

ELECTRICIDAD I

Prefacio

La electricidad es una rama de la física menos intuitiva que la mecánica o la óptica. De éstas tenemos una vivencia cotidiana y permanente. En cambio, la electricidad nos sirve silenciosamente. En general no se ve y sólo a veces se siente. Los experimentos con electricidad son generalmente delicados y poco espectaculares. Solamente la Naturaleza nos muestra fenómenos eléctricos imponentes y a veces devastadores.

Las leyes fundamentales de la electricidad no son más complicadas que las de la mecánica y seguramente más simples que las de la hidráulica o la termodinámica. Por este motivo propongo a mis queridos alumnos que aborden su estudio con la seguridad de que se trata de algo no demasiado difícil, palabra de profesor.

Espero que esta obra complemente los muchos y buenos libros de física y a las notas que toman de las clases explicativas. No se imaginan las veces que fueron corregidos y depurados de erratas. Pero los errores son como los piojos o las cucarachas: siempre hay alguno más escondido... Así que si lo encuentran corrijánlo y avísenme.

A.L.Dini - Abril de 1999

Prefacio a la edición electrónica del 2004

Se ha revisado íntegramente la obra, corrigiendo algunas erratas y agregando algunos párrafos. A.L.Dini - Octubre de 2004

INDICE TEMÁTICO

INDICE TEMÁTICO	1
GENERALIDADES	a
ELECTROSTÁTICA (Electricidad en reposo)	1
Electrización y Carga Eléctrica	1
Electroscopio	1
Distribución de cargas elementales en cuerpos conductores y aisladores:	1
Campo eléctrico y fuerza	2
Líneas de fuerza y superficies equipotenciales	2
Potencial eléctrico	2
Leyes de Newton y Coulomb:	3
TABLA COMPARATIVA ENTRE GRAVITACIÓN Y ELECTRICIDAD	3
Péndulo eléctrico	3
Desplazamiento Eléctrico	3
La ley de la inversa del cuadrado de la distancia	4
Flujo	4
El campo conservativo	4
Flujo del campo E alrededor de una carga Q - Ley de Gauss	4
Campo en la superficie de un cuerpo uniformemente cargado	5
Circulación de un vector:	5
Energía asociada a un campo eléctrico	5
Capacidad eléctrica	5
Cálculo de la capacidad de un condensador plano.....	6
CONSTANTES DIELECTRICAS DE DIVERSAS SUSTANCIAS.....	6
Condensadores eléctricos	7
CARGAS EN MOVIMIENTO	8
CORRIENTE ELÉCTRICA	8
Generalidades	8
Corriente eléctrica en un conductor . Ley de OHM	8
Resistencias específicas de algunos materiales en $[\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}]$ a 15°C	9

Dependencia de la conductividad de los metales con la temperatura – Superconductividad.....	9
Movimiento de cargas en líquidos conductores.....	10
Electrólisis de la salmuera.....	10
Ley de Faraday	10
Potenciales de contacto entre conductores sólidos	10
Efecto Volta	10
Efecto Seebeck	11
Efecto Peltier.....	11
Termodinámica de la conducción eléctrica - Efecto Thomson	11
Generadores termoelectrónicos - Termocuplas	11
Generadores electroquímicos	12
Celdas de combustible	13
Semiconductores.....	13
Generalidades	13
Estructura de un semiconductor.....	13
Unión PN	14
Conducción eléctrica en gases	14
Generalidades	14
Modelo.....	14
Plasma.....	15
Circuitos eléctricos: su representación con elementos eléctricos puros	15
Resistencias en serie y en paralelo.....	16
Resolución de un circuito con ramas en serie y en paralelo.....	16
Circuito “puente” de Wheatstone.....	17
Medida de resistencias con voltímetro y amperímetro.....	17
Energía y potencia asociada a una corriente eléctrica	17
<i>ELECTRICIDAD ATMOSFÉRICA</i>	<i>18</i>

GENERALIDADES

El modelo físico: Para explicar y predecir el comportamiento de los sistemas físicos, se emplean **imágenes** de sistemas mejor conocidos que se rigen con **leyes similares** dentro de ciertos límites: se llaman **modelos**. Dos o más sistemas físicos con leyes similares determinan una **analogía**. El estudio de la electricidad se apoya en modelos y analogías geométricas, hidráulicas y mecánicas, que presentan fenómenos más conocidos con leyes idénticas a las eléctricas. Así se consideran a las dos clases de electricidad como dos **fluidos eléctricos** cuyo desbalance sobre un cuerpo produce el efecto de **carga neta** de signo positivo o negativo. Esa carga crea una **fuerza a distancia** análoga a la de gravitación (analogía mecánica). Los cuerpos cargados se comportan alterando las propiedades del espacio de la misma manera que un terreno se ve afectado por el relieve: los niveles y las pendientes tienen sus sosías eléctricos que se llaman potencial y campo (analogía topográfica). El **campo eléctrico** fluye de las cargas positivas y se suma en las negativas, como el agua en una pileta (otra vez la hidráulica). La **corriente eléctrica** en un cable es un fluido mejor educado que el agua en un caño: aquél cumple una ley lineal mientras que el agua nos complica la vida con una ley cuadrática.

¿Cuál es el modelo más acertado? : El que más nos convenga y nos aclare las cosas. Algunos físicos que saben mucho de electricidad estudian hidráulica con modelos eléctricos, que les resultan más familiares que la propia hidráulica. Nosotros en cambio haremos lo opuesto ya que conocemos algo de hidráulica y muy poco de electricidad (por ahora).

La forma: De tanto trabajar con modelos, los físicos se han ido acostumbrando a abstraer de la realidad el modelo por excelencia: el modelo matemático: la ecuación, la ley, la fórmula o sencillamente **la forma**. Al estudio de la forma se llega buscando leyes que reproduzcan lo mejor posible los resultados experimentales y comparándolas con las que rigen otros fenómenos aún de otras ciencias. Reconocer leyes iguales que rijan a diferentes fenómenos sin conexión aparente entre sí, abre el camino a logros impensados como el que unificó óptica y electricidad, mostró que la energía era discontinua como la materia, predijo que una partícula puede difractarse como la luz y relacionó un botellón de gas con un bolillero de lotería.

La física de hoy suma a sus herramientas tradicionales tales como la experimentación y la formulación de modelos, el estudio de las formas, que permiten intuir potentes hipótesis unificadoras. Una mejor manera de entender y apreciar la obra del Creador.

ELECTROSTÁTICA (Electricidad en reposo)

Electrización y Carga Eléctrica

La palabra **electricidad** se deriva de la griega **electron**, que significa **ámbar**. El ámbar es la resina fósil de árboles prehistóricos. Los griegos aprendieron que un trozo de esa piedra amarilla cristalina frotado con una piel atraía objetos livianos (plumas, papel, etc) hasta ponerlos en contacto y luego los repelía. No es el ámbar la única sustancia que presenta electricidad por frotamiento: en rigor todas las sustancias la presentan en mayor o menor grado, como veremos. Algunas, como el vidrio, adquieren al frotarse una clase de electrización opuesta a la del ámbar: al ponerse en contacto cuerpos electrizados de las dos sustancias desaparece la propiedad eléctrica del conjunto, como si se cancelaran los efectos.

Esta **cancelación** de efectos llevó a pensar en un modelo eléctrico con dos clases de electricidad a las que se dieron arbitrariamente signos contrarios: la positiva o "**vítrea**" y la negativa o "**resinosa**". La electrización proviene según este modelo de un desbalance entre **fluidos de distinto signo** que coexisten en iguales cantidades en todos los cuerpos en estado neutro, y que se crea al llevarse la piel o el paño parte de uno de ellos del objeto frotado. El paño queda cargado de la misma cantidad de electricidad que el objeto y de signo contrario.

Así como los fluidos gaseosos o líquidos están formados por una gran cantidad de partículas (átomos o moléculas móviles), se admite que los fluidos eléctricos están formados por gran cantidad de "**cargas elementales**" positivas y negativas.

El contacto con un objeto electrizado es otro medio de conferir carga neta a un cuerpo cualquiera, es decir que las cargas elementales pueden pasar a veces de un cuerpo a otro. El pasaje es muy favorable a través de cierto tipo de sustancias, como los metales y los cuerpos húmedos, que se llaman por eso "**conductores**" de la electricidad. El fluido eléctrico circula con facilidad por los conductores y en cambio queda bloqueado en los objetos sólidos cristalinos, vítreos o resinosos, llamados por ello "**aisladores**". En los aisladores como el vidrio o la resina es notable la aparición de electricidad por frotamiento, en cambio es difícil conseguirla en los metales, si no se toman con un mango aislador ¿por qué será?

En electrostática la **tierra** puede considerarse como un conductor neutro con una capacidad de cargas ilimitada. Se llama **tierra eléctrica** a cualquier buena conexión con la tierra¹ a través de un conductor.

La cantidad neta de un tipo de electricidad se llama "**carga**", pudiendo ser **positiva** o **negativa**. La carga de un cuerpo es la suma algebraica de todas sus cargas elementales y no puede fraccionarse más allá de un cierto límite (ver página 8): Este valor es el de la carga mínima que puede encontrarse en la naturaleza, la verdadera carga elemental: la carga del electrón².

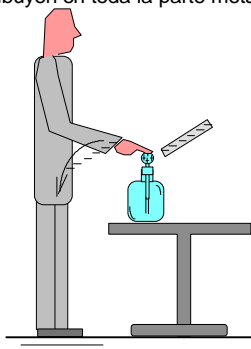
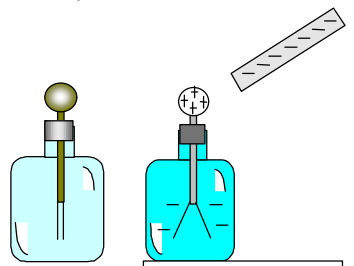
Se llama **carga específica** de una superficie o **densidad de carga superficial** al cociente entre carga y superficie electrizada.

Cuerpos con **cargas de distinto signo se atraen**, mientras que **los cuerpos cargados con cargas de signos contrarios se rechazan**. En base a este hecho experimental se propone que ocurre lo propio a nivel de cargas elementales. Si se acerca un cuerpo cargado a un conductor neutro, se movilizan las cargas elementales de éste por efecto de las de aquél. Este fenómeno se conoce como "**influencia o inducción electrostática**". El conductor influenciado, aunque con carga neta nula, presenta una distribución desigual: densidad de carga contraria a la del cuerpo inductor en zonas cercanas a éste y del mismo signo en zonas alejadas. Si se pone a tierra el cuerpo conductor, pasan a la tierra las cargas elementales del mismo signo que el inductor. Si se retira la conexión a tierra **antes de alejar el inductor**, el cuerpo queda con **carga neta** de signo contrario al de aquél.

Electroscopio

Se fabrica un sencillo aparato para detectar carga eléctrica sujetando dos láminas de papel metálico en el extremo de una varilla que atraviesa el tapón de una botella de vidrio. Afuera de la botella sobresale el otro extremo de la varilla rematada por una bolita también metálica

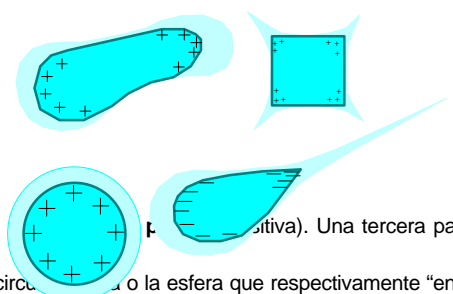
Experimento: Con este electroscopio descargado (láminas juntas) se hace el siguiente experimento: Se acerca una barra de acrílico frotada (negativa) a la esfera del aparato: las cargas positivas se concentran en la bolita y las negativas en las láminas, que se separan. Tocando con el dedo la bolita las cargas negativas pasan a tierra, y las láminas se juntan. Se retira el dedo y **después** se aleja la barra inductora: las cargas positivas de la bolita se distribuyen en toda la parte metálica especialmente en los bordes de las láminas debido a un efecto que se explicará a continuación. Las láminas vuelven a separarse, indicando que el aparato se halla cargado (positivamente en este caso)



Distribución de cargas elementales en cuerpos conductores y aisladores:

Debido a la acción entre cargas elementales los conductores pueden presentar densidad de carga de algún signo **solamente en su superficie**. En efecto, de existir cargas elementales de igual signo en su interior tenderían a alejarse hasta donde lo permite la extensión del cuerpo, o sea hasta su superficie.

En la superficie, las cargas elementales de un mismo signo **se distribuyen** siguiendo una configuración de mínima energía potencial, con una densidad proporcional a la **curvatura**³. La **densidad de carga** (carga por unidad de superficie) es prácticamente nula en zonas planas, absolutamente nula en concavidades y extremadamente alta en



La **curvatura**³. La **densidad de carga** (carga por unidad de superficie) es prácticamente nula en zonas planas, absolutamente nula en concavidades y extremadamente alta en

¹ Por ejemplo una barra metálica clavada profundamente en el terreno húmedo (jabalina de tierra)

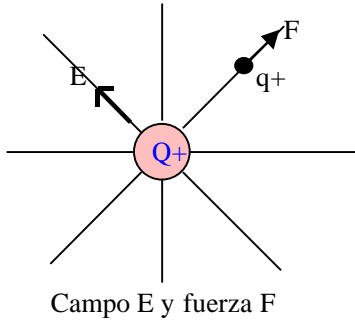
² Es la carga que presentan dos partículas elementales que constituyen los átomos: el **electrón** (negativa), el **neutrón**, no tiene carga neta.

³ La **curvatura** de una curva o una superficie en un punto se mide por la inversa del radio de la circunferencia o la esfera que respectivamente "encajan" en ese punto de la curva o superficie. Así una punta tiene una curvatura muy elevada, un plano tiene curvatura nula y una concavidad posee curvatura negativa

bordes y puntas. En las puntas de un conductor muy cargado las moléculas del aire que lo rodea se electrizan en contacto con esa zona de elevada densidad de carga, y escapan llevándose parte de ella (viento eléctrico). Para evitar la pérdida de electricidad los conductores de alta tensión deben tener bordes romos y superficies pulidas. En los dibujos adjuntos se representa la densidad de carga de diversos cuerpos conductores cargados con signos + y - mas o menos juntos sobre su superficie, y con un contorno difuso más o menos abultado.

Al contrario de los **conductores**, los cuerpos **aisladores** pueden presentar una distribución **cualquiera** de cargas, independiente de su forma, ya que la repulsión no genera movimiento. Inclusive podrían existir zonas cargadas en su **interior** si estuvieran formados por elementos cargados antes de su colocación.

Campo eléctrico y fuerza



Los cuerpos cargados de electricidad interactúan entre sí a distancia. Como toda fuerza a distancia la eléctrica se explica admitiendo que el portador del efecto es un **campo** generado por las cargas y que se derrama a su alrededor

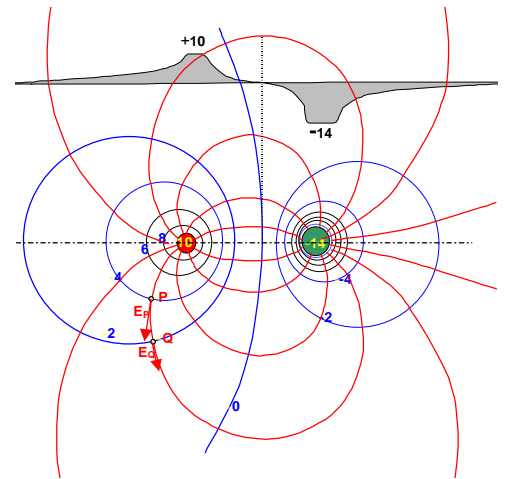
Ese **campo eléctrico** tiene un valor en cada punto del espacio medido por la magnitud E de la fuerza F que se genera allí sobre una carga pequeña y unitaria⁴. Es, como la fuerza, una magnitud vectorial (con intensidad, dirección y sentido) que tiene un valor en cada punto del espacio aunque no haya carga alguna sobre la que pueda manifestarse. Si eventualmente en el punto considerado hay una carga Q , aparece sobre la misma una fuerza de valor $F=E \cdot Q$ en la dirección del campo⁵.

Líneas de fuerza y superficies equipotenciales

Si trazamos las trayectorias que por efecto de la fuerza eléctrica siguen cargas exploratorias pequeñas, se obtiene una serie de líneas llamadas **líneas de fuerza del campo eléctrico**. Las líneas de fuerza del campo eléctrico son abiertas: cada una de ellas nace en una carga elemental positiva y muere en una carga elemental negativa o en la tierra. Por cada punto del espacio pasa una sola línea de fuerza. En la práctica se dibujan haciéndolas nacer sobre la carga generadora en cantidad proporcional a la densidad de carga. Entonces su **densidad** en cualquier lugar es proporcional a la **intensidad** promedio del campo E en esa región.

Perpendicularmente a las líneas de fuerza del campo eléctrico pueden trazarse una serie de superficies cerradas alrededor de las cargas, que unen puntos de igual energía potencial. Si por estas **superficies equipotenciales** se hace circular una carga exploratoria, es nulo el trabajo necesario para moverla ya que la fuerza que aparece sobre la misma es siempre perpendicular a la trayectoria recorrida. En nuestros dibujos planos de dos dimensiones, las superficies equipotenciales se representan con su intersección con el plano del papel.

Analogía electro-topográfica: Existe una clara analogía entre el sistema de líneas de fuerza eléctrica con líneas equipotenciales y un sistema equivalente topográfico: líneas de máxima pendiente y líneas de igual nivel. Así como por convención se toma nivel cero al de la superficie del mar, en electricidad se toma como cero al potencial de la tierra, o lo que es equivalente, al potencial de un punto muy alejado de las cargas que generan el campo.



Potencial eléctrico

La energía potencial de un cuerpo de masa m situada a una altura h sobre el nivel del mar vale $m \cdot g \cdot h$, siendo g el campo gravitatorio del lugar. El producto $g \cdot h$ es el potencial gravitatorio del punto. De la misma forma, la energía potencial de una carga $+q$ en un punto de potencial eléctrico V es el producto $V \cdot q$. El potencial eléctrico toma un valor escalar (no vectorial) en cada punto del espacio. Su unidad es el **VOLT**. Un punto del espacio tiene un potencial de **1 VOLT** cuando se requiere efectuar un trabajo igual a **1 JOULE** para colocar en ese punto una carga de **1 COULOMB** traída desde otro punto de potencial cero, por ejemplo desde cualquier lugar en contacto eléctrico con la tierra. El trabajo necesario para mover una carga Q entre dos puntos cuyos potenciales son respectivamente V_1 y V_2 es $(V_2 - V_1) \cdot Q$ y no depende del camino que se recorre sino de la ubicación del punto final y del punto inicial.

La diferencia de potencial entre dos puntos es numéricamente igual al trabajo necesario para transportar una carga unitaria entre ambos

En la figura se ve un sistema de dos cuerpos cargados con electricidad de distinto signo con el dibujo de las **líneas de fuerza** y las **líneas equipotenciales**. Obsérvese la similitud con un mapa de líneas de nivel en el que el cuerpo cargado positivamente representa un promontorio o cumbre de altura $+10$ y el cuerpo cargado negativamente corresponde a una depresión o pozo de nivel -14 . Las líneas de campo marcan la dirección de máxima variación del potencial. A esa variación en la dirección de máxima (vector) del potencial (escalar) se la denomina gradiente. El gradiente del potencial resulta así igual a la intensidad del campo, que se mide entonces en **Volt** por cada **Metro** de recorrido.

⁴ La carga exploratoria debe ser pequeña en comparación a la o las cargas generadoras del campo que se estudia para que no afecte con su propio campo a aquél

⁵ La carga, como la masa, es una magnitud no vectorial: tiene intensidad pero no dirección. Este tipo de magnitudes se llaman "escalares".

Leyes de Newton y Coulomb:

Las leyes que rigen las atracciones o repulsiones eléctricas entre cargas alojadas en **cuerpos pequeños comparados con las distancias que los separa** son exactamente de la misma forma que las de atracción gravitatoria entre cuerpos alejados⁶.

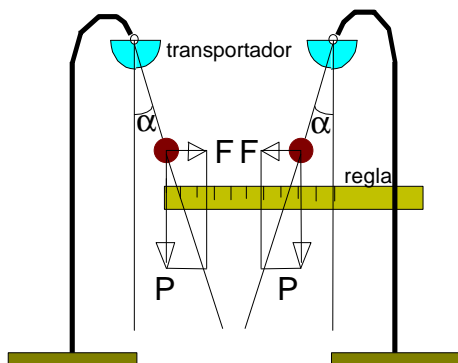
TABLA COMPARATIVA ENTRE GRAVITACIÓN Y ELECTRICIDAD

Gravitación	Electricidad
$F=k' \cdot (m_1 \cdot m_2) / d^2$ Fuerza gravitatoria	$F=k \cdot (q_1 \cdot q_2) / d^2$ (Fuerza electrostática)
$g=k' \cdot m_1 / d^2$ (campo gravitatorio creado por la masa m_1)	$E=k \cdot q_1 / d^2$ (campo eléctrico creado por la carga q_1)
$F=g \cdot m_2$ (fuerza que m_1 ejerce sobre m_2)	$F=E \cdot q_2$ (fuerza que q_1 ejerce sobre q_2)
$Pot=-k' \cdot m_1 / d$ (potencial gravitatorio creado por m_1 a una distancia d de su centro de gravedad)	$V=k \cdot q_1 / d$ (potencial eléctrico creado por una carga q_1 a una distancia d de la misma)

Nótese que el potencial eléctrico creado alrededor de una carga positiva es también positivo, porque para acercarse a la misma con una carga exploratoria positiva hay que vencer la fuerza de repulsión entre cargas de igual signo. Es equivalente a subir por la ladera de una montaña. En cambio alrededor de una masa se crea un potencial gravitatorio negativo porque para acercar otra masa hay que frenar la atracción, obteniéndose así trabajo a costa de la energía del sistema que va decreciendo. Es equivalente a **bajar** por la pendiente de una depresión.

k' y k son las constantes gravitatoria y eléctrica respectivamente.

La constante k depende del medio: para el vacío y muy aproximadamente en el aire su valor es $k_0=9 \times 10^9$ en unidades MKS. El subíndice 0 indica que k es la del vacío (medio de referencia). Experimentalmente se comprueba que la fuerza eléctrica depende del medio en que están inmersas las cargas. Si se sumergen en agua muy pura (no conductora) dos cargas eléctricas experimentan una fuerza 80 veces menor que en el vacío o en el aire a presión atmosférica. Esto se traduce que k para el agua vale $k_0/80$ o sea $1,1 \times 10^8$. En otros medios aisladores su valor también se reduce aunque menos que para el agua.



Péndulo eléctrico

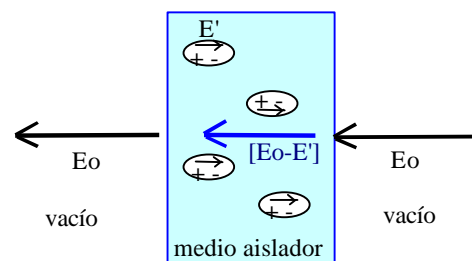
Una bolita aisladora liviana de corcho o poliuretano expandido que penda de un fino hilo de seda o nylon constituye un instrumento cuantitativo muy útil en electricidad: se lo llama "**péndulo eléctrico**". Con él se puede, entre otras cosas, constatar la ley de la inversa del cuadrado de la distancia. Si colocamos dos de estos péndulos iguales con sus bolitas cargadas de distinto signo, éstas se atraerán formando los hilos un cierto ángulo α con la vertical. La dirección de los hilos será la de la resultante entre el peso P cada bola y la fuerza eléctrica de atracción F igual y contraria para ambas. Si las bolitas están a una distancia d_1 varias veces su diámetro se puede considerar que F está concentrada en el centro de cada bola y vale $F_1=k \cdot q_1 \cdot q_2 / d_1^2$. Además $\text{tg}(a_1)=F_1/P$. Alejando los péndulo de manera que entre las bolitas varíe la distancia de d_1 a d_2 y cuidando que el conjunto no se descargue, será $F_2=k \cdot q_1 \cdot q_2 / d_2^2$ y $\text{tg}(a_2)=F_2/P$. Si es cierta la ley del cuadrado de la distancia se cumplirá que $F_1/F_2 = \text{tg}(a_1)/\text{tg}(a_2) = (d_2/d_1)^2$, cosa que puede comprobarse experimentalmente con gran aproximación midiendo ángulos y distancias.

Desplazamiento Eléctrico

Se admite (según idea de de **Maxwell**) que en los medios aisladores las cargas eléctricas no pueden moverse libremente, aunque sí pueden desplazarse elásticamente a partir de su posición de equilibrio en mayor o menor grado según la naturaleza del aislador, por efecto de la fuerza eléctrica: a este fenómeno se lo llama "desplazamiento eléctrico" y juega un papel muy importante en la teoría de la electricidad.

El fenómeno del desplazamiento explica la menor fuerza eléctrica que experimenta un cuerpo cargado en un medio aislador. En la medida que tales medios posean estructura polar, los dipolos elementales orientados en contra del campo exterior E_0 generan campo E' que se superpone al primero dando un campo interior $E_r=E_0-E'$.

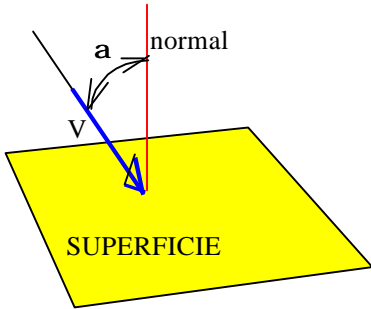
El cociente entre el campo exterior (fuera del dieléctrico, por ejemplo en el vacío) y en interior del dieléctrico, mide polarización de éste. Es la constante dieléctrica relativa del medio⁷ $\epsilon_r = E_0/E_r$.



⁶ Mientras que la fuerza gravitatoria es de carácter débil ya que se aprecia sólo en el caso de grandes masas (la tierra y los astros en general), las fuerzas electrostáticas entre cuerpos cargados son en cambio notables. La diferencia cuantitativa entre fuerza eléctrica y gravitatoria encierra la clave de la edad y la evolución de nuestro universo en expansión. (Ver el excelente libro "Gravedad" de George Gamow, Editorial Eudeba)

⁷ Se verá luego que la constante de la Ley de Coulomb vale $k=1/(4\pi\epsilon)$

Se usa con ventajas en vez del campo eléctrico el “campo de desplazamiento” que da cuenta del efecto de polarización del dieléctrico. y que está definido por $D = \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot E$, siendo $\epsilon_0 = 1/(4\pi k_e)$ una constante universal derivada de la constante de la ley de Coulomb, y que según vimos vale $k_e = 9 \times 10^9$ para el sistema MKS⁸. Más adelante se verá que en virtud de la Ley de Gauss el valor del desplazamiento eléctrico D , también llamado “inducción electrostática” coincide con la densidad de carga superficial del material.



La ley de la inversa del cuadrado de la distancia

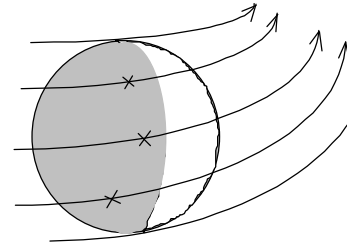
Cuando una magnitud vectorial cualquiera es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre el lugar y un punto del espacio (como por ejemplo el campo o la fuerza eléctrica y gravitatoria), podemos establecer una **analogía hidráulica** como si la magnitud vectorial en cuestión fuera la velocidad de un fluido incompresible en movimiento que brota desde ese punto (en el que está situada la carga o la masa). Por ejemplo la iluminación sobre una superficie cumple la ley inversa al cuadrado de la distancia, pues disminuye con el cuadrado de la distancia a la fuente puntual de luz⁹.

Tanto para la gravitación como para la electricidad, la ley de la inversa del cuadrado de la distancia vale solamente entre **cargas o masas puntuales**, o en la práctica, para cuerpos de pequeñas dimensiones comparados con la distancia que los separa. En cambio si la distancia entre cuerpos con o sin carga es pequeña comparada con sus dimensiones, la fuerza eléctrica o gravitatoria total es la resultante respectivamente de fuerzas entre cargas o masas elementales distribuidas en el cuerpo. Éstas no están a una misma distancia ni en la misma dirección y su composición vectorial da un resultado que se desvía de la ley

Flujo de $V = V \times S \times \cos \alpha$
elemental.

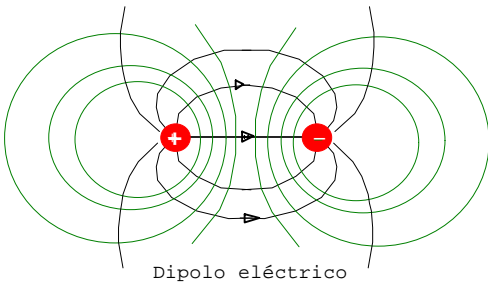
Flujo

Tanto la luz como el campo eléctrico o gravitatorio pueden estudiarse suponiendo que se trata de fluidos incompresibles que parten de una fuente (lámpara, carga o masa respectivamente). Se define así un **flujo** a través de una superficie que es igual al valor del vector sobre la superficie multiplicado por el valor de ésta y por el coseno del ángulo que forma la dirección del vector con la normal (perpendicular levantada en el punto de intersección). La unidad de flujo depende de lo que represente el vector V . Si éste es la **velocidad** de un fluido expresada en m/s la unidad del flujo es la de un **gasto** (m^3/s).

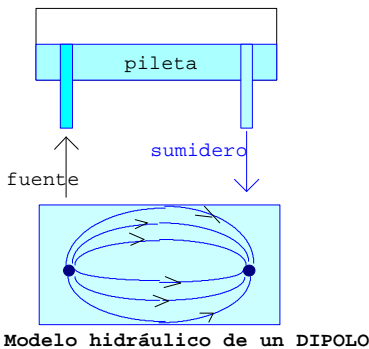


El campo conservativo

Se dice que un campo de velocidades de un fluido incompresible es **conservativo** porque fuera de las fuentes o los sumideros, el gasto que entra por una cara de una superficie cerrada (hemisferio sombreado) es igual al que sale o atraviesa la cara de salida, siendo nulo el balance de fluido en todo momento en esa región del espacio. Resulta claro que si dentro de la región del espacio limitada por la superficie cerrada hubieran **fuentes o sumideros** el balance no sería nulo sino que valdría precisamente el gasto de la fuente (positivo) o del sumidero (negativo).



Un campo eléctrico fuera de las cargas es también **conservativo**, porque las líneas de fuerza nacen solamente en las cargas elementales, así como las líneas de corriente de un fluido nacen en las fuentes. No hay pues generación espontánea de fluido ni de campo eléctrico en una región del espacio que no contenga fuentes. La semejanza es tal que se puede representar un **dipolo eléctrico** con un modelo fluido constituido por una fuente y un sumidero del mismo gasto. La representación hidráulica permite ver las líneas de corriente siguiendo la trayectoria de pequeños cuerpos flotantes esparcidos sobre la superficie del líquido



Flujo del campo E alrededor de una carga Q - Ley de Gauss

Calculemos ahora cuánto vale el flujo del campo eléctrico creado por cuerpo cargado a través de una superficie cerrada que lo envuelve totalmente. Supongamos que dicha superficie es una esfera de radio R en cuyo centro está la carga $+Q$. Dicha carga produce un campo radial. Sobre la superficie esférica interior incidirá un campo normalmente a ella de valor $E = k \cdot Q/R^2$

Sabemos que la superficie de una esfera de radio R vale $S = 4\pi R^2$
El flujo, de acuerdo a la definición dada será: $E \cdot S \cdot \cos \alpha$, pero α vale 0° y su coseno es 1, por lo que resulta:

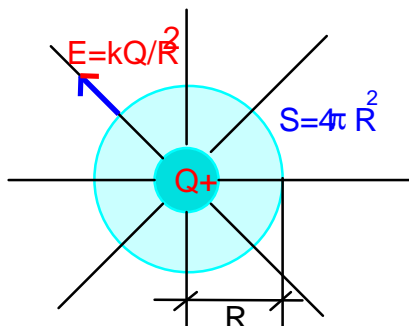
$$\text{Flujo} = E \cdot S = k \cdot (Q/R^2) \cdot (4\pi R^2) = 4\pi k Q$$

⁸En el estudio de la electrostática resulta útil usar el sistema de unidades “cgs electrostático”, para el cual $\epsilon_0 = 1$ (sin unidades)

⁹ Se estudia en **óptica** que la luz puede ser interpretada como un fluido que brota de la fuente. La cantidad de luz por unidad de tiempo que atraviesa una superficie se llama “flujo luminoso” en clara alusión a este modelo.

Como era de esperar, el flujo es proporcional a la carga encerrada, que es la fuente del campo eléctrico. Esta fórmula se conoce como **ley de Gauss**, y es válida no solo para una esfera sino para una superficie de cualquier forma que encierre completamente a la carga.

Campo en la superficie de un cuerpo uniformemente cargado



Considerando que la dirección del campo eléctrico E en un cuerpo uniformemente cargado es perpendicular a cualquier elemento de superficie DS cargada con una carga DQ , su flujo a través de la misma valdrá $E \cdot DS = 4\pi \cdot k \cdot DQ$, de acuerdo a la ley de Gauss. El campo superficial E valdrá entonces $E = 4\pi \cdot k \cdot DQ / DS$. Pero DQ / DS es la carga por unidad de superficie, o sea la "densidad de carga superficial". Asimismo vimos antes que $k = 1 / (4\pi\epsilon_0)$ por lo que $1 / (4\pi k) = \epsilon_0$, siendo entonces la densidad de carga $(DQ / DS) = \epsilon_0 \cdot E$, expresión ésta que coincide con la del desplazamiento eléctrico definido antes. Por tal motivo podemos decir que:

El campo en la superficie de un cuerpo cargado es proporcional a la densidad de carga superficial. Ésta coincide con el valor del desplazamiento eléctrico D en el material del que está hecho el cuerpo

Circulación de un vector:

En el caso de una **fuerza** (representada por un vector) que se desplaza por un **camino** (representado por una línea), la **proyección de la fuerza** sobre la dirección del camino multiplicado por la **longitud de éste** da por definición **el trabajo** efectuado por la fuerza en ese desplazamiento.

Se **generaliza** este concepto para el caso de cualquier vector (no solo si representa una fuerza, sino también para un campo eléctrico o magnético, una velocidad, etc.) con el nombre de **circulación del vector a lo largo de un camino**. Lógicamente tiene unidades de energía sólo si el vector es una fuerza.

La **circulación** toma diferentes nombres particulares según lo que represente el vector en cuestión:

- Si es una **fuerza** tiene unidades de **energía** y representa un **trabajo**.
- Si es la **velocidad** de una partícula fluida la circulación en un camino cerrado mide el grado de agitación del fluido
- Si es un **campo magnético**, veremos luego que la circulación del mismo en un camino cerrado toma el valor de la **corriente eléctrica** que le da origen.

La circulación de un **campo eléctrico** coincide con el concepto ya visto de **diferencia de potencial** entre el punto inicial y final del recorrido, y como ya sabemos no depende de por dónde pase el camino. **Es por ese motivo que la circulación de un campo eléctrico en un camino cerrado vale cero, siempre que las cargas generadoras del campo estén en reposo**

Energía asociada a un campo eléctrico

Si en una región del espacio detectamos un campo eléctrico, por ejemplo mediante cargas exploratorias que se desplazan siguiendo líneas de fuerza, debemos admitir que existen las fuentes generadoras (cargas o cuerpos cargados que le dan origen). Podemos imaginar que esas cargas se han formado por algún proceso de agrupación de cargas elementales. Ahora bien, para agrupar cargas elementales integrándolas sobre un cuerpo, es decir para cargar eléctricamente la materia, debemos efectuar trabajo: el de llevar las cargas elementales desde un punto alejado (de potencial nulo) hasta el punto de concentración en el cuerpo que se trata de cargar.

Siguiendo con las analogías que nos ayudan a comprender mejor el tema, consideremos el proceso de cargar eléctricamente un cuerpo de la misma manera que construiríamos una **montaña** con carretilladas de tierra: La primera carretilla no requiere ningún trabajo porque se vuelca a nivel del suelo. La segunda debe echarse sobre la pequeña montañita que dejó la primera. Para volcar la tercera debemos subir un poco más, sobre el promontorio de las dos primeras. Y así sucesivamente..., hasta llegar a las últimas carretilladas que nos obligan a ascender con la carga por algún camino hecho en la ladera del ya casi terminado monte. Se demuestra en el caso de una pila de tierra de sección constante y altura H (un prisma o cilindro) que el trabajo total para formar lo equivale a subir toda la tierra a una altura igual a $H/2$, o sea la mitad de la altura total. El trabajo para apilar una masa M a una altura H vale $M \cdot g \cdot H/2$ que es una sumatoria de pequeños aportes iguales a alturas que van desde **cero** hasta H

De la misma forma, para cargar un cuerpo desde potencial **cero** hasta V se requiere un trabajo igual a la mitad del que supone remontar toda la carga Q de una sola vez hasta el potencial final, o sea $V \cdot Q/2$

Ahora bien: si la creación de un campo eléctrico supone la ejecución del trabajo necesario para integrar las fuentes, podemos asignar al campo resultante una energía equivalente a aquél. La **energía asociada al campo eléctrico** depende del producto de la carga Q y el potencial V . Como el valor del campo E es a su vez proporcional tanto a V como a Q , resulta que la energía asociada a un campo es proporcional a E^2

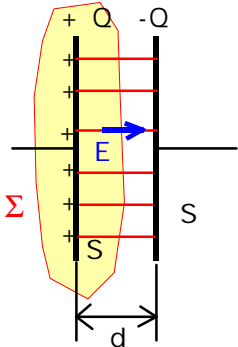
Capacidad eléctrica

Igual que en el caso de la pila de tierra, en la que su masa depende de la altura H a través de la sección o superficie de la misma, también la carga está en relación con el potencial a través de la geometría del sistema cuerpo/tierra. Vamos a ver a continuación que la relación entre carga y potencial depende del tamaño del cuerpo a cargar y de su proximidad a tierra. A dicha relación C se la llama "**capacidad eléctrica del sistema**". Resulta así $C = Q/V$. La unidad

de capacidad eléctrica es el **Farad**¹⁰ (se abrevia F) . **1 F** es la capacidad de un sistema cuando entre sus partes existe una diferencia de potencial de **1V** al acumular cada una de ellas una carga de **1C** (positiva y negativa)

Cálculo de la capacidad de un condensador plano

Consideremos un sistema de cuerpos conductores formado por dos placas planas conductoras de superficie **S** colocadas a una distancia **d** entre las cuales existe el vacío o aire atmosférico. A este dispositivo se lo llama "condensador eléctrico plano de aire" . Tratemos de hallar su capacidad eléctrica, o sea la razón **Q/V**



Supongamos que cada una de las placas posee una carga **Q** de igual valor y signo contrario que la otra. La carga neta del sistema es pues nula.

Se han representado las cargas elementales positivas y negativas que integran respectivamente **Q+** y **Q-** uniformemente distribuidas sobre ambas placas, lo cual es cierto en la medida que la extensión de las placas sea grande comparada con la distancia que las separa.

Entre cada par de cargas elementales enfrentadas se establece una línea de campo eléctrico **E** que nace en la positiva y muere en la negativa más próxima. Dicho **campo eléctrico E** está entonces representado por líneas de fuerza paralelas entre placas, y por lo tanto tiene valor constante en el interior del dispositivo y valor nulo por afuera del mismo.

Para calcular el valor del campo, podemos utilizar el teorema de Gauss antes visto, que relaciona el flujo del campo con la carga que lo produce. En el caso de la figura, la superficie sombreada **S** encierra a la carga **+Q** . El flujo a través de esa superficie vale **E x S** ya que el campo de valor **E** existe solamente entre las placas y atraviesa solamente la parte **S** de la superficie envolvente **S**.

Así entonces se tiene que **E x S = 4pkQ** y por lo tanto **E = 4pkQ/S**

Ahora bien, la diferencia de potencial entre las placas puede calcularse como el trabajo necesario para llevar una carga unitaria **q=+1** desde la placa negativa hasta la positiva, por cualquier camino. Elegimos el camino sobre una línea de fuerza, recorriendo una distancia **d** . La fuerza que actúa sobre la carga unitaria valdrá numéricamente lo mismo que el campo **E**

El trabajo será fuerza multiplicada por distancia recorrida en la dirección de la fuerza, y la diferencia de potencial resulta entonces **V=E.d**

La capacidad del condensador plano vale en el vacío:

$$C=Q/V = Q/E/d = Q/(4pk_0)/Q.S/d = [1/(4pk_0)].S/d \text{ [F] (MKS)}$$

Como se ve la capacidad de un sistema es una expresión en la que intervienen solamente variables geométricas por más que sea un cociente entre magnitudes eléctricas.

La capacidad de un condensador plano es proporcional a la superficie de las placas e inversamente proporcional a la distancia que las separa. La constante de proporcionalidad **1/(4pk₀)** se denomina, como ya vimos **constante dieléctrica del vacío**. Se la simboliza con la letra griega épsilon minúscula **e** con el subíndice **0** y su valor es:

$$e_0 = 1/4\pi \cdot 9 \cdot 10^9 = 8,85 \times 10^{-12} \text{ (MKS)}$$

Para un medio aislante cualquiera de constante **k** es **e = 1/4\pi/k** , así que la constante dieléctrica del agua purísima (para que no sea conductora) vale **80 veces e₀** y un condensador con agua entre sus placas tendría por lo tanto una capacidad eléctrica **80 veces más que** la del condensador de aire de las mismas dimensiones. La razón de la gran **constante dieléctrica del agua** es que su molécula muy polar crea un campo antagonico elevado cuando se orienta por efectos de un campo eléctrico exterior.

¿Por qué no se construyen condensadores con agua como dieléctrico entre sus placas?: Porque si bien serían los de mayor capacidad posible, no tendrían buena aislación eléctrica: cualquier impureza en el agua la hace conductora y el condensador se descargaría a través del dieléctrico.

Se usan como dieléctricos la mica, la cerámica, el papel aceitado, plásticos y en general otras sustancias aislantes, que si bien poseen constantes dieléctricas menores que la del agua, son en cambio muy buenos aisladores.

CONSTANTES DIELECTRICAS DE DIVERSAS SUSTANCIAS

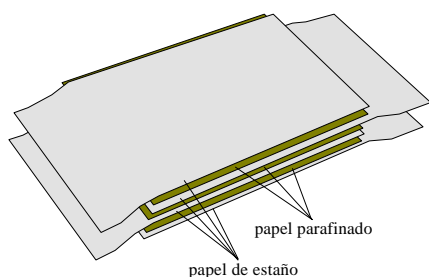
Material	Fórmula química	e(MKS)	e/e ₀
Vacío	---	8.85x10 ⁻¹²	1
Agua	H ₂ O	7x10 ⁻¹⁰	80
Aceite mineral	C _n H _{2n+2}	2.2x10 ⁻¹¹	2.5
Cuarzo	Si O ₂	8.85x10 ⁻¹¹	10
Mica	(SiO ₂)(Al ₂ O ₃)(CaO)	7x10 ⁻¹¹	8
PVC	(C _n H _{2n}) _x (Cl) _y	2.6x10 ⁻¹¹	3

¹⁰ **No debe confundirse** Farad (unidad de capacidad eléctrica) con la cantidad de electricidad necesaria para depositar un equivalente de un elemento, el Faraday = 96500 Coulomb (ver página 11)

Condensadores eléctricos

Los condensadores eléctricos (también llamados **capacitores**)¹¹: Se usan para acumular grandes cantidades de electricidad, cargándolos con generadores eléctricos. Se verá luego su aplicación en circuitos de corriente alterna y formando resonadores eléctricos cuando se combinan con bobinas. La forma más común que se da a los capacitores es la tubular:

Se forma una pila de hojas de papel de estaño separados por hojas de papel aceitado o parafinado. Las hojas de orden impar de papel de estaño sobresalen un poco de un lado por sobre las de papel aceitado y las hojas de estaño de orden par sobresalen por el otro. El conjunto se arrolla fuertemente prensado, para que el espesor de aislante sea mínimo y la capacidad sea máxima, colocándose terminales metálicos en contacto con las hojas pares e impares.



ELEMENTO DE CONDENSADOR TUBULAR
(antes de arrollar)

¹¹ Los términos capacitor, inductor (o reactor) y resistor se emplean respectivamente para designar genéricamente elementos reales que poseen capacidad (condensadores), inductancia (bobinas o arrollamientos) y resistencia (elementos de conductividad finita)

CARGAS EN MOVIMIENTO

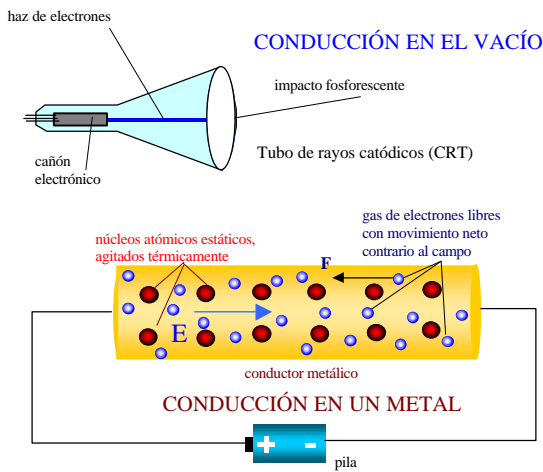
CORRIENTE ELÉCTRICA

Generalidades

Ya se estudió en electrostática que en los aisladores sólidos las cargas no pueden moverse libremente y están ancladas en la materia, teniendo a lo sumo una posibilidad de desplazamiento limitado (**polarización de los dieléctricos**). En las sustancias conductoras, los portadores de carga (electrones, iones y otras partículas cargadas), tienen posibilidad de moverse bajo la acción de un campo eléctrico.

En los **metales**, que son los conductores sólidos por excelencia, las cargas pueden moverse con relativa libertad dentro de su masa, existiendo en cambio una fuerza superficial que los retiene dentro de ella. Las cargas dentro de los metales son en realidad los electrones exteriores de sus átomos, que están más sueltos que si el átomo estuviera solo: al estar formando parte de una red, los núcleos de los átomos vecinos comparten los electrones exteriores entre sí, que configuran una población móvil. La fuerza de cohesión, análoga a la que mantiene las moléculas de un líquido juntas, puede ser vencida por la acción del calor, y algunos electrones pueden “evaporarse” cuando el metal alcanza una temperatura suficiente. Pasa así exactamente igual que con la evaporación de los líquidos, en la que las moléculas absorben calor transformándolo en energía cinética. Cuando dicha energía cinética es superior a la energía potencial que las retiene en el seno de la masa líquida, saltan fuera de ésta formando una nube de gas o vapor.

Este efecto de “evaporación electrónica” fué descubierto por el célebre **Thomas Alba Edison** y se conoce como “**efecto Edison, o de emisión termoiónica**”. Los electrones en el vacío no tienen ninguna restricción a su movimiento. Los electrones emitidos por un cátodo caliente adquieren una aceleración constante bajo los efectos de un campo eléctrico. En cambio en el seno de un metal, los electrones de las capas atómicas externas, si bien están relativamente libres de vínculos con los núcleos atómicos, presentan una cierta resistencia a la circulación. Esa resistencia se debe a la agitación térmica de los núcleos. El resultado es un impedimento a la libre circulación parecido a la resistencia viscosa de un fluido en una cañería.



Experimentalmente se verifica que el conjunto de electrones de un metal, lejos de aumentar su velocidad indefinidamente bajo los efectos de un campo eléctrico, llegan inmediatamente a una velocidad promedio de equilibrio proporcional al campo existente dentro del conductor.

Cuando circulan cargas eléctricas por un conductor, se obtiene una medida de la intensidad de dicha corriente eléctrica computando la carga total que pasa por una sección de conductor durante un tiempo dado y dividiéndola por ese tiempo. Así entonces: Intensidad de la corriente eléctrica = Carga / Tiempo. La unidad de corriente es el Amper. **1 Amper=1Coulomb/1segundo**

Podemos imaginar un **electrón** como una esferita que pesa apenas 9×10^{-31} Kg y que posee una carga eléctrica comparativamente elevada de $q=1,6 \times 10^{-19}$ Coulomb ⁽¹²⁾

Cuando unimos los extremos de una pila común de 1,5 V con un cable corto, se establece en el conductor una corriente de aproximadamente 1A: Pasan por el cable nada menos que **$1/q = 6,25 \times 10^{18}$ electrones por segundo!**

Corriente eléctrica en un conductor . Ley de OHM

El sentido de circulación de los electrones libres en un metal es en contra del campo, remontando el potencial, ya que son cargas negativas. En un metal no hay cargas positivas libres. Si las hubiera circularían en la dirección del campo. Debido a una antigua convención (de antes que se supiera que la partícula elemental de carga tiene signo negativo), se sigue hoy en día marcando la dirección de la corriente eléctrica en cualquier circuito como si ésta se debiera a cargas positivas. Es decir que la corriente indicada por los técnicos tiene la dirección del campo eléctrico y baja en sentido del potencial. La intensidad **I** de la corriente eléctrica es proporcional al valor del campo **E** y a la sección **S** del conductor. La constante de proporcionalidad se llama “**conductividad**”, se representa con la letra griega **k** (kappa) y depende del material y la temperatura. Podemos poner así que: **$I=k.S.E$**

O también podemos hacer intervenir la diferencia de potencial entre los extremos del conductor **V**. Si **l** es la longitud del mismo será **$V=E.l$** y entonces

$$I=V.S.k/l$$

A esta ley se le da otra forma exactamente equivalente usando la inversa de la conductividad del material, que se llama “**resistencia específica**” o “**resistividad**” y se designa con la letra griega **r** (rho)

Para el cobre muy puro, como el de los cables eléctricos

$$r = 1/57 [W.mm^2/m] \text{ a } 15^{\circ}C$$

La resistencia específica en los metales crece con la temperatura ¹³. En el cobre a 300°C vale aproximadamente el doble, o sea 2/57

$$I = V / (r.l/S) = V/R$$

¹²La carga de un electrón fué determinada en 1906 por el norteamericano **Millikan**, quién observó al microscopio una niebla de aceite sometida a un campo eléctrico: las gotitas cargadas por el frotamiento producido por la pulverización o por otros medios de ionización se movían con velocidades proporcionales a su carga, que resultaba siempre ser múltiplo de un valor mínimo $q=1,6 \times 10^{-19}C$

¹³La razón del aumento de resistencia se debe a la mayor dificultad que tienen los electrones libres en el interior del metal para circular en un medio de núcleos atómicos agitados por la temperatura.

La expresión entre paréntesis recibe el nombre de **resistencia eléctrica** del conductor y su unidad es el **Ohm**, en honor al científico que estudió las leyes de la circulación de la corriente eléctrica en los conductores.

$$R = r \cdot l / S \text{ [W]}$$

La unidad **Ohm** se abrevia con una letra omega mayúscula Ω

Podemos poner que $1 \text{ W} = 1 \text{ V} / 1 \text{ A}$

Resistencias específicas de algunos materiales en $[\text{W} \cdot \text{mm}^2/\text{m}]$ a 15°C

METALES	r	NO METALES	r	SUSTANCIAS	r
Plata	= 1/60	Silicio puro	= 10	Vidrio	= 1×10^{15}
Cobre	= 1/57	Germanio	= 280	Madera	= 1×10^{16}
Oro	= 1/47	Grafito (C)	= 400	Cuarzo (Si O ₂)	= 1×10^{19}
Aluminio	= 1/36				
Sodio	= 1/25				
Hierro	= 1/10				
Cinc	= 1/4				
Mercurio	= 1				

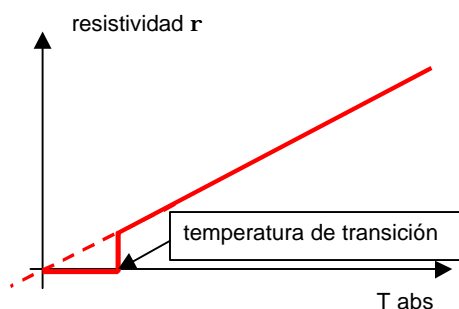
La corriente en un conductor entre cuyos extremos existe una diferencia de potencial es proporcional a la misma. La constante de proporcionalidad depende del material, la temperatura y la geometría del circuito. Su inversa se llama resistencia del circuito (Ley de Ohm)

Ejemplo: Qué intensidad de corriente circulará por un cable de cobre a 15°C que tiene 100 de largo y $2,5 \text{ mm}^2$ de sección cuando entre sus extremos se conecta una batería de auto de 12 V ?

Primero calculamos la resistencia del cable $R = r \cdot l / S = 1/57 \times 100 / 2,5 = 0,70 \text{ W}$

Después calculamos la intensidad $I = 12 \text{ V} / 0,7 \text{ W} = 17 \text{ A}$

Dependencia de la conductividad de los metales con la temperatura – Superconductividad



Vimos que la resistividad de los metales crece con la temperatura debido a que el movimiento térmico de los núcleos de la red cristalina perturba el normal flujo del gas electrónico. Si medimos la resistencia de un conductor mientras lo enfiamos, vemos que aquella disminuye en forma prácticamente proporcional a la temperatura absoluta. De acuerdo al mecanismo propuesto, sería de esperar que cerca del cero absoluto la conductividad fuera muy grande aunque limitada por un mínimo de agitación térmica de los núcleos. Sin embargo, Kamerlingh Onnes descubrió en 1911 que el mercurio a cuatro grados absolutos perdía abrupta y totalmente su resistencia eléctrica, es decir que la conductividad se hacía infinita. Luego se descubrió que muchos otros metales y algunos materiales (que incluso no son conductores a temperatura ambiente) pierden totalmente su resistividad por debajo de una cierta temperatura característica llamada **de transición**, transformándose en "superconductores".

El hecho se explica a través de un mecanismo que es una excepción a las leyes de las partículas electrónicas (fermiones), que de ordinario evitan ocupar más de una el mismo nivel de energía¹⁴.

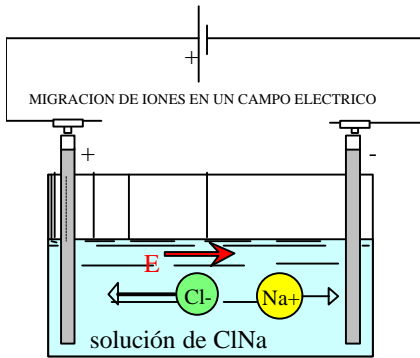
Pero a una temperatura suficientemente baja, característica de cada sustancia, los electrones se hacen amigos y ocupan todos un mismo nivel de energía. Forman así un verdadero bloque monolítico que puede circular como un sólido por entre los núcleos, sin rozamiento. A este hecho obedece la superconductividad, que se manifiesta por resistencia nula del conductor. En estado de superconductividad por el conductor puede pasar una corriente muy intensa sin pérdida de energía. El estado de superconductividad cesa cuando la temperatura supera el valor de transición, o cuando un campo magnético suficientemente intenso penetra en el interior del conductor.¹⁵

Se descubren a diario nuevas sustancias que son superconductoras a temperaturas más altas (es decir menos bajas, o sea más fáciles de lograr). En particular, hay sustancias cerámicas a partir de óxido de cobre que son superconductoras por encima de la temperatura de un agente criogénico bastante común como el nitrógeno líquido (76°K). Sin embargo la fragilidad e inestabilidad química de esos cerámicos son cuestiones que falta superar para poder usar el principio industrialmente en la transmisión y el almacenamiento de la energía eléctrica.

¹⁴ En el átomo, ello lleva a que los electrones vayan ocupando sus lugares ordenadamente, dos en la primera capa, luego ocho en la segunda, etc.

¹⁵ La materia en estado de superconductividad es diamagnética, es decir que no permite la entrada de campo magnético, salvo en una capa superficial muy fina.

Movimiento de cargas en líquidos conductores



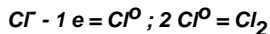
Electrólisis de la salmuera

También son conductores de la electricidad los líquidos que poseen **electrolitos** disueltos (ácidos, bases y sales inorgánicas u orgánicas en solución). Como se sabe a partir de las investigaciones de Svante Arrhenius en 1887, los electrolitos disueltos en líquidos polares (como el agua) se disocian en iones. Por ejemplo, en la salmuera, el Cl Na (sal común) en solución acuosa se descompone en el catión Na^+ y el anión Cl^- , que migran (se dirigen) respectivamente hacia el polo negativo o positivo en el dispositivo de la figura (celda electrolítica). La conductividad de una solución de electrolito es proporcional a la concentración de la sustancia disuelta y a la temperatura de la solución. El aumento de temperatura favorece la conducción al aumentar la movilidad de los iones en la masa fluida.

La carga que porta un ión es un múltiplo de la carga del electrón: Para darnos cuenta de ello recordemos que por ejemplo el catión Na^+ es un átomo de sodio que ha perdido su electrón exterior y por lo tanto no presenta igual número de cargas positivas (protones) que de electrones. De este balance surge una carga neta positiva igual a la carga del electrón perdido ($+1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$). Ese electrón perdido fue a completar el octeto exterior de un átomo de cloro, que pasa a tener un electrón de más, resultando un ión

cloruro Cl^- que posee una carga de $-1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$

Las reacciones que ocurren en la **celda electrolítica** con salmuera son las siguientes: El ión Cl^- se dirige al ánodo y allí entrega su electrón de más al circuito, pasando a Cl^0 atómico elemental. Dos átomos de Cl^0 forman una molécula de gas que se desprende del electrodo en forma de burbujas:



Al mismo tiempo que el ion cloruro pasa a cloro elemental, un ión sodio Na^+ , que no tiene propiedades de sodio metálico, pasa a esta forma elemental al tomar un electrón del circuito exterior en el cátodo. Se mantiene así la neutralidad del circuito exterior que recibe un electrón del cloruro y entrega simultáneamente un electrón al Na^+ . El sodio elemental que se deposita en el cátodo reacciona inmediatamente con el agua de la solución formando hidróxido de sodio e hidrógeno, que se desprende en forma de burbujas:



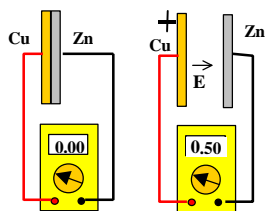
Para que la solución de hidróxido de sodio (**soda cáustica**) no alcalinice toda la salmuera, se coloca un tabique poroso alrededor del cátodo, que deja pasar los iones y no las soluciones. Se extrae así el **HONa** de la cuba, aspirándose los gases que se desprenden sobre cada electrodo por conductos separados (el cloro y el hidrógeno gaseosos forman mezcla explosiva, así que hay que cuidar de que no se mezclen).

Ley de Faraday

Las reacciones precedentes produjeron una circulación de 1 carga electrónica, o sea $q = 1,60219 \times 10^{-19} \text{ C}$, necesarias para transportar un ión de cada elemento cuya masa es su peso atómico dividido el número de Avogadro $NA = 6,02217 \times 10^{23}$. Resulta entonces que para depositar una cantidad igual al peso atómico de cualquier elemento monovalente se requiere el pasaje de una carga total igual al producto entre carga unitaria y número de partículas, es decir $q \cdot NA = 96487 \text{ C} = 1 \text{ Faraday}$ (no confundir con 1 Farad, unidad de capacidad eléctrica, ver página 9)

Potenciales de contacto entre conductores sólidos

Efecto Volta



POTENCIAL DE CONTACTO

Se explica este fenómeno considerando que la densidad del **gas electrónico** en el cobre es mayor que en el zinc, y al ponerlos en contacto tienden a equilibrarse superficialmente las presiones mediante una **difusión** de electrones del cobre al zinc. Esta difusión ocurre en una capa superficial a ambos lados de la unión. El cobre pierde electrones y queda cargado positivamente. Esta migración cesa cuando la acumulación de cargas a ambos lados de la unión genera un campo eléctrico que equilibra la diferencia de presión de los gases electrónicos. El hierro, por ejemplo, tiene una densidad intermedia entre el cobre y el zinc. Si reemplazamos la placa de cobre por la de hierro, la diferencia de potencial es aproximadamente 0,4 V, y si reemplazamos la de zinc por la de hierro, el aparato medirá 0,1 V.

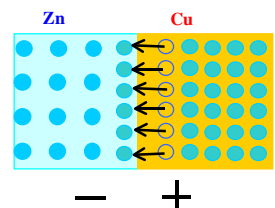
El voltímetro no detecta esta diferencia de potencial mientras las placas están juntas porque el circuito se cierra desde el cobre a través de conductores metálicos (en general también de cobre) por adentro del aparato, saliendo del mismo hasta unirse con la placa de zinc. En esa unión se produce una diferencia de potencial igual y contraria que cancela el efecto de la primera.

Si en el circuito hubiese otros metales, por ejemplo en el caso de que el cable negro fuera de hierro, aparecería un potencial de contacto entre cobre y hierro, formándose una **cadena metálica** cobre-hierro-zinc. Mientras la cadena está cerrada presentará una bajada de potencial de 0,1 V entre la primera

Experiencia fundamental: Si ponemos en contacto una placa de zinc con otra de cobre y medimos la diferencia de potencial entre ambas con un aparato de alta resistencia, no detectamos ninguna diferencia de potencial mientras están en contacto. Pero al separar las placas, el voltímetro acusa una diferencia de potencial de aproximadamente 0,5 V, siendo el cobre el de mayor potencial.

Entre las placas separadas se detecta lógicamente un campo eléctrico, constituyendo el conjunto un condensador de aire cargado.

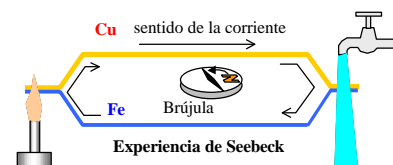
Potencial de contacto:
difusión de electrones del cobre al zinc



interfase cobre-hierro, una nueva bajada de 0,4 V en la unión hierro-cinc y por último una subida de potencial en la última unión (de cierre) cinc-cobre de 0,5 V. Como se ve, la suma de esas diferencias de potencial es cero, lo que explica que por el circuito cerrado no circule corriente, y que se detecte una diferencia de potencial entre los diferentes metales sólo cuando se abre la cadena.

Efecto Seebeck

Seebeck observó en 1821 que un circuito de dos metales diferentes generaba un campo magnético (que desvía una brújula) cuando se calienta una unión manteniendo la otra más fría. En un principio el campo magnético no se relacionó con la aparición de una corriente eléctrica en el circuito, como realmente ocurre.¹⁶ Esta corriente es posible si admitimos que las uniones de la cadena cerrada no oponen exactamente su diferencia de potencial porque no están a la misma temperatura. Es decir que el **potencial de contacto** de Volta depende de la temperatura de la unión.



De acuerdo al modelo electrónico de los metales, es de esperar que el efecto Volta varíe con la temperatura. Recuérdese que la presión de un gas confinado en un recipiente depende de aquella y de su masa. Los electrones están en forma de gas dentro del volumen metálico. Un aumento de temperatura produce un aumento de presión tanto mayor cuanto más densidad de electrones haya, por lo que un aumento de temperatura influirá más en la presión del gas electrónico del cobre que en el del cinc. Por lo tanto, cuando aumenta la temperatura de una unión Cu/Zn debe aumentar la diferencia de potencial de equilibrio pasando de V a $V+\Delta V$ en la unión caliente. Si se cierra el circuito con otra unión Cu/Zn más fría, que sólo produce una diferencia de potencial V , la diferencia de potencial en el circuito cerrado deja un saldo de ΔV , y por dicho circuito de resistencia eléctrica R circulará una intensidad de corriente $I = \Delta V / R$.

Efecto Peltier

Si mediante un generador hacemos que una corriente eléctrica remonte el potencial de contacto de una unión, aquella se llevará energía de la unión en forma de calor y la devolverá sobre la otra unión, donde se opera la caída de potencial. Si no se le repone el calor perdido, la primera unión tenderá a disminuir su temperatura y la segunda tenderá a elevarla, si no se la refrigera. Si se elimina el generador, la corriente fluirá en sentido contrario, como en la experiencia de Seebeck, hasta que las temperaturas de las uniones sean iguales, en cuyo caso la corriente será nula. Este efecto reversible fué estudiado por el físico francés J. A. Peltier en 1834.

Termodinámica de la conducción eléctrica - Efecto Thomson

No sólo en la interfase entre dos metales diferentes se genera un escalón de potencial. Cualquier inhomogeneidad a lo largo de un mismo material que altere su densidad electrónica lo produce. Por ejemplo, una impureza, o un cambio de orientación molecular, o una diferencia de temperatura a lo largo de un conductor metálico de un mismo material produce diferente densidad en el gas electrónico entre zonas diferentes. En el caso de una diferencia de temperatura, el gas de la parte más caliente difunde sus electrones hacia la zona más fría, quedando ésta con un potencial menor. De la misma forma que en el efecto Peltier, el paso de la corriente que remonta o baja la rampa de potencial debida a la variación de propiedades del material, toma o da calor en forma proporcional a la intensidad de la corriente.

El efecto de la temperatura fué estudiado desde el punto de vista de la termodinámica por el famoso físico inglés W.Thomson (Lord Kelvin) en 1855:

Supuso Thomson que el gas de electrones evolucionaba de T_1 a T_2 , transformando una cantidad de calor Q en trabajo L . Según la conocida relación de Carnot (ver segundo principio de la termodinámica) existe una función entre el calor transformado en trabajo y las temperaturas entre las que opera una máquina reversible perfecta. Este rendimiento, que no puede superarse en ningún proceso, se expresa con la relación entre temperaturas $(T_1-T_2)/T_1$, de manera que es

$$L = Q \cdot (T_1 - T_2) / T_1 = Q \cdot \Delta T / T$$

El paso de una corriente por un trozo de circuito a lo largo del cual se verifica un cambio de potencial ΔV creado por alguna causa (inhomogeneidad o potencial de interfase), requiere una potencia eléctrica igual al producto de la corriente I por la diferencia de potencial ΔV . En el caso de un aumento de potencial, se almacena la energía en el fluido eléctrico que va pasando en el sentido de la corriente, y puede aprovecharse sobre el resto del circuito. La energía puesta en juego en este pasaje es eléctrica, y por lo tanto vale $\Delta V \cdot I \cdot t = Q \cdot \Delta T / T$ de donde:

$$\Delta V = Q / I \cdot T \cdot \Delta T \quad (Q/t \text{ es el flujo de calor en Watt que entra o sale de la unión}).$$

Según la teoría de Thomson, el potencial de contacto ΔV aumentará con la diferencia de temperatura ΔT entre uniones caliente y fría, pero el aumento irá disminuyendo con la temperatura T de la unión fría.

La experiencia avala estos resultados con bastante exactitud, lo que indica que la teoría termodinámica de Thomson para la conducción eléctrica es correcta. Puede admitirse que en el interior de los metales existe un **gas de electrones** con muchas de las propiedades de los gases moleculares, entre ellas una ecuación de estado parecida a $pV = nRT$, y un calor específico determinado

Generadores termoeléctricos - Termocuplas

El efecto Peltier es reversible, y se emplea para transformar calor en trabajo eléctrico (generador termoeléctrico) o bien trabajo eléctrico en **bombeo de calor** desde una fuente fría a otra caliente (refrigerador).

La transformación de calor en trabajo eléctrico se usa para medir diferencias de temperatura más que para producir energía eléctrica, ,

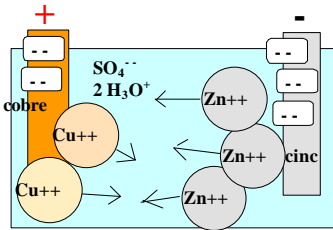
¹⁶ Para esa fecha, Oersted descubrió que era la corriente la responsable de la desviación magnética (ver más adelante "Experiencia de Oersted")

Una **termocupla** se fabrica uniendo fuertemente (mejor por soldadura) un par de alambres de distinto material, por ejemplo cobre/hierro, y colocando esta soldadura dentro del ambiente cuya temperatura se desea medir. Para evitar que se quemem los metales en ambientes oxidantes, se protege la soldadura con una vaina de porcelana.

El circuito se cierra a través de un medidor de diferencia de potencial, cuya lectura es proporcional a la diferencia de temperatura entre la unión caliente (dentro del horno) y la unión fría exterior (entre el cable de hierro y el borne de cobre del aparato medidor).

También se usan generadores de electricidad con pares de **bismuto antimonio**, que presentan un elevado efecto termoeléctrico. Mientras que una unión cobre/hierro entre 0°C y 100 °C presenta una diferencia de potencial de 1 milivolt, una de bismuto/antimonio tiene seis veces más. Se estudiará más adelante el fenómeno de potenciales de contacto entre sustancias no metálicas que entran en la categoría de los "semiconductores".

Generadores electroquímicos



Se forma una **celda o generador electroquímico elemental** (llamado vulgarmente **pila**) colocando en un baño electrolítico dos electrodos de metales diferentes: por ejemplo **cobre** y **cinc** en una solución de ácido sulfúrico. El cinc tiende a disolverse en el ácido en mayor medida que el cobre, que es mucho menos reactivo.

Podemos así esquematizar la disolución de un metal mediante el pasaje de un átomo de la barra metálica a la solución en forma de **cati6n** (átomo que ha perdido dos electrones y por lo tanto posee carga neta positiva, dejando igual número de cargas negativas en la barra). La tendencia a producir mas iones del cinc frente al cobre se ha representado en la figura con una relación de 3 a 2 puramente indicativa y no cuantitativa, que sólo quiere significar que el balance de cargas negativas sobre los electrodos metálicos favorece a aquél. Los químicos miden esa tendencia a través de una variable que tiene dimen-

siones de presión (presión de disolución) como si en el metal hubiera un gas de iones que tiende a pasar a la solución. El pasaje de iones, o sea la reacción química de ataque del ácido sobre el metal, no procede dentro de la pila a circuito abierto porque en tal caso se genera una diferencia de potencial entre solución y metal, que equilibra y detiene la disolución. A circuito cerrado no se cumple la cancelación de los potenciales de contacto en toda la vuelta que vimos en el caso de las cadenas metálicas porque la solución no se comporta electrónicamente como un metal. Se establece así una corriente a través del circuito a costa de la energía que liberan las reacciones iónicas dentro de la pila. ,

Desde el punto de vista eléctrico, la facilidad de reacción es inversamente proporcional a la diferencia de potencial entre el metal y la solución de sus iones. El metal es siempre negativo con respecto a la solución.

La diferencia de potencial entre la solución de ácido V_{sol} y el cobre V_{Cu} es igual a

$V_{sol}-V_{Cu}=0,44\text{ V}$. En cambio entre la solución y el Zn existe una diferencia de potencial mayor $V_{sol}-V_{Zn}=1,5\text{ V}$, que corresponde a la mayor reactividad del cinc con el ácido. La diferencia de potencial de la pila a **circuito abierto** será

$V_{Cu}-V_{Zn} = 1,5-0,44 = 1,06\text{ V}$ a temperatura ambiente.

Alejandro Volta, el mismo que estudió el fenómeno de la aparición de los potenciales de contacto en las cadenas metálicas, construyó en 1800 el primer generador electroquímico. Constaba de una **pila** (de allí su nombre) de discos de cobre y cinc entre los que intercalaba paños embebidos en ácido sulfúrico. De esta manera colocaba varios elementos en serie (ver

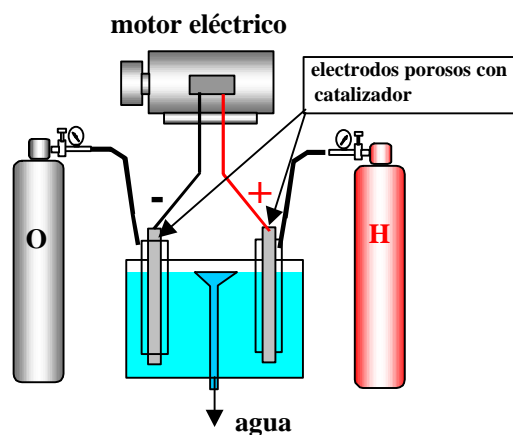
figura), sumando sus diferencias de potencial entre extremos.

La celda electroquímica más popular es la vulgar **pila seca** de linterna, que es un derivado del dispositivo inventado por Leclanché el siglo pasado. Constaba de un vaso cilíndrico de cinc que oficia de electrodo negativo, dentro del cual está el electrolito (solución de cloruro de amonio ($CINH_4$)). Para permitir el funcionamiento del aparato en cualquier posición y evitar que se derrame el electrolito, éste impregna una sustancia porosa inerte (celulosa). En el eje del cilindro se coloca el electrodo positivo (barra de grafito recubierta de una sustancia oxidante, como el bióxido de manganeso (MnO_2)). El ion cloruro (Cl^-) ataca al Zn produciendo Zn^{++} . El ion amonio NH_4^+ pasa a amoníaco más un protón, que se oxida con el MnO_2 pasando a formar agua. La diferencia de potencial a circuito abierto de una pila Leclanché es de 1,5 V a la temperatura ambiente, creciendo con ésta, ya que la temperatura favorece la actividad química.

En un generador (electroquímico o de otro tipo) en realidad lo que se "genera" no es electricidad en forma de cargas eléctricas¹⁷ sino energía eléctrica, confiriendo energía potencial a las cargas del circuito a costa de energía química (como en el caso de las pilas) o mecánica (como en las dinamos). El equivalente hidráulico de un generador es una bomba, que eleva la presión del agua entre su boca de entrada (polo negativo) y la de salida (polo positivo). Los generadores son la parte "activa" del circuito del que forman parte. Presentan también resistencia al paso de la corriente eléctrica que los atraviesa, ya que están constituidos por conductores (electrolitos en las pilas o bobinados en las dinamos). Esta **resistencia interna** de los generadores hace que la diferencia de potencial entre sus extremos sea menor cuando están a circuito cerrado (y por lo tanto circula corriente) que cuando están a circuito abierto. A la diferencia de potencial de un generador a circuito abierto se la llama **fuerza electromotriz**. En general aumenta con la temperatura en los generadores electroquímicos, ya que la misma favorece las reacciones químicas que le dan origen.¹⁸

¹⁷**Las cargas eléctricas no se crean ni se aniquilan:** pueden anularse con otra igual de signo contrario o manifestarse al separar cargas opuestas. La conservación de la carga eléctrica es una de las leyes naturales que no conoce excepción, no como la conservación de la masa, que no rige a escala atómica (por ejemplo en las reacciones nucleares).

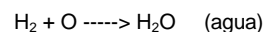
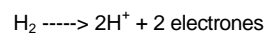
¹⁸**La resistencia interna de una pila** de linterna es de aproximadamente $1\ \Omega$ y su fuerza electromotriz (1,5 V) es sensiblemente mayor que la diferencia de potencial a circuito cerrado. En cambio la resistencia interna de una batería de auto es apenas de algunas décimas de Ohm y puede despreciarse frente a los de los otros elementos del circuito. Su fuerza electromotriz es sensiblemente igual a la diferencia de potencial entre sus bornes aún cuando esté conectada a un circuito que consuma corrientes importantes, como el de las luces altas (hasta 15 A)



Esquema de una celda de combustible

Celdas de combustible

Una oxidación química cualquiera supone, según el sentido más amplio, un pasaje de cargas. Cuando se quema hidrógeno con oxígeno para formar agua, éste toma electrones del primero según las siguientes ecuaciones:



Si esos electrones se pudieran canalizar en un circuito externo, tendríamos una forma de transformar energía de combustión directamente en energía eléctrica, sin necesidad de usar ninguna máquina térmica intermedia.

Con un rendimiento más alto que el de la mejor usina térmica (45%), la transformación directa de energía de combustión en electricidad puede llevarse a cabo en un dispositivo muy parecido a una celda electroquímica ordinaria, llamado "**celda de combustible**". La celda de combustible posee también dos electrodos sumergidos en un baño conductor. El oxígeno se dosifica desde un depósito sobre uno de los electrodos, que es poroso y contiene un catalizador para favorecer la reacción. Allí se reduce liberando electrones (cátodo). Una corriente controlada del combustible (por ejemplo hidrógeno) proveniente de otro depósito se oxida sobre el otro electrodo de estructura similar (ánodo). Ambos electrodos están en contacto con un mismo medio conductor, por ejemplo un electrolito, que cierra el circuito por adentro de la celda.

A diferencia de las pilas, las celdas de combustible no poseen electrodos activos que tomen parte en las reacciones químicas y se gasten. Los electrodos de una celda de combustible no se consumen. Sólo ofician de soporte y medio adecuado de los gases que reaccionan sobre ellos. La diferencia de potencial depende de la energía química de la oxidación. La cantidad de corriente depende de la cantidad de materias reaccionantes suministradas.

Semiconductores

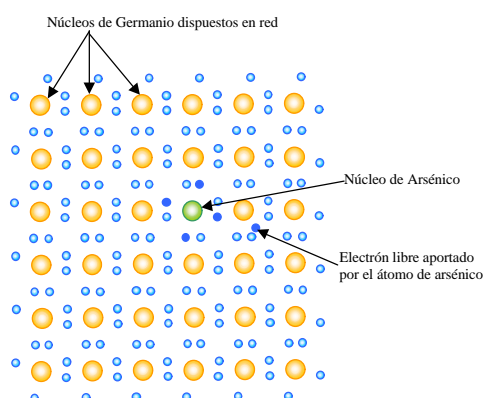
Generalidades

Vimos que las sustancias conductoras de la electricidad lo son gracias a partículas cargadas libres en su estructura. Los metales tienen un **gas de electrones**. Los electrolitos tienen átomos con carga móviles.(iones)

Las sustancias aisladoras no permiten el curso de la electricidad ya que tienen cargas "ancladas" a su estructura. con una posibilidad de desplazamiento restringido alrededor de su posición de equilibrio.

Con características en cierto modo intermedias entre conductores metálicos y aisladores sólidos, existen sustancias llamadas "**semiconductores**". De ordinario son aisladoras, pero pueden pasar a ser conductoras con un aumento de temperatura o cuando se les agrega una pizca de cargas libres. Ese agregado o "dopping" puede obtenerse por ejemplo impurificándolas con otra sustancia que tienda a ceder electrones o cargas positivas¹⁹.

Estructura de un semiconductor



Semiconductores típicos son los elementos **Si** (silicio) y **Ge** (germanio), que pertenecen al grupo IV de la tabla periódica. Sus átomos poseen cuatro electrones en su capa exterior. Esos electrones generan una **unión covalente** con los correspondientes electrones de los átomos vecinos al aparearse entre sí. Se forma así una red cuya estructura se esquematiza en la figura, donde no hay electrones libres para la conducción. De hecho se comprueba que los elementos silicio o germanio puros son aisladores a temperatura ambiente²⁰.

Pero si se provee una carga en el seno de esa estructura cristalina, la misma queda prácticamente libre de vínculos con los núcleos y puede circular, transformándose el material en conductor. Esa "donación" de cargas puede hacerse mediante la inclusión en esa red de unos pocos átomos de un elemento parecido desde el punto de vista del núcleo (para que se pueda acomodar en la misma red), pero diferente desde el punto de vista electrónico.

Por ejemplo, uno del grupo V, que posee cinco electrones externos en vez de cuatro, como es el caso del **fósforo** (P) en una red de silicio, o del **arsénico** (As) en una red de Germanio. El electrón sobrante de las uniones de este átomo polizón con los átomos vecinos no participará de

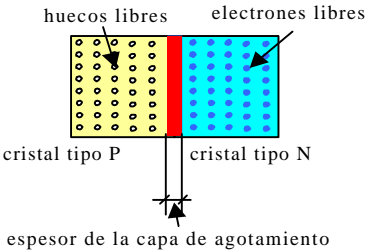
unión covalente y podrá circular casi libremente por entre los núcleos de la red. También se puede agregar al elemento del grupo IV, una pequeña canti-

¹⁹ El empleo de materiales semiconductores en componentes eléctricos (diodos, transistores y en general microcircuitos, vulgarmente llamados "chips") comenzó después de la 2ª guerra mundial, permitiendo un avance importantísimo en las comunicaciones y la informática, al reemplazar a las válvulas electrónicas (o lámparas de radio) por equivalentes de estado sólido más pequeños, baratos y confiables.

²⁰ En un semiconductor, los electrones de las uniones pueden abandonar éstas por efecto de la temperatura y participar de la conducción eléctrica.

dad de átomos de un elemento vecino del **grupo III**, que en vez de poseer cinco electrones externos sólo tiene tres, los cuáles van a participar de la unión con los átomos vecinos. El electrón faltante es equivalente a una burbuja positiva en la red. La circulación de ese hueco electrónico o burbuja aportada por el elemento **galio** (Ga) en una red de germanio se realiza de la misma manera que si hubiera una partícula con carga positiva libre.

Los semiconductores que han sufrido un proceso de **impurificación controlada** con donantes de electrones, como el fósforo o el arsénico, se llaman "**cristales del tipo N**" (negativos) y los que contienen impurezas del grupo III se llaman "**cristales del tipo P**" (positivos)²¹



Unión PN

Una unión de dos cristales PN presenta propiedades especiales: por ser dos materiales de diferente naturaleza electrónica, se produce una migración de cargas en una capa fina a ambos lados de la unión. Ese fenómeno crea una diferencia de potencial de contacto, como se vió en el caso de dos metales de diferente naturaleza. El bloque P queda a un potencial menor que el N, ya que los electrones del bloque N se difunden en él, tendiendo así a equilibrar la densidad electrónica a ambos lados de la unión.

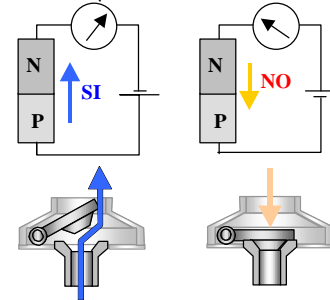
La unión entre metales produce un salto de potencial pero sin alterar la conductividad del conjunto, ya que en los metales siempre hay cargas libres. En cambio a ambos lados de la unión polarizada PN se produce una capa fina en la que no hay prácticamente cargas libres, pues se recordará que los materiales semiconductores puros son aisladores si las temperaturas no superan los

ESQUEMA DE UNA UNIÓN PN

50°C. Resulta así que una unión PN es un pequeño condensador cargado. El espesor de esa capa aisladora (que se da en llamar "**capa de agotamiento**" o "**capa de barrera**"), y consecuentemente la capacidad del condensador, son función de la diferencia de potencial aplicada entre los bloques P y N

El espesor de la capa de agotamiento crece (y disminuye la capacidad eléctrica del conjunto) cuando el bloque P disminuye su potencial, ya que así repele los electrones libres hacia el bloque N. La capa se hace más fina cuando el potencial de P se eleva con respecto al de N, y así llega a desaparecer cuando el potencial de P es superior a N en un cierto valor.

En tal caso, el conjunto PN permite el paso de corriente desde P a N, bloqueando la inversa de N a P: se tiene así una válvula de corriente, o **diodo PN**, que funciona en forma análoga a una válvula de retención en un circuito hidráulico.



ANALOGÍA HIDRÁULICA DE UN DIODO DE CRISTAL

Conducción eléctrica en gases

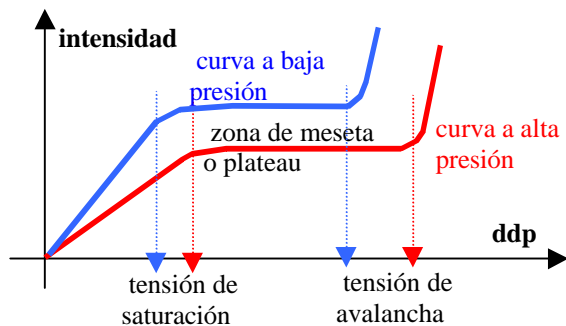
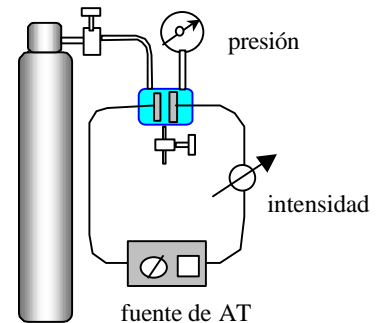
Generalidades

Los gases secos a temperatura y presión ordinaria conducen muy poco la electricidad cuando están sometidos a campos eléctricos moderados (hasta 10^5 V/m). Sin embargo, cuando el valor del campo eléctrico llega a cierto límite, el gas pasa a conducir en forma franca. El valor del campo bajo el cual se opera este pasaje a la conducción franca es proporcional a la presión (Ley de Paschen).

Experiencia

Para estudiar la conducción en gases se usa un aparato que consiste en dos electrodos dentro de una ampolla rellena con el gas a estudiar a presión controlada. Los electrodos se conectan a una fuente de tensión ajustable, intercalando en el circuito un aparato de medida de corrientes débiles.

Si representamos la corriente que atraviesa la masa de gas a presión constante en función de la diferencia de potencial aplicada, obtendremos una curva con un arranque de pendiente constante ascendente hasta un determinado valor de la ddp a partir del cual se estabiliza en una **meseta** (plateau). La zona de meseta se extiende hasta una ddp en la que el gas se hace conductor en forma abrupta, lo que se reconoce por un aumento súbito de la corriente a valores muy grandes, prácticamente limitados por la resistencia del resto del circuito, incluyendo a la fuente.



- el frotamiento interno entre moléculas
- la radiación electromagnética externa (calor, luz, ultravioleta o radiación cósmica)

Modelo

Se puede imaginar un modelo en el que se operan una serie de mecanismos que expliquen este comportamiento:

Partiendo de la base de que si un material conduce es porque contiene portadores de carga, podemos imaginar que la masa de gas posee normalmente algunas de sus moléculas ionizadas, o sea con carga, que son las responsables de la conducción bajo los efectos de un campo eléctrico.

Las dos causas más comunes de la presencia de esas moléculas cargadas (iones) en una masa de gas cualquiera en condiciones normales son:

²¹ La impurificación es del orden de las partes por millón, y se realiza industrialmente con técnicas especiales.

Estos agentes producen un par de iones de signos contrarios a partir de dos moléculas neutras al desbalancear su carga. Mientras existan moléculas libres con carga, a mayor campo habrá mayor flujo de ellas, como ocurre con el gas de electrones en un metal.

Pero, ¿por qué se estabiliza la corriente en un determinado momento?

Porque el proceso de formación de pares de iones por frotamiento se equilibra con el efecto opuesto de recombinación entre ellos para volver a dar dos moléculas neutras.

Esta **recombinación**, que es proporcional a la concentración de iones, es al principio débil con campos débiles, se refuerza luego con campos fuertes y equilibra entonces el proceso de ionización por frotamiento y radiación.

A mayor campo acelerador aumenta el proceso de recombinación. La mayor velocidad de los portadores se compensa en la zona de plateau con su cantidad cada vez menor. Esta situación cambia cuando el campo acelerador crea una velocidad tan grande que los choques entre moléculas de gran energía cinética comienzan a producir ionización a mayor ritmo que el de recombinación (estado de avalancha).

Plasma

En estado de avalancha, la masa de gas es sede de una corriente eléctrica intensa, que genera calor, aumentando su temperatura. Esa temperatura es una medida macroscópica de la energía cinética promedio de las moléculas, que chocan furiosamente entre sí arrancándose cargas cada vez en mayor medida. La producción de iones dentro de la masa de gas, representado por la conductividad, crece y crece. El flujo de cargas, o sea la intensidad de la corriente eléctrica también va en aumento mientras se mantenga el campo. La masa de gas conductora caliente llega así a un estado de la materia denominado "plasma"²² en el que coexisten en forma de gas moléculas neutras y cargadas con diferentes signos, junto con protones y electrones libres. Un flash electrónico utiliza un tubo de gas a baja presión que llega al estado de plasma mediante una descarga eléctrica. Un rayo es un largo tubo de aire en estado de plasma.

Al plasma se lo considera el cuarto estado posible de la materia, (además del sólido, el líquido y el gaseoso) porque no es precisamente un gas sino un fluido complejo con moléculas neutras y cargas libres de ambos signos, que interactúan mecánica y eléctricamente entre sí, formando un sistema que no está en equilibrio a la manera de un gas ordinario.

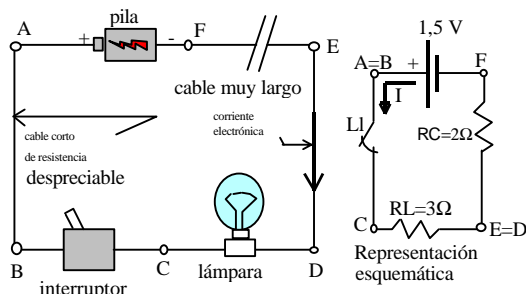
El 99% de la materia del universo está en forma de plasma. Las brillantes estrellas que nos rodean son globos de plasma a alta temperatura. Los espacios interestelares, que contienen partículas neutras y con carga, pueden considerarse "plasmas" de baja temperatura.

La física del plasma ha tomado gran importancia desde 1950, año en que se comenzó a estudiar con fines prácticos, como medio fluido apropiado para mantener reacciones nucleares de fusión. Para esa fecha nació la magneto-hidrodinámica o MHD, una rama de la mecánica de fluidos que estudia al plasma como un fluido complejo cuyo movimiento importa además de los clásicos efectos inerciales, fenómenos eléctricos y magnéticos a causa de sus cargas en movimiento.

Los campos magnéticos de los astros tienen origen en fenómenos magnetohidrodinámicos que se operan en su interior fluido o en sus atmósferas externas.

Circuitos eléctricos: su representación con elementos eléctricos puros

Para dibujar un circuito eléctrico se utilizan símbolos que representan la fuente (pila, batería, generador eléctrico), las resistencias de los elementos que forman parte del circuito (cables o conductores de distinto tipo), pero no se dibujan los elementos físicos propiamente dichos con su verdadera geometría.



Un cable que en la realidad puede ser muy largo se representa en el circuito por una línea en zigzag corta con un número que es el valor de la resistencia eléctrica de aquél.

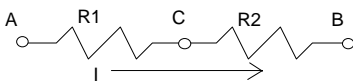
Se dibujan enlaces entre puntos entre los que no hay diferencia de potencial mediante una línea llena: estos enlaces no tienen por qué responder a conductores reales en el circuito verdadero. Son necesarios porque las resistencias de los elementos del circuito se separan de su soporte físico y se concentran en un símbolo. Podemos imaginar a las líneas llenas de los circuitos como conductores muy gruesos y cortos, de resistencia despreciable frente a los de los otros elementos.

En el circuito de la figura podemos plantear que el potencial va cayendo si nos movemos en el sentido de la corriente. Partiendo de $A=B$ con un potencial V_A atravesamos el interruptor sin caída de potencial hasta llegar a la resistencia representativa de la lámpara R_L (punto C). A través de ella el potencial cae en $-R_L \cdot I$. Llegamos así al punto $E=D$. Luego atraviesa la resistencia representativa del cable R_C cayendo nuevamente el potencial en un valor $R_C \cdot I$ hasta llegar al punto F .

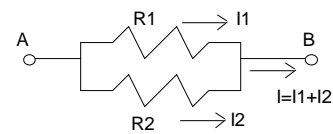
Todo esto se puede expresar así: $V_A - R_L \cdot I - R_C \cdot I = V_F$ es decir que :

$$V_A - V_F = (R_L + R_C) \cdot I, \text{ o sea que } I = (V_A - V_F) / (R_L + R_C) = 1,5 \text{ V} / 5 \text{ W} = 0,3 \text{ A}$$

²² El nombre de plasma proviene de las primeras observaciones de Langmuir, que introdujo el término en 1923 observando las oscilaciones de una descarga eléctrica en un gas, que se movía como si tuviera consistencia gelatinosa, recordando al plasma sanguíneo.



De paso vemos que la resistencia equivalente de una sucesión (o serie) de resistencias es igual a la suma de las mismas.



Resistencias en serie y en paralelo

Por ejemplo en la figura adjunta se tiene que la resistencia entre los extremos A y B en el caso de las resistencias en serie (esquema de arriba) es la suma de ambas puesto que

$$V_A - V_B = (V_A - V_C) + (V_C - V_B) = R_1 \cdot I + R_2 \cdot I = I (R_1 + R_2).$$

En cambio en el caso de las resistencias en paralelo (esquema de abajo), la resistencia equivalente entre A y B se calcula como sigue:

Circulando por R_1 se tiene : $V_A - R_1 \cdot I_1 = V_B$ $I_1 = (V_A - V_B) / R_1$
 Circulando por R_2 se tiene : $V_A - R_2 \cdot I_2 = V_B$ $I_2 = (V_A - V_B) / R_2$

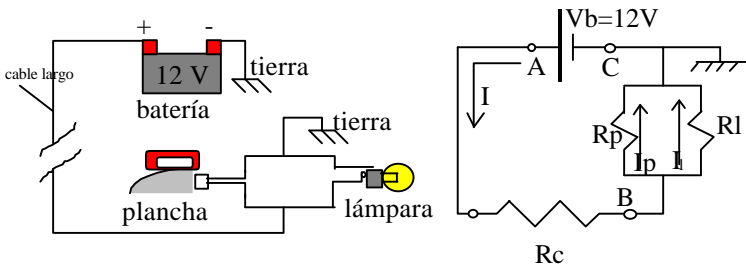
Además dado que la corriente eléctrica se comporta como un fluido incompresible se verifica que la suma de las corrientes de cada rama en paralelo $I_1 + I_2$ es igual a la corriente total I por la rama principal.

Entonces si $I_1 + I_2 = I$ resulta sumando las expresiones anteriores:

$$I = (V_A - V_B) [(1/R_1) + (1/R_2)]$$

El corchete es equivalente a $1/R_{AB}$ de acuerdo a la ley de Ohm, por lo que podemos poner : $R_{AB} = (R_1 \cdot R_2) / (R_1 + R_2)$

Resolución de un circuito con ramas en serie y en paralelo



Consideremos el circuito de la figura, perteneciente a una casa rodante: una batería de 12 V alimenta en paralelo una luz (lámpara de 1 Ω) y una pequeña plancha de 0,5 W a través de un cable de cobre, de 15 m de largo y 2 mm² de sección, o sea que posee una resistencia de $R_c = r \cdot l / s = 15 / 572 = 0,13 \text{ W}$.

Entonces $R_p = 0,5 \text{ W}$ $R_l = 1 \text{ W}$ $R_c = 0,13 \text{ W}$

Lo que se indica por "tierra" es en realidad la "masa" del vehículo, o sea el bastidor metálico de la casa rodante y del auto, que están conectados entre sí y con el polo negativo de la batería. Este bastidor (o chasis) está construido con perfiles de hierro de sección relativamente grande y por lo tanto presenta en conjunto una resistencia despreciable al paso de la corriente, así que entre las dos tomas de tierra señaladas no existe diferencia de potencial.

Partiendo del positivo de la batería recorramos el circuito en el sentido de la corriente:

$$V_A - R_c \cdot I - R_{BC} \cdot I = V_C, \text{ de lo que resulta } I = (V_A - V_C) / (R_c + R_{BC})$$

Pero ya vimos que por tratarse de resistencias en paralelo R_l y R_p , la equivalente entre los puntos B y C vale $R_{BC} = R_p \cdot R_l / (R_p + R_l) = 0,5 / 1,5 = 1/3$

Estamos listos para reemplazar los valores en las fórmulas y calcular numéricamente la corriente principal I que atraviesa el cable largo y la batería.

$$I = (V_A - V_C) / (R_c + R_{BC}) = 12 / (0,13 + 1/3) = 25,9 \text{ A}$$

Para calcular las corrientes que pasan respectivamente por la lámpara y por la plancha, y cuya suma será igual a I, debemos repartir dicha corriente total I por ambas ramas, sabiendo que la rama más resistiva llevará una proporción menor que la rama más resistiva: En efecto ya que la diferencia de potencial entre B y C debe coincidir al circular por una o la otra rama, podemos escribir:

$$V_B - V_C = R_p \cdot I_p = R_l \cdot I_l \text{ de lo que resulta } I_p / I_l = R_l / R_p \text{ y como además es } I_p = I - I_l, \text{ reemplazando en la anterior queda}$$

$$(I - I_l) / I_l = R_l / R_p \text{ la que nos permite despejar}$$

$$I_l = [R_p / (R_l + R_p)] \cdot I$$

La fórmula anterior nos dice que la corriente total I se canaliza por cada rama según la relación entre la resistencia de la otra rama y la suma de ambas. Tenemos así que:

$$I_l = [R_p / (R_l + R_p)] \cdot I = [0,5 / 1,5] \cdot I = 1/3 = 8,63 \text{ A}$$

$$I_p = [R_l / (R_l + R_p)] \cdot I = [1 / 1,5] \cdot I = 2/3 = 17,27 \text{ A}$$

Podemos comprobar que $I_p + I_l = I$

Circuito "puente" de Wheatstone

En el circuito de la figura recorriendo el camino **CAD** es:

$$V_C + R_1 \cdot i_1 - R_3 \cdot i_3 = V_D \text{ de donde}$$

$$V_C - V_D = R_3 \cdot i_3 - R_1 \cdot i_1$$

y recorriendo el camino **CBD** es:

$$V_C - R_2 \cdot i_2 + R_4 \cdot i_4 = V_D \text{ de donde}$$

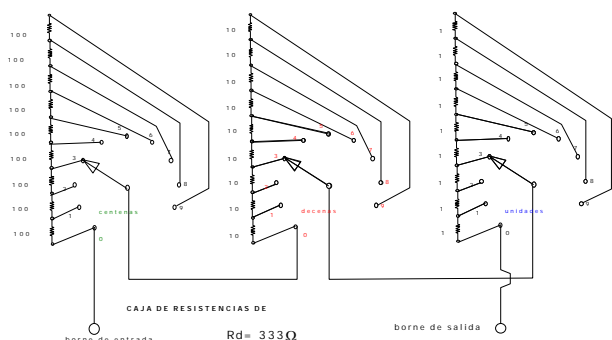
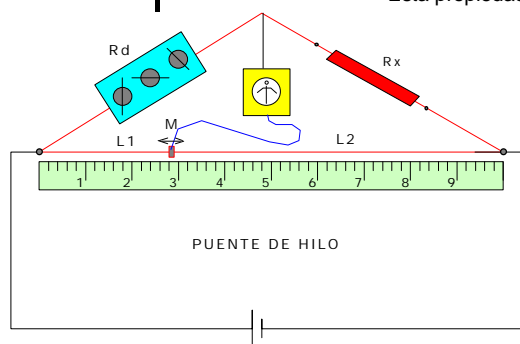
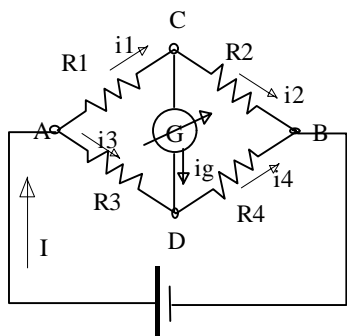
$$V_C - V_D = R_2 \cdot i_2 - R_4 \cdot i_4$$

Cuando el galvanómetro **G** no indica corriente derivada por el puente ($i_g=0$) es porque $V_C - V_D = 0$ por lo cual $R_3 \cdot i_3 = R_1 \cdot i_1$ y $R_4 \cdot i_4 = R_2 \cdot i_2$

Dividiendo miembro a miembro estas dos últimas ecuaciones y teniendo en cuenta que cuando $i_g=0$ es $i_1=i_2$ e $i_3=i_4$, resulta $R_3/R_4 = R_1/R_2$ o también $R_1 \cdot R_4 = R_2 \cdot R_3$, o sea que:

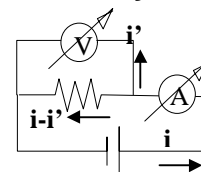
Cuando el puente está equilibrado los productos de las resistencias cruzadas son iguales

Esta propiedad del circuito lo hace apto para medir resistencias. En efecto, si en un puente equilibrado se conoce el valor de tres de las resistencias, por ejemplo R_2, R_3 y R_4 , la cuarta vale $R_1 = R_2 \cdot R_3 / R_4$. Para medida de resistencias se usa normalmente un "puente de hilo" que consta de un alambre conductor continuo homogéneo de sección s y resistencia específica r colocado a lo largo de una regla. R_x es la resistencia a medir y R_d es una caja de resistencias variable por décadas, cuyo esquema se indica en la figura. Sobre el alambre desliza el contacto móvil M del puente que se posiciona a distancias L_1 y L_2 de los extremos tales que el galvanómetro marque cero. Así el producto de las resistencias cruzadas será el mismo, o sea que $R_x \cdot r \cdot L_1 / s = R_d \cdot r \cdot L_2 / s$ y como el alambre es homogéneo se puede simplificar r y s en ambos miembros con lo cual resulta que $R_x = R_d \cdot L_2 / L_1$. Por ejemplo en la figura es $R_x = R_d \cdot 72 / 28$. El error es grande si el equilibrio se logra en puntos cercanos a los extremos de la regla: en ese caso debe variarse R_d para que el punto de equilibrio se acerque a la mitad y la precisión de la medición mejore. ¿Por qué?



Medida de resistencias con voltímetro y amperímetro

La medida directa de la resistencia de un trozo de circuito se hace dividiendo la diferencia de potencial V entre sus extremos por la intensidad de la corriente que lo atraviesa. Las mediciones deben hacerse respectivamente con un voltímetro V de alta resistencia y un amperímetro A^{23} de escasa resistencia. Con el circuito de la figura discuta el error cometido al despreciar la pequeña corriente i' que circula por el voltímetro.



Energía y potencia asociada a una corriente eléctrica

Cuando una corriente eléctrica circula entre dos puntos de diferente potencial, las cargas aumentan o disminuyen su energía según el potencial suba o baje al ir de un punto al otro: El primer caso se produce dentro de los generadores (por ejemplo las pilas y acumuladores, que son generadores electroquímicos); las cargas pierden energía cuando van pasando sucesivamente por puntos de potencial decreciente, por ejemplo a través de conductores, los que como vimos poseen resistencia eléctrica.

La energía que pierde una carga $+q$ que baja de un potencial V_2 a otro menor V_1 vale $(V_1 - V_2) \cdot q$. Como $V_1 < V_2$ su valor es negativo, lo que debe interpretarse como que el sistema pierde energía. Inversamente la energía que es necesario dar a una carga para que remonte desde un potencial V_1 a otro mayor V_2 vale $(V_2 - V_1) \cdot q$, es decir igual valor y signo contrario al anterior. El signo positivo de esta energía significa que ésta debe suministrarse al sistema a través de la ejecución de un trabajo, en vez de obtenerla del mismo como en el caso anterior. Notemos que debemos restar siempre el potencial final del potencial inicial para que el signo sea positivo si ascendemos y negativo si bajamos.

Vimos que la intensidad de una corriente eléctrica I se define por el cociente carga/tiempo ($I=q/t$). Podemos poner por lo tanto que la energía necesaria para pasar una corriente I durante un tiempo t desde un potencial V_2 a otro V_1 vale

$$L = (V_1 - V_2) \cdot I \cdot t \text{ [J]}$$

Si hacemos valer la relación entre diferencia de potencial, resistencia R y corriente I , que es $(V_2 - V_1) = R \cdot I$ (ley de Ohm), la fórmula anterior se transforma en

$$L = R \cdot I \cdot I \cdot t = R \cdot I^2 \cdot t$$

²³ Siendo r la resistencia del voltímetro por él se deriva una corriente $i' = V/r$ que no pasa por la carga. La resistencia calculada vale V/i mientras que la real es mayor: $V/(i-i')$

La energía que se obtiene del paso de una corriente eléctrica a través de una resistencia no puede ser en forma de trabajo mecánico porque éste supone una fuerza que actúa sobre una trayectoria, y un conductor con corriente no produce tal efecto. En cambio la energía involucrada genera calor, empleado en calentar el elemento conductor. Ése calor a su vez pasa al ambiente a través de algún proceso de enfriamiento (transmisión por conducción, convección o radiación).

Si queremos expresar la disipación térmica en términos de potencia P (cociente entre energía y tiempo $P=L/t$) podemos poner que $P = (V1-V2).I = RI^2$ [W]

Volviendo al problema anterior, la potencia disipada por la planchita de viaje será $Pp = Rp.Ip^2 = 0,5x(17,27)^2 = 149 W$, suficiente para llevarla rápidamente a una temperatura elevada como la necesaria para planchar tejidos de algodón.

La lámpara consumirá una potencia de $P_l = R_l.I_l^2 = 74,5 W$, como la de la luz alta de un faro de automóvil.

Hagamos otro Problema : Diseñar el elemento calefactor de un **calefón eléctrico** que debe calentar **50 litros** de agua desde **10 a 70 °C** en media hora. La diferencia de potencial de la red a la que debe ir conectado es de **220 V**.

La cantidad de calor necesaria para elevar **1°C** la temperatura de una masa de **1 Kg** de sustancia se llama calor específico. Sabemos que para el agua el calor específico vale **c=1 Kcal/Kg°C**

La cantidad de calor necesaria para elevar una masa **M = 50 Kg** (equivalente a 50 litros) de agua desde **Ti** hasta **Tf** vale:

$$DQ = c.M.(Tf-Ti) = 1x50x(70-10) = 3000 Kcal$$

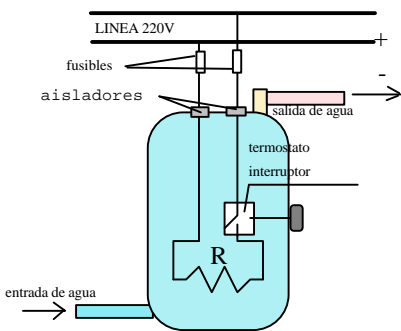
Debemos pasar esta energía calórica a unidades de trabajo a través del equivalente mecánico del calor, que vale **0,24cal/Joule = 0,00024 Kcal/Joule**

$$3000 Kcal \text{ equivalen a un trabajo } L = 3000/0,00024 = 12500000 J$$

desarrollados en media hora (**1800 s**) equivalen a una potencia

$$P = 12500000/1800 = 6944,44 W$$

Esta energía debe provenir del paso de una corriente de intensidad I a través de una resistencia R conectada a una fuente de $DV=220 V$



Es $I=DV/R$ y además $P=R.I^2$ y reemplazando la primera en la segunda resulta:

$$L = DV^2/R \text{ de donde } R=DV^2/P \text{ pero como } P=6944,44 W \text{ es}$$

$$R = 220^2/6944,44 = 6,97 W$$

La corriente que consumirá el aparato será de

$I = DV/R = 220/6.97 = 31,6 A$, valor bastante importante como para tener que alimentar eléctricamente al calefón con línea y fusibles independientes del resto de la casa. El termostato interruptor dibujado es un dispositivo bimetálico que corta la corriente cuando la temperatura del agua en la que está inmerso alcanza un valor ajustable desde la perilla exterior.

-0-0-0-

ELECTRICIDAD ATMOSFÉRICA

La **atmósfera terrestre** es asiento de importantes fenómenos eléctricos que liberan tremendas cantidades de energía. No sólo en las nubes sino también en las capas altas de la atmósfera existe gran actividad eléctrica. Toda esta energía proviene del sol, que produce los iones y es el origen de todos los movimientos atmosféricos.

Ionosfera: Desde 80 a 500 km de altura en la atmósfera existe una zona cargada negativamente compuesta de gases enrarecidos ionizados por la actividad solar. Se llama **ionosfera**. El conjunto **ionosfera/tierra** crea en ausencia de nubes un **campo eléctrico vertical** hacia arriba del orden de los **100 V/m**. La ionosfera cargada y conductora sobre todo durante el día, desempeña un papel importante al reflejar las ondas de radio de longitudes mayores a **30 metros** permitiendo así las comunicaciones alrededor del globo.

Las nubes almacenan gran cantidad de **carga eléctrica** a través de procesos internos que se describirán en seguida. Esa electricidad pasa a veces a otra nube cargada de signo contrario o a la tierra cargada por **influencia** produciendo respectivamente relámpagos y rayos. Ambos son intensas corrientes eléctricas del orden de las decenas de miles de A que duran menos de una milésima de segundo.

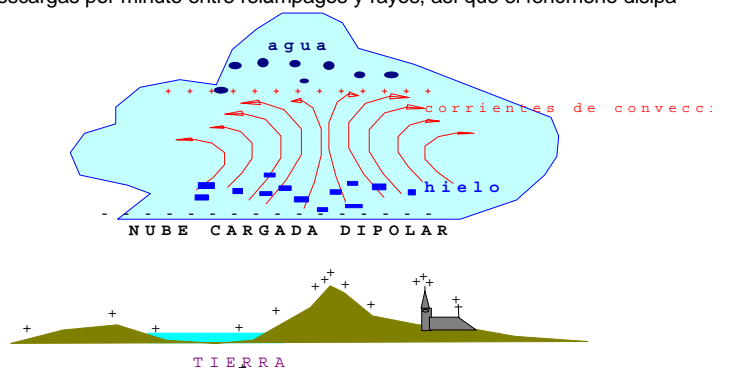
Dichas corrientes se transmiten por el **aire ionizado** en estado de **plasma** a temperaturas cercanas a **3000K**, que es un conductor excelente. Se calcula que para ionizar aire a la presión atmosférica e iniciar una descarga se necesita un campo del orden de **10⁶ V/m**. Esto significa que para producir una descarga entre nube y tierra a una distancia de **300 m** la diferencia de potencial entre ambas debe ser de **300 x 10⁶ V**

La energía de una descarga semejante está dada por el producto de la tensión entre **nube/nube** o **nube/tierra** multiplicada por la **corriente** y por el **tiempo**, vale decir **300 x 10⁶ V x 20000 A x (1/1000)s = 6 x 10⁹ J** : ¡ algo así como la energía que produce la Central de Atucha durante veinte segundos!...

En una tormenta de verano que abarque algunos km² se pueden contar varias descargas por minuto entre relámpagos y rayos, así que el fenómeno disipa durante su desarrollo más energía que la que consumiría toda la iluminación de esa zona si estuviera densamente poblada.

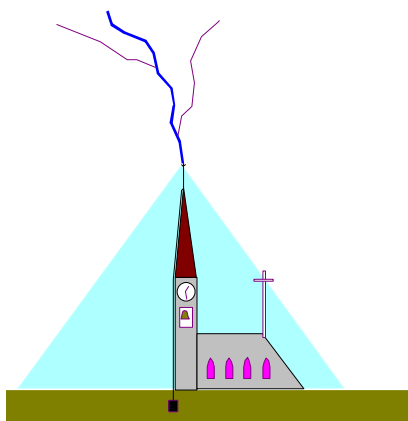
Desgraciadamente el almacenamiento de esa energía liberada en forma abrupta y caótica es prácticamente imposible con la tecnología actual.

Mecanismo de la carga de una nube: La mayoría de las nubes tormentosas están cargadas negativamente en la base y positivamente en su parte más



alta. Se supone que dicha po-larización está relacionada con la formación de hielo en el interior de la nube ya que sólo se observan relámpagos cuando se detecta hielo en las capas superiores de las nubes tormentosas. Los experimentos revelan que en la congelación de soluciones diluidas el hielo se carga negativamente mientras que la fase líquida lo hace positivamente. Esto hace suponer que el mecanismo de carga de las nubes ocurre cuando después de iniciada la congelación, el aire caliente ascendente desprende pequeñas gotas líquidas de los pedazos de hielo en el seno de la nube. Las gotas positivas van a la parte alta mientras que el hielo queda en la base, resultando así la polarización observada. Dentro de la nube polarizada, o entre ésta y otra nube, puede producirse una descarga en forma de relámpago con la consiguiente producción de calor, luz y onda sonora. Una nube polarizada induce sobre la tierra subyacente una gran acumulación de cargas positivas, situación que puede terminar en **rayo** cuando el campo supera al de ionización del aire.

El rayo tiene efectos devastadores para personas, animales, árboles y edificios que no tengan protección adecuada. A sus efectos eléctricos une su tremenda potencia calórica. La inducción electromagnética de su pulso electromagnético crea elevadas diferencias de potencial en conductores próximos. En líneas aéreas produce ondas errantes de alta tensión que encienden arcos eléctricos y disparan protecciones. Un árbol alcanzado por un rayo se incendia o se parte. Animales y personas mueren instantáneamente por electrocución y quemaduras.



Pararrayos: cono de protección

Las zonas orgánicas básicas de los seres vivos.

Para prevenir que el rayo caiga en cualquier parte de una zona y para guiarlo por un camino directo a tierra que no interfiera con objetos ni personas se utiliza el **pararrayos**, inventado por el célebre **Benjamín Franklin (1706-1790)** que es una varilla conductora terminada en punta colocada en lo alto de un edificio, mástil o torre, y conectada a tierra con un cable no aislado que debe comunicar eléctricamente con toda estructura conductora cercana.

El **pararrayos** actúa primero evitando hasta cierto punto que se produzca el rayo: cuando la nube tempestuosa se acerca a la punta sale de ella un potente chorro de aire ionizado (viento eléctrico) que tiende a descargar el condensador tierra/nube. Si este efecto no basta, se produce la descarga a tierra a través de las bajadas conductoras. Se estima que los pararrayos protegen de una descarga dispersa a una zona cónica con vértice en la punta y base de radio igual a la altura de la punta.

El **rayo** mata en nuestro país un promedio de 5 personas por año y causa el 20% de los incendios rurales y forestales²⁴. Los relámpagos en cambio no son tan malos (salvo para la aeronavegación), pues a estas descargas se debe la síntesis atmosférica de ácido nítrico con el nitrógeno del aire, el que cae disuelto en la lluvia y fertiliza la tierra. Ensayos de laboratorio avalan la teoría de que las descargas atmosféricas junto con los rayos ultravioletas del sol pudieron activar los gases presentes en la atmósfera de la tierra hace mil millones de años²⁵, sintetizándose así los primeros aminoácidos, las sustan-

²⁴ Durante una tormenta eléctrica no debemos refugiarnos bajo los árboles, que atraen a los rayos pero no los canalizan hacia el suelo directamente: es más seguro echarse en el suelo, o mejor entrar en algún vehículo con techo metálico o a un galpón con techo y paredes de chapa.

²⁵ Esa atmósfera primitiva contenía mucho metano (CH₄), amoníaco (NH₃) y dióxido de carbono (CO₂), además de nitrógeno y poco oxígeno. Luego fué cambiando su composición debido al desarrollo de las plantas verdes, que hacen fotosíntesis reduciendo el CO₂ y liberando oxígeno.