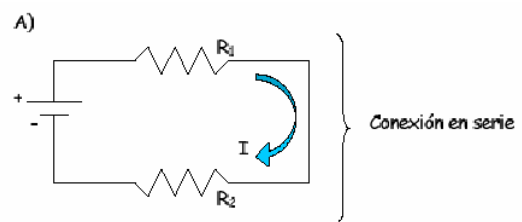
Conexión en serie

Por ejemplo conectemos en serie dos resistencias R1 y R2 a una misma fuente notando además que la fuente también queda en serie con estas.

En este caso el diagrama sería:

La conexión en serie arroja las siguientes conclusiones:

1. La corriente es la misma para cada elemento de la serie, esto incluye a todas las resistencias conectadas y también a la fuente.
2. La tensión de la fuente se reparte entre las resistencias de la serie. En efecto cada resistencia no ve el total de la tensión de la fuente sino una parte. Esa parte que le toca a una resistencia dada en un circuito se llama caída de tensión.
3. La suma de todas las caídas de tensión de cada resistencia es igual a la tensión de la fuente.
4. La resistencia equivalente total del circuito es igual a la suma de todas las resistencias que haya (en este caso $R_{tot} = R_1 + R_2$)



Conexión en paralelo

Ahora usemos R1 y R2 para el otro tipo de conexión: la conexión en paralelo

Ahora el diagrama queda como muestra la Fig. B:

Destaquemos también que la FEM también queda en paralelo.

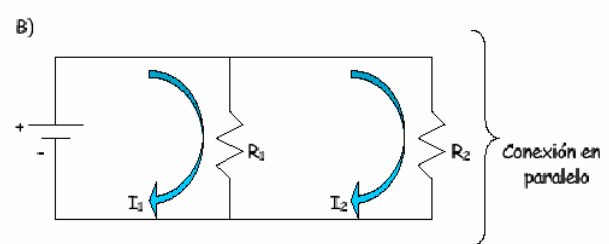
Y las conclusiones son:

1. Ahora la tensión en cada uno de los elementos que componen el sistema paralelo es la misma.
2. Las corrientes en cambio serán diferentes para cada uno de ellos.
3. Si sumamos todas las corrientes que circulan por cada resistencia conectada nos va a dar igual a la corriente que entrega +o que circula por -la FEM.
4. La resistencia equivalente total resultante de conectar "n" resistencias en paralelo es:

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

Para nuestro caso quedan sólo los términos con R1 y R2 y se pueden hacer algunas cuentas que nos llevan a:

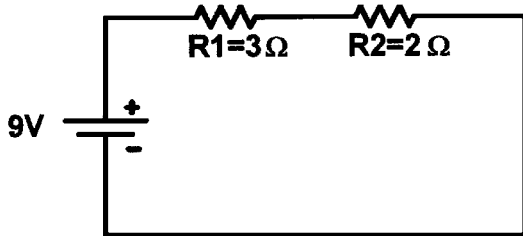
$$R_{tot} = \frac{R_1 \times R_2}{R_1 + R_2}$$



La demostración de esto se deja como ejercicio para el alumno y lo único que se necesita es aplicar la ley de ohm y tener en cuenta las conclusiones 1, 2 y 3.

Ejercicios de Ejemplo

Veamos como se utilizan estos criterios en algunos circuitos:



Ej1) En un circuito serie pasa la misma corriente por todos los elementos.

Para calcular esa corriente podemos usar la ley de ohm. Pero no hay una única resistencia conectada a la batería... son Dos.

Cada una de ellas no verá los 9V sino una parte.

Como las resistencias en serie se pueden sumar para

obtener una resistencia única equivalente tenemos $R_{tot} = 5\Omega$

Ahora sí hemos fusionado ambas resistencias en una sola de 5Ω y por lo tanto nos queda una batería y una resistencia. Por ohm:

$$I = V / R = 9V / 5\Omega = 1,8 \text{ A}$$

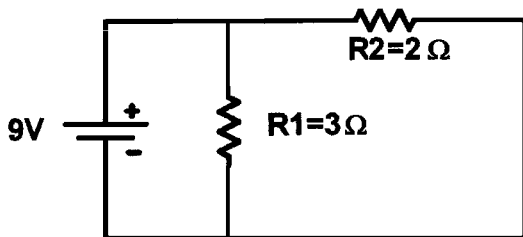
Ahora sabemos que la corriente por la batería, por R1 y por R2 es de 1,8 Amperes.

¿Podemos saber que tensión tiene cada resistencia? Por supuesto: basta con aplicar la ley de ohm otra vez pero a cada una por separado y con la misma corriente:

$$V_{R1} = I \times R1 = 1,8A \times 3\Omega = 5,4V$$

$$V_{R2} = I \times R2 = 1,8A \times 2\Omega = 3,6V$$

Y se verifica, si sumamos ambas tensiones que obtenemos los 9V. Resaltamos y repetimos que en un circuito serie la corriente es la misma y la tensión de la fuente se reparte.



Ej2) Más allá de la forma de este dibujo debe quedar claro que se trata de un circuito paralelo.

La diferencia fundamental es que ahora todos los elementos se unen en un par de puntos comunes, y esto incluye a la batería. Por lo tanto todos los integrantes del paralelo verán la misma tensión: la tensión de la batería.

Sin embargo cada uno de los elementos del paralelo

tendrá una corriente distinta. A saber:

$$\text{Para } R1 \text{ será: } I = V / R = 9V / 3\Omega = 3 \text{ A}$$

$$\text{Para } R2 \text{ será: } I = V / R = 9V / 2\Omega = 4,5 \text{ A}$$

Y para la fuente, que es el único elemento que entrega energía, la corriente será:

$$I = 3A + 4,5A = 7,5A$$

Hay un camino alternativo para conocer esta corriente. Podemos reemplazar ambas resistencias del paralelo por:

$$R_{tot} = \frac{R1 \times R2}{R1 + R2} = \frac{6}{5} = 1,2\Omega$$

R_{tot} es una única resistencia equivalente o resultante de las otras dos conectadas en paralelo. Por lo tanto queda una fuente de FEM y una resistencia con lo que la corriente es:

$$I = V / R = 9V / 1,2\Omega = 7,5A$$

El mismo resultado, por supuesto.

Recordemos que en un circuito paralelo todos los elementos ven la misma tensión y cada uno tendrá su propia corriente. La de la fuente es, simplemente, la suma de las corrientes que circulan por las resistencias en paralelo conectadas.

Circuitos combinados

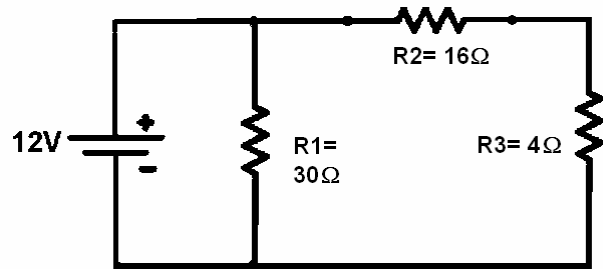
Tendríamos mucha suerte si todos los ejercicios por hacer fueran como los vistos hasta ahora. Existen circuitos combinados o mixtos en donde se pone en juego la astucia del que los resuelve. Por ejemplo:

Ej3) Ahora vemos R1 en paralelo con la fuente. Pero para R2 y R3 no es así por que están en serie entre ellas.

Ahora si en lugar de R2 y R3 ponemos una equivalente de ambas entonces si volvemos a tener un paralelo como el del último ejercicio.

La equivalente de R2 y R3 es 20Ω que es lo que ponemos en paralelo con la de 30Ω .

Por R1 circulan $0,4A$ ($=12/30$) y por R2+R3 son $0,6A$ ($=12/20$).



La corriente por la batería es $1A$ ($0,4+0,6$) y las tensiones en las resistencias son:

Para R1 tenemos $12V$ por estar en paralelo con la fuente.

En R2 no está en paralelo con la fuente, será:

$$VR2 = I \times R2 = 0,6A \times 16\Omega = 9,6V$$

Algo similar ocurre con R3

$$VR3 = I \times R3 = 0,6A \times 4\Omega = 2,4V$$

La corriente es la misma en R2 y R3 por que ellas están en serie entre sí, además se reparten la tensión de la fuente en distintas porciones.

Veamos otro

El siguiente ejercicio lo haremos sin cálculos para reforzar los criterios de resolución

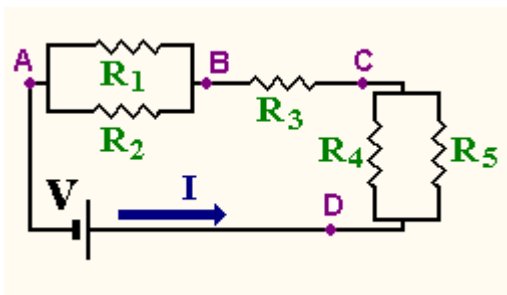


Fig 1

Aquí la batería la tenemos abajo.

En un vistazo global agrupamos las conexiones del mismo tipo: las de elementos en paralelo y la de elementos en serie (el dibujo ayuda bastante).

A estos elementos con el mismo tipo de conexión los llamamos grupos o bloques. Se señalaron con letras los puntos inicio y fin de cada grupo.

Al notar que R1 está en paralelo con R2 entre los puntos A y B ya podemos resolver...

Y la llamamos R_{AB} siendo la equivalente que reemplaza al primer paralelo encontrado.

Recordemos –o acentuemos ahora –que al reemplazar un grupo por su equivalente para el resto del circuito no cambia nada. Para ver esto en el ejemplo podemos decir que I seguirá siendo la misma para la Fig. 1 y para la Fig. 2. Exactamente lo mismo sucede con la caída de tensión entre A y B: será la misma para ambas figuras.

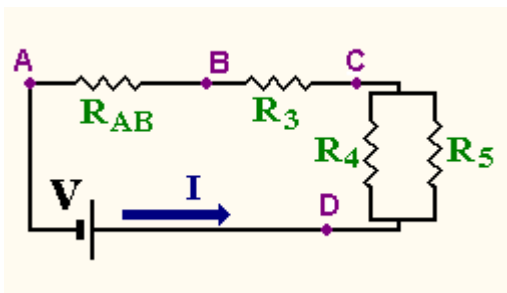


Fig. 2

Ahora podemos resolver también R4 y R5.

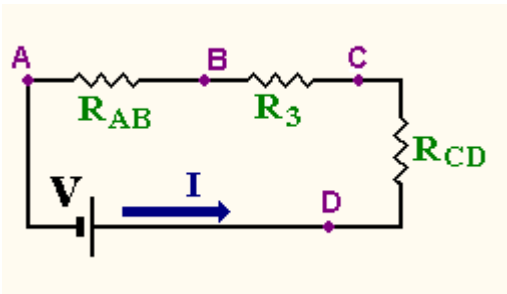


Fig. 3

Que llamamos R_{CD} para seguir el mismo criterio.

I continúa siendo la misma.

Ahora que hemos reemplazado los sistemas en paralelo vemos que todo se ha condensado a tres resistencias en serie.

Hasta ahora no hicimos nada con R_3 y la tensión en R_3 –o entre los puntos B y C que es lo mismo –ha sido desde el principio del ejercicio $V_{R3} = I \times R_3$

Conclusiones y advertencias

De los ejemplos vistos podemos concluir:

1. Reemplazar un grupo o bloque por su resistencia equivalente no afecta la electrodinámica del resto del circuito.
2. Si tenemos un bloque paralelo en serie con otros elementos habrá que resolver primero el paralelo (Ver fig. 4).
3. Si tenemos grupos o bloques serie que además están en paralelo con otros elementos primero hay que resolver la serie (Ver fig 5).
4. Una vez que se ha condensado todo el circuito a su mínima expresión –una batería y una resistencia – se podrá calcular la corriente de la fuente y habrá que recorrer los diagramas hacia atrás para expandir ese resultado hasta llegar a determinar las situaciones individuales de las resistencias que se “perdieron” dentro de los equivalentes obtenidos.

En el diagrama de la derecha tenemos el grupo R_4 / R_5 que está en paralelo. Ese bloque además está en serie con R_3 .

En un acto apresurado alguien podría calcular un equivalente usando R_3 en serie con R_4 –o con R_5 –

Sin embargo esto no es posible por que R_4 no está sola sino que tiene vinculada borne a borne a la resistencia R_5 .

Entonces primero habrá que resolver el paralelo del bloque y luego la serie $R_3 + R_{CD}$.

De la misma manera vemos en la fig. 5 una versión modificada de la anterior.

Ahora no se puede considerar a R_3 en paralelo con R_5 o a R_4 en paralelo con R_5 .

Lo correcto es pensar a R_5 en paralelo con R_3 y R_4 al mismo tiempo.

O sea: hay que resolver la serie R_3 / R_4 primero.

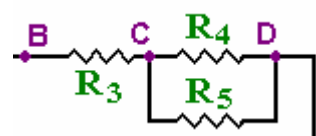


Fig. 4

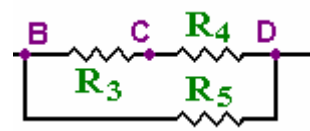


Fig. 5

Leyes de Kirchoff

Si bien está claro que haciendo series y paralelos se pueden resolver muchas situaciones esto no es posible cuando hay más de una fuente en el mismo circuito por que las corrientes dependerán ahora de más de un elemento de FEM.

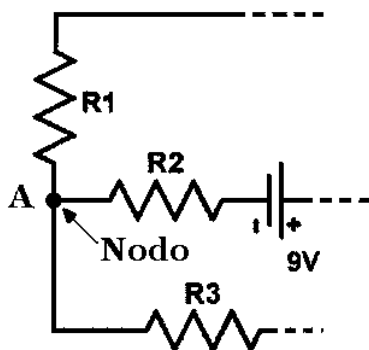
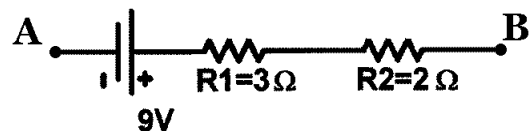
No se puede resolver una cosa así sencillamente sino que habrá que establecer un sistema de ecuaciones con incógnitas.

El método que se utiliza para armar el sistema de ecuaciones son las leyes de Kirchoff.

Antes de embarcarnos en las leyes propiamente dichas debemos ponernos de acuerdo en cierta nomenclatura que hace a la topología de los circuitos.

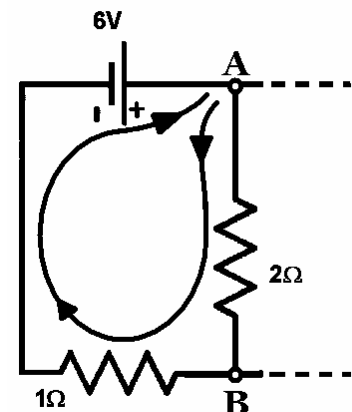
Nomenclatura Topológica

Ramas: Una rama está compuesta por elementos únicos (batería o resistencia) o bien por bloques de elementos en serie que vinculan dos nodos (ver→)



Nodos: Son aquellos puntos del circuito en donde confluyen o se vinculan más de dos ramas. Resaltamos “más de dos”.

De esta forma podemos decir que en los nodos se rompe la conexión en serie que llevaban las ramas para transformarse en sistemas en paralelo – o ramas en paralelo (véase la figura de ejemplo)



Mallas: las mallas son circuitos cerrados de componentes.

Se construyen a partir de un nodo que se toma como “salida”, se recorren diversas ramas a elección a partir de él formando un camino que se concluye al volver a llegar al nodo de partida. Esto produce un circuito cerrado.

En el gráfico partimos del nodo A eligiendo un sentido de circulación (horario) pasamos por la resistencia de 2 ohms, luego por la de 1 ohm, por la batería de 6V y retornamos al punto A definiendo completamente toda la malla.

1ª Ley: Ley de Corrientes en los Nodos

La suma algebraica de todas las corrientes vinculadas a un nodo es igual a cero.

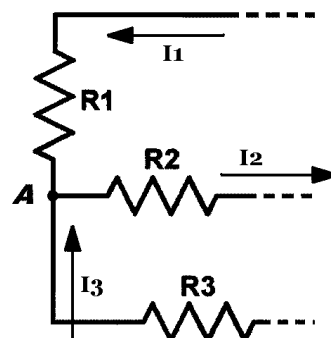
Para producir una suma algebraica debemos darle signo a dichas corrientes. Lo usual es darle signo positivo a las corrientes que entran al nodo y signo negativo a las que salen.

Entonces supongamos la situación del gráfico:

Aquí se muestra un fragmento de un circuito más complejo del que hemos extraído la situación de uno de los nodos: el nodo A.

Aplicando la ley de Kirchoff que acabamos de enunciar obtenemos la suma de corrientes en el nodo A:

$$\sum_A I = I_1 - I_2 + I_3 = 0$$



2ª Ley: Ley de Tensiones en las mallas

La suma algebraica de todas las tensiones en el trayecto cerrado de una malla es igual a cero.

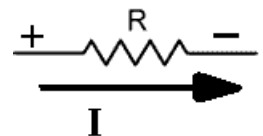
$$\sum_M V = 0$$

Otra vez nos enfrentamos a la situación que implica la palabra “algebraica” y ahora el problema es: ¿Cómo darle signos a las tensiones en una malla?

Para las fuentes de tensión o FEM es sencillo por que ellas conllevan un signo implícito.

Pero con las resistencias no es tan inmediato. Habrá que remontarse primero al concepto de caída de tensión. Recordando esto notamos que las resistencias tienen mayor tensión a su entrada que a su salida.

¿Entrada y salida? Pues obviamente estamos hablando de la corriente. Esto es así por que las resistencias tienen mayor potencial por la conexión por donde entra la corriente y marcaremos ese punto con un signo “+”. El otro extremo será “-” de la forma que muestra el gráfico.



Planteo del problema y ejemplo

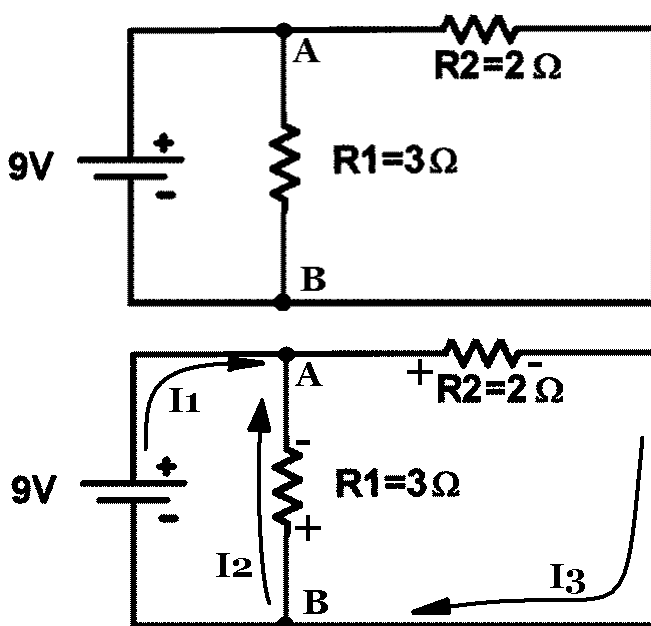
Antes que nada debemos aclarar que las leyes de Kirchoff son generales en electrotecnia. Esto significa que son consistentes y no se contradicen con ninguna otra ley de circuitos.

Entonces ¿Qué vamos a resolver concretamente con Kirchoff? Respuesta: se puede resolver cualquier situación. Sin embargo el caso típico que cae en manos de este método consta de varias baterías en un entramado complejo de unas cuantas ramas y mallas.

Por lo general los valores de baterías y resistencias son los datos ofrecidos y se desconocen las corrientes, pero hay que destacar que es sólo el caso más común, no excluye que haya FEMs o resistencias cuyo valor se ignore.

En cualquier caso la única condición que debe cumplirse es que las incógnitas no superen en número a las ecuaciones que se pueden conformar a partir de Kirchoff.

Para demostrar la generalidad del método y además tomar un ejemplo de partida hagamos uno de los circuitos de la página 8 nuevamente:



Ya se han marcado los nodos y se aprecian además tres ramas de un único elemento cada una.

-Como anunciamos el circuito típico para resolver de los valores de resistencias y fuentes.

No se saben los valores de las corrientes ni cual es el sentido de recorrido pero se asignará una corriente incógnita por rama.

El sentido que se dará a cada corriente no tiene ninguna importancia, pero es fundamental darle uno por que ni bien se haga esto los signos de las caídas de tensión en las resistencias quedan establecidos.

Por último se forman las mallas haciendo, como dijimos, circuitos cerrados.

Entonces llegó la hora de aplicar las leyes pero agregamos una salvedad: las ecuaciones que se pueden formar con Kirchoff son redundantes así que de todas las ecuaciones de nodo que se pueden hacer aplicando la primera ley descartamos una y hacemos lo mismo con las de malla.

Esto significa que si tenemos dos nodos A y B –como en el ejemplo –uno de los dos no lo incluimos en la ley. Así nos queda un solo nodo para elegir... tomemos el A y hacemos:

$$\sum_A I = I_1 + I_2 - I_3 = 0 \Rightarrow I_1 + I_2 = I_3 \quad \textcircled{1}$$

Dejamos para el alumno el trabajo de contar todas las mallas posibles en el circuito y sólo decimos que tomaremos dos y las recorreremos en sentido horario (otra vez debemos elegir algo: en este caso la forma en que recorremos las mallas, y nuevamente es indistinto). Les pusimos letras griegas para diferenciarlas.

Teniendo en mente que vamos a sumar tensiones recorreremos la malla α .

Partimos de un nodo cualquiera, digamos el A, y en sentido horario encontramos a R1.

En R1 pasamos de “-“ a “+” ganando una tensión igual a $+I_2 \times R1$.

Luego encontramos a la batería y también pasamos de “-“ a “+” ganando 9 volts. La ecuación de Kirchoff para la malla α queda:

$$\sum_M V = 0 \Rightarrow +I_2 \cdot R1 + V = 0 \Rightarrow 3 \cdot I_2 + 9 = 0 \quad \textcircled{2}$$

Notemos ahora que en la malla β tanto a R2 como a R1 las recorreremos pasando de “+” a “-“

$$\sum_M V = 0 \Rightarrow -I_3 \cdot R2 - I_2 \cdot R1 = 0 \Rightarrow -2 \cdot I_3 - 3 \cdot I_2 = 0 \quad \textcircled{3}$$

Y hemos llegado hasta aquí con tres ecuaciones y tres incógnitas que son las corrientes I_1 , I_2 e I_3 .

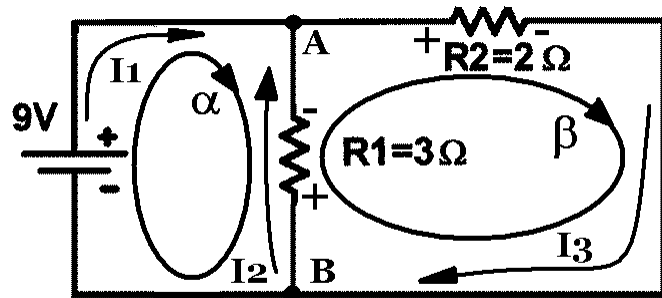
El resto es usar cualquier estrategia para resolver el sistema de ecuaciones.

De todos modos ya se ve en la segunda ecuación que $I_2 = -3A$

Si reemplazamos este valor en la última ecuación sacamos $I_3 = 4,5A$

Reemplazando I_2 e I_3 en la primera sale $I_1 = 7,5A$

El signo menos de I_2 sólo significa que la hemos elegido al revés pero no habrá que recalcular ni tocar nada. El ejercicio está bien resuelto aunque den algunas corrientes negativas.



Preparación psicológica del circuito

Enumeramos los pasos para resolver bien un circuito por Kirchoff:

1. Identificar la topología. O sea: buscar nodos, ramas y mallas.
2. Asignar a cada rama una corriente distinta con un sentido de circulación a gusto pero que una vez elegido no cambiaremos más en todo el ejercicio.
3. Para evitar confusiones a partir de las corrientes les pondremos signos a las caídas de tensión en las resistencias recordando que son positivas en la “pata” por la que entra la corriente.
4. Luego se armarán mallas descartando una de todas las posibles. A estas mallas se les dará un sentido de circulación que será antojadizo pero lo respetaremos hasta el final.
5. Aplicamos la primera ley de Kirchoff
6. Aplicamos la segunda ley de Kirchoff.

Anexo 1: Compendio de Definiciones

La **corriente eléctrica** está formada por cargas eléctricas en movimiento. Normalmente estas cargas eléctricas son electrones. Esta corriente, su transporte y su consumo dependen de una serie de características que pueden variar. Estas características las exponemos a continuación:

Intensidad:

Es la cantidad de cargas que pasan por un punto determinado en un segundo. Se mide en **amperios (A)**, unidad que recibe el nombre del científico francés André-Marie **Ampère** (1775-1836). Un amperio equivale a algo más de 6 trillones ($6,25 \times 10^{18}$) de electrones por segundo.

Voltage:

Mide la fuerza con que son empujadas las cargas eléctricas a través del conductor. Se mide en **voltios (V)**, unidad que tiene ese nombre en honor a Alessandro **Volta**

Potencia:

Mide la energía eléctrica que se desarrolla en un segundo. Esta es una característica de los aparatos que utilizan la electricidad y nos indica cuanto consumen. El consumo total depende, naturalmente, del tiempo que esté el aparato encendido. La potencia se mide en **vattios** o **watts (W)**, nombre dado por el ingeniero y mecánico escocés James **Watt***. Un vatio equivale a la energía de un julio –o joule –gastado en un segundo.

Resistencia:

Fenómeno por el cual un material conductor (cable, alambre, varilla, etc.) se opone al paso de la corriente eléctrica, convirtiendo algo de energía eléctrica en calor. Por ejemplo: una lámpara incandescente supone una resistencia.

La resistencia se mide en **ohmios** (representado por la letra griega omega mayúscula). El nombre de esta unidad se dio en honor del físico alemán Georg **Ohm**.

Un ohmio puede definirse como la resistencia de un conductor que, recorrido por una corriente de 1 amperio, tiene un potencial en sus extremos de un volt y emite una potencia de 1 vatio en forma de calor.

Conductividad:

La **conductividad** es una propiedad que mide la facilidad de la materia para permitir el paso de una corriente eléctrica y es la inversa de la resistencia. Según esta propiedad, podemos clasificar los materiales en:

Conductores: En estos materiales existen algunos electrones que no están ligados a átomos particulares sino que se pueden mover por todo el material y son llamados electrones de conducción. En el cobre (Cu), por ejemplo, hay aproximadamente un electrón de ese tipo por cada átomo. En general, los metales son buenos conductores y dentro de estos el oro (Au) y la plata (Ag) son mejores que el cobre pero en la inmensa mayoría de los casos (cables, circuitos...) se usa el cobre por ser más barato.

Aislantes: Cuando los electrones de un cuerpo se hallan fuertemente ligados a sus átomos es muy difícil que conduzcan electricidad. Son aislantes el plástico, la madera, el cristal, el aire... No obstante, todos los materiales pueden ser conductores si el voltaje es suficientemente alto. Por ejemplo, durante las tormentas se acumula una gran carga eléctrica en las nubes que puede ser conducida a través del aire provocando los relámpagos y los rayos.

* James **Watt** (1736-1819) inventó la máquina de vapor y definió una unidad para medir su potencia: El caballo de vapor. Por aquel entonces los trabajos duros utilizaban caballos. Para poder vender sus máquinas, Watt midió el trabajo que realizaba un caballo típico durante un período grande de tiempo y luego calibró sus máquinas de acuerdo con ello. Así, pudo decirle a su clientela que una máquina de un caballo de vapor reemplazaría a un caballo real.

Semiconductores: Son materiales conductores pero que en estado natural ofrecen bastante resistencia al paso de una corriente eléctrica, es decir, tienen muy pocos electrones de conducción. Por ejemplo, el silicio (Si) y el germanio (Ge). El silicio puede transportar una millonésima parte de la corriente que puede transportar el cobre.

Sin embargo los semiconductores tienen una propiedad muy particular: si se recibe una dosis extra de energía exterior se convierte en conductor, es más, cuanto mayor energía más conducen. La energía externa puede ser un voltaje (transistores, diodos, etc), calor (termistores), presión (piezoeléctricos), luz (fotorresistencias, fotodiodos, fototransistores, etc), etc.

Gracias a los semiconductores se han podido construir elementos electrónicos tales como los diodos o los transistores que han permitido el avance de esta tecnología hasta los modernos ordenadores. Pensemos que en un microchip de pocos cm^2 puede haber millones de transistores. El microchip fue inventado por el norteamericano Jack Kilby en 1959. Afortunadamente para todos, el silicio es un elemento bastante abundante en la Naturaleza: Casi todas las playas de arena tienen grandes cantidades de este útil elemento.

Superconductores: Son materiales que transportan la electricidad sin casi pérdida de energía (sin calentarse). Este comportamiento se observa con mayor facilidad cuanto menor sea la temperatura. Por ejemplo, los primeros superconductores tenían que utilizarse en un baño de helio (He) líquido a 4 grados kelvin (4 grados por encima del cero absoluto). Conseguir materiales superconductores (o similares) a temperatura ambiente es uno de los logros de la física que aún no se han conseguido. Se han encontrado materiales superconductores a más de 100 grados kelvin utilizando un baño de nitrógeno (N) líquido (más barato que el helio), pero son cerámicas quebradizas y con bastantes inconvenientes.

Anexo 2: Historia de descubrimientos

Parece que a principios del 1800 (tal vez un poco antes con Franklin) se despertó una especie de afán o impulso (por no decir demencia) por descubrir artefactos raros, generalmente vinculados a fenómenos eléctricos o magnéticos o ambos a la vez, siendo algunos realmente contributivos e importantes para comprender nuevos aspectos del fenómeno, pero otros quedaron como rarezas algunas olvidadas y otras aún citadas en la bibliografía de estudio de la física.

En una especie de compendio se describen someramente algunos de los experimentos e invenciones raras más destacadas:

<i>Pila voltaica</i> 1800	El año 1800 fue crucial en el desarrollo del electromagnetismo, pues es el año en el que se descubrió la corriente eléctrica. Volta lo hizo posible gracias a la pila que lleva su nombre.
<i>Electroscopio condensador de Volta</i> 1840-1860	El electroscopio de Volta, de gran importancia en la historia de la electricidad, se trata de un dispositivo utilizado para estudiar los mecanismos de adquisición de carga eléctrica en los distintos cuerpos.
<i>Granizo eléctrico</i> 1780-1800	En el granizo eléctrico observamos cómo la conexión de dos placas metálicas a una diferencia de potencial causa el revoloteo de unas pequeñas bolitas de médula de saúco.
<i>Campanario eléctrico</i> 1835-1860	El campanario eléctrico se vale de un efecto similar al anterior para hacer que dos bolitas golpeen una campana en un proceso continuo de carga-repulsión/descarga-atracción.
<i>Efecto eléctrico en puntas</i> 1780-1820	El efecto eléctrico en puntas demuestra la acumulación de cargas en los extremos de los objetos metálicos, lo que ocasiona el giro de las aspas al ionizar el aire de su entorno. Esto es lo que luego se utilizó como concepto en los pararrayos.
<i>Botella de Leiden</i> 1850-1860	Para almacenar la electricidad producida por estas máquinas se contaba con las botellas de Leiden, cuya forma varió a lo largo del tiempo.
<i>Condensador de Aepinus</i> 1840-1850	Otro sistema de almacenamiento de carga eléctrica era el condensador de Aepinus.
<i>Taladratarjetas</i> 1860-1880	El taladratarjetas: se colocaba un naipe o una tarjeta entre los dos conductores, de manera que al saltar la chispa, la tarjeta quedaba taladrada;
<i>Galvanómetro de Deprez-D'Arsonval</i> 1882-1910	Es el primer galvanómetro comercial y el más difundido de la historia, el ángulo de desviación está relacionado con la intensidad de la corriente con una muy alta exactitud.

Bibliografía

1. *Física*, Tipler, vol. II, 3ra edición, Reverté, Barcelona, 1994.-
2. *Fundamentos de Electricidad y Magnetismo*, Kip, McGraw Hill, México, D.F., 1972.
3. *Física*, Tomo I, Halliday - Resnick - Krane, Addison-Wesley Iberoamericana, 1980.-
4. *Física Universitaria*, Sears - Zemansky - Young, Addison-Wesley Iberoamericana.-
5. *Física Conceptos y Aplicaciones*, Tippens Mc. Graw Hill.-