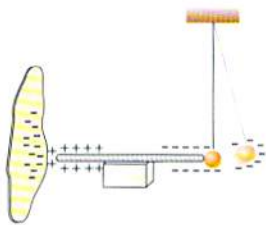


# 3

## ¿CÓMO ESTÁN FORMADOS LOS METALES «POR DENTRO» PARA TENER LAS PROPIEDADES ELÉCTRICAS QUE TIENEN?

Sabemos que los metales como el aluminio, hierro, cobre, plata u oro (y muchos más) se pueden estirar en hilos, cortar en láminas y doblar, son resistentes a la tracción, buenos conductores térmicos y tienen elevados puntos de fusión y de ebullición (se deben alcanzar temperaturas muy elevadas para separar los átomos de los metales entre sí). Vamos a tomar conciencia, además, de algunas de sus propiedades eléctricas, aunque su justificación se realizará en cursos posteriores.

### EXPERIENCIA



Colocad una varilla metálica, sin puntas, horizontalmente sobre un pie de «corcho blanco» (porexpán) y poned la esferita metalizada de un péndulo eléctrico (neutra) en contacto con uno de sus extremos. Tocad el otro extremo de la varilla con un trozo de plástico electrizado fuertemente (frotando con lana) y se producirán fuerzas repulsivas entre la varilla y la bolita. Tocad, después, la varilla con la mano o un objeto metálico, en cualquier punto, y la varilla se descargará. Si se toca con un trozo de porexpán o de plástico, no se descarga.

Realizad la experiencia propuesta en el margen. Explicad lo que ocurre

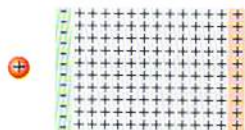
El comportamiento de los metales puede explicarse admitiendo que los electrones pueden moverse libremente por ellos y, por tanto, al acercar el plástico (cargado negativamente), se producirá un desplazamiento de electrones hacia el extremo opuesto. Al tocar el extremo con exceso de carga positiva con el plástico, pasarán electrones al metal repartiéndose por su superficie exterior, debido a su mutua repulsión. Como la superficie de la bolita del péndulo también es metálica, los electrones también se repartirán por ella, quedando la varilla y la bolita cargadas negativamente, por lo que se repelen.

La descarga al tocarla con el objeto metálico está clara: el exceso de carga se reparte entre la varilla y el objeto, disminuyendo (o desapareciendo) la carga en la varilla y, por tanto, la fuerza repulsiva sobre la bolita. La descarga al tocar con la mano se explica porque **la superficie del cuerpo humano está cubierta por sales** (tienen iones) debidas a la transpiración y sudoración **que la hacen bastante buena conductora**: la carga de la varilla se reparte por su superficie y la de nuestro cuerpo. Además, el suelo es también un buen conductor y, según como sea el material de nuestros zapatos, la carga puede repartirse por ¡toda la superficie del planeta! Claramente esto no pasa con el plástico, la cera o el corcho: tocando con ellos el metal electrizado, no se deselectriza. Además, cuando electrizamos un trozo de plástico, podemos estar sujetándolo con la mano (o con pinzas metálicas) y no se deselectriza: las partículas cargadas se quedan allí donde se ha producido el frotamiento.

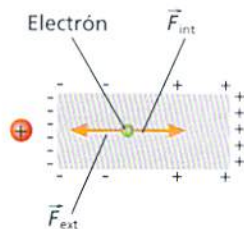
**El exceso de carga en un conductor se reparte por su superficie exterior. En un material aislante, las partículas cargadas no pueden moverse libremente y quedan localizadas en el lugar donde se introducen.**

Podemos electrizar un trozo de metal por inducción, es decir, acercándole un objeto electrizado, sin haber contacto, y tocándolo un instante con la mano. ¿Cómo se puede explicar este hecho?

En un trozo de metal, aunque esté neutro, hay partículas con carga negativa (electrones) que se pueden mover por su interior. En los metales no hay moléculas. Para explicar sus propiedades ha sido necesario admitir que en su interior hay electrones que se pueden mover entre una red de iones positivos. Sabemos, por ejemplo, que en 63,5 g de cobre, hay  $6 \cdot 10^{23}$  átomos de cobre y que cada átomo aporta un electrón que puede moverse por todo el trozo de cobre. De manera que **un modelo sencillo y útil es pensar en un trozo de cobre como una especie de red tridimensional en la que los nudos serían los iones positivos (cationes) de cobre** (con 29 protones en el núcleo y 28 electrones a su alrededor) **muchísimo más grandes que un electrón, tocándose entre sí, y una nube o mar de electrones** (muchísimo más pequeños que los cationes) **que, individualmente, pueden moverse libremente por toda la red.**







(En el dibujo sólo se indica el exceso de carga). Cuando el metal está polarizado, si tocamos con la mano la densidad superficial de carga del metal hará que pasen electrones de la mano al metal o al revés, quedándose cargado. Esto explica la carga por inducción. Si, en vez de eso, se retira la carga exterior, el trozo de metal volverá a su estado inicial: neutro sin polarización.

Cuando se acerca un objeto electrizado a un trozo de metal, al estado de movimiento caótico de los electrones libres se le superpone el movimiento debido a la fuerza eléctrica que ejerce sobre ellos la carga externa. Esto produce una velocidad de arrastre que se suma a la alta velocidad ( $\sim 10^6$  m/s, pero caótica) de los electrones cuando no se ejerce fuerza eléctrica sobre ellos. Podemos imaginar lo que ocurre como un desplazamiento neto del conjunto de los electrones libres («mar de electrones») con gran rozamiento con la red de iones, lo que provoca una velocidad constante muy pequeña ( $\sim 10^{-4}$  m/s) llamada velocidad de arrastre. El mar de electrones no se mueve cuando no hay carga externa exterior que influya sobre el metal y, cuando la hay, se mueve a la velocidad de arrastre.

Si el mar de electrones se desplaza hacia la carga externa (positiva), como se ve en el dibujo, ¿por qué se para?

Aunque el interior del metal es neutro, al desplazarse hacia la carga exterior se irán acumulando electrones en la superficie cercana a la carga, produciendo un exceso de carga negativa en ese extremo y un exceso de carga positiva (déficit de electrones) en el otro. Ahora, el trozo de metal está polarizado: hay una carga neta de un signo en una parte de su superficie y del otro signo en la otra parte. Sobre los electrones del mar electrónico actuará la fuerza atractiva de la carga externa, en un sentido, y la debida a las cargas de polarización acumuladas en la superficie exterior, en sentido opuesto.

El mar seguirá moviéndose, acumulando carga neta en la superficie exterior del metal hasta que la fuerza resultante sobre los electrones del interior sea cero. En ese momento, el mar de electrones ya no se moverá: se ha alcanzado el equilibrio electrostático. Para que eso ocurra, el mar de electrones sólo debe desplazarse (para fuerzas eléctricas de valor habitual) ¡una fracción del diámetro de un ion! Así, aunque la velocidad de arrastre es de sólo unas décimas de milímetro por segundo, el equilibrio electrostático se alcanza en un trozo de metal en unos  $10^{-8}$  segundos.

La explicación adecuada de todos los hechos experimentales y de las propiedades de los metales se basa en que:

- En el interior de un metal, aunque esté neutro<sup>2</sup>, hay electrones (uno por cada ion) que pueden moverse libremente (con una velocidad promedio constante de  $10^6$  m/s, pero caótica). Cuando el metal está en equilibrio electrostático, la suma de todas las fuerzas que se ejercen sobre estos electrones es nula.
- Cuando un metal no está en equilibrio electrostático, el mar de electrones se mueve con la velocidad de arrastre (de valor muy pequeño, pero su dirección y sentido no es caótico). En los metales, la velocidad de arrastre disminuye al aumentar la temperatura, pues la vibración de la red de iones aumenta, y el «rozamiento» con el mar de electrones es mayor.
- El exceso de carga en un metal siempre se sitúa en su superficie exterior. El interior de un metal siempre es neutro.
- Las fuerzas eléctricas que producen el arrastre del mar de electrones sólo pueden ser debidas a cargas exteriores o a carga neta distribuida sobre la superficie del metal. El movimiento del mar de electrones no puede interpretarse como consecuencia de las repulsiones de los electrones (no se «empujan» unos a otros), ya que la suma de todas las fuerzas entre los electrones y entre éstos y los iones es nula.

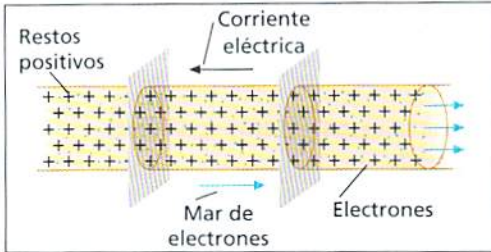
Ahora podemos acercarnos a la corriente eléctrica desde la electrostática. Ya sabemos que lo único que puede fluir en el interior de los metales son los electrones y, si la corriente eléctrica es «algo» que fluye por el interior de los cables, ese «algo» no puede ser más que el mar de electrones. ¿Cómo ocurre esto? ¿Dónde está en un circuito la carga externa que hace que se mueva el mar de electrones? ¿Por qué no se para, como ocurre en un trozo de metal sometido a la acción de una carga externa?

<sup>2</sup> En 1916, Tolman y Steward demostraron experimentalmente que, cuando se acelera una varilla de metal, se produce una concentración de carga negativa en un extremo (el posterior, si imaginamos la varilla como un coche que acelera en línea recta) y positiva en el extremo delantero. Comprobaron, además, que las partículas que se movían en el interior eran electrones.



# 4 UN PRIMER MODELO DE FUNCIONAMIENTO DE UN CIRCUITO DE CORRIENTE CONTINUA

## 4.1. Interpretación de la intensidad de corriente que medimos con el amperímetro



El sentido de la corriente convencional es el opuesto al del movimiento del mar de electrones.

Según el modelo presentado, parece intuitivo identificar la corriente eléctrica con el movimiento del mar de electrones, y definir la intensidad de la corriente ( $I$ ) como la cantidad de electrones que atraviesa por segundo una sección transversal (perpendicular al cable) del conductor. No obstante, cuando aún no se sabía qué era lo que fluía por el interior de los cables, históricamente se adoptó por convenio que la corriente circulaba de manera que parecía salir del polo positivo (+) de la pila y entrar por el polo negativo (-), como

si las partículas que se mueven por el interior de los metales tuvieran carga positiva. Afortunadamente, los efectos macroscópicos del flujo de carga negativa en un sentido son los mismos que los producidos por el flujo de carga positiva en el sentido opuesto (salvo en algunos fenómenos raros). Además, en las disoluciones conductoras, en gases ionizados..., las partículas cargadas que se desplazan pueden ser de distinta naturaleza y tener carga de distinto signo. Definiremos la intensidad de la corriente eléctrica en un punto de un conductor como la cantidad de carga positiva que atraviesa la sección transversal del conductor en dicho punto por unidad de tiempo:

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

### PROBLEMA

Se mide con un amperímetro la intensidad de corriente en un punto de un cable metálico obteniéndose 0,2 A. Calculad:

- La cantidad de carga que atravesará una sección transversal de este cable en 15 minutos.
- El número de electrones que habrán atravesado dicha sección, y el sentido en que se moverán.

Dato: carga del electrón:  $1,6 \cdot 10^{-19}$  C.

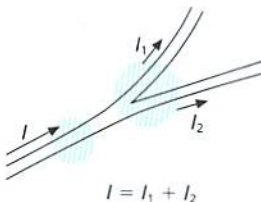
Resultado: a) 180 C; b)  $1,125 \cdot 10^{21}$ ; el mar de electrones se mueve en sentido opuesto al indicado por el amperímetro.

En el S.I. se toma la intensidad de corriente como magnitud fundamental y, su unidad, el **amperio (A)**, se define a partir de efectos macroscópicos y los amperímetros se calibran a partir de esta unidad. La unidad de cantidad de carga eléctrica, que se llama **culombio (C)**, es la cantidad de carga que atraviesa una sección transversal de un conductor en un segundo cuando por él circula una corriente de 1 A.

**En régimen estacionario, sabemos que  $I$  en cualquier punto de un circuito no varía con el tiempo;  $I$  cerca del borne + es la misma que cerca del borne -; si el cable se divide, la suma de las intensidades en cada rama es igual a la que hay en la rama principal. ¿Cómo podemos interpretar microscópicamente estos hechos?**

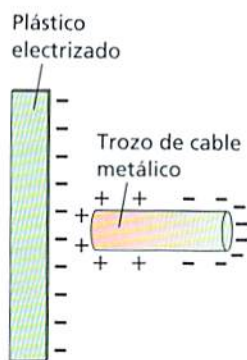
Según nuestro modelo de conducción metálica, eso significa que **en régimen estacionario el n.º de electrones ( $e^-$ ) que atraviesan la sección transversal del conductor en los distintos puntos permanece constante en el tiempo**. Además, el que  $I$  tenga el mismo valor cerca de ambos bornes, y que su valor se conserve, es el resultado necesario del principio de conservación de la carga y del régimen estacionario. Si la carga está en los electrones, el mismo n.º de  $e^-$  que entran en una región que encierre cualquier trozo del circuito tiene que ser igual al n.º de  $e^-$  que salen de dicha región (ver figura del margen). Si no fuera así, puesto que ni la carga ni los electrones se gastan, en esa región estaría acumulándose carga neta, lo que afectaría al movimiento del mar de electrones y la intensidad variaría, lo que no ocurre en régimen estacionario.

El principio de conservación de la carga y el régimen estacionario de funcionamiento de un circuito implican la conservación de la intensidad de corriente.





## 4.2. ¿Qué hace una pila para mantener una corriente continua?



El mar de electrones del cable se mueve hacia la derecha, hasta que la densidad de carga en los extremos alcanza un valor que hace que se detenga.

Si queremos que el mar de electrones fluya continuamente por el interior de un conductor, no debemos dejar que se alcance una distribución superficial de carga que produzca el equilibrio estático. En el caso del dibujo de la izquierda, sería necesario evitar que se produjera una acumulación de carga neta negativa en el extremo derecho y positiva en el otro. Eso equivale a quitar electrones del extremo derecho cuando van llegando y poner electrones en el otro cuando se van alejando. Más aún, si queremos que el mar de electrones fluya continuamente y con velocidad constante, por cada electrón que quitamos del extremo derecho habrá que poner simultáneamente un electrón (distinto) en el otro.

Según estas ideas, para que una pila produzca un flujo continuo y uniforme del mar de electrones, ejerciendo una fuerza constante sobre él, debe cumplir una doble función:

- Mantener carga eléctrica fuera del cable (en el interior de la pila y/o en su superficie) que ejerza constantemente una fuerza sobre los electrones que forman «el mar».
- Quitar electrones de uno de los extremos al mismo ritmo que los aporta por el otro.

Así, se mantendría un flujo continuo del mar de electrones, y los efectos macroscópicos de la corriente eléctrica serían continuos y de valor fijo en cada punto del circuito, tal como ocurre en régimen estacionario.

Aunque no podemos ver los electrones del interior de un hilo metálico, podemos buscar evidencias para apoyar este modelo de pila. Puesto que sabemos cargar y descargar objetos metálicos, si conseguimos que se produzca algún efecto observable debido a la diferencia de densidad de carga entre dos láminas metálicas, y mantenemos constante la diferencia entre densidades de carga, el efecto se debería producir de manera continua. ¡Vamos a intentarlo!

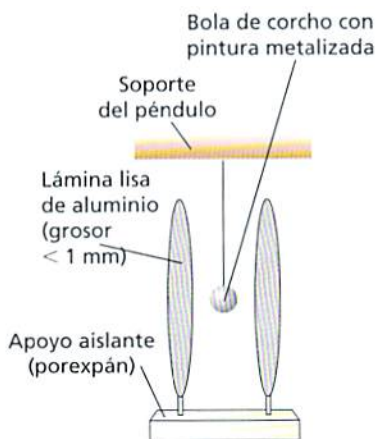


### Construcción de un simulador electrostático de una pila (martor) siguiendo las instrucciones

Colocad dos moldes, A y B, circulares y lisos de aluminio (de los de hacer tartas, de unos 23 cm de diámetro) verticalmente sobre un pie de porexpán y aproximadlos frente a frente de manera que queden paralelos y a una distancia de unos 2 cm (lo mejor es colocar dos trozos iguales pequeños de porexpán, pegados con cinta adhesiva, entre los bordes de las láminas). Colocad la esferita metalizada de un péndulo eléctrico entre las láminas, cerca del centro (sujetad el hilo del péndulo con un trozo de material aislante, no con la mano). Electrizar una de las láminas, A, tocando varias veces con un trozo de plástico fuertemente electrizado hasta que la bolita del péndulo comience a vibrar (golpeando ambas láminas). Cuando pare, tocad con la mano las láminas y la bolita (así se descargan), y repetid la operación.

Explicad los siguientes hechos que se producen con el «martor»:

- ¿Por qué vibra?
- ¿Por qué se para la esfera?
- Cuando el péndulo está parándose, al tocar la lámina B, las vibraciones aumentan.
- Si se toca continuamente la lámina B (tiene «toma de tierra»), el péndulo vibra más tiempo hasta que se para.
- Si sincronizamos la carga de la lámina A y la descarga de B (tocando la A con el plástico que sujetamos con la mano e inmediatamente después la B con el dedo meñique de la misma mano), conseguiremos que el péndulo vibre bastante tiempo.



Simulador electrostático de una pila (martor).



## Relación entre la experiencia y lo que sucede en los circuitos con una pila

Esto es una simulación bastante adecuada de lo que hace una pila. La pila hace ¡lo que estamos haciendo nosotros! (pero mejor): mantener la concentración de carga constante entre las láminas para que los efectos observables se produzcan continuamente.

Los bornes de la pila son las láminas de aluminio y en el interior de la pila (que es la persona que está haciendo funcionar el «martor») ocurren reacciones químicas que aportan electrones al borne negativo (análogo a electrizar el plástico y tocar la lámina A) y otras reacciones químicas que cogen electrones del polo positivo (análogo a tocar con la mano la lámina B). Esto requiere **realizar un trabajo sobre las cargas mediante una fuerza que se opone a fuerzas eléctricas repulsivas**. Nosotros realizamos trabajo para mantener vibrando el péndulo, separando las cargas negativas del plástico de las positivas del jersey o paño de lana y, para ello, quemamos alimentos en el interior de nuestro cuerpo, disminuyendo nuestra energía interna química.

**Este trabajo lo realiza la pila a expensas de su energía interna química (las sustancias iniciales que hay en la pila se gastan: se van convirtiendo en otras sustancias) y en el proceso se produce también un aumento de su energía interna térmica (la pila se calienta).**

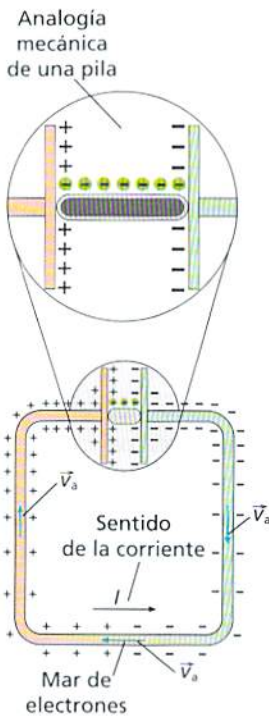
Por tanto, un modelo mecánico que representa bien lo que ocurre en un circuito es considerar a la pila como una cinta transportadora de electrones, propulsada por un motor de gasolina, en contra de las fuerzas eléctricas para mantener las láminas (los bornes) con una densidad superficial de carga constante (en una positiva y en otra negativa). Por cada electrón que aporta al polo negativo, coge *simultáneamente* otro (distinto) en el polo positivo.

En las pilas normales no se nota esta densidad de carga neta en los bornes porque es pequeñísima (es muy fácil mover el mar de electrones en un metal). En las baterías de unos diez mil voltios, los bornes atraen a trocitos de papel, plumas, etc.

No obstante, la carga neta no se encuentra sólo en los bornes en un circuito que esté funcionando en régimen estacionario. Imaginemos un circuito funcionando con una pila y un único cable metálico. Si las cargas que pueden ejercer fuerza sobre los electrones del interior del conductor estuvieran únicamente dentro de la pila y/o en sus bornes, la fuerza no sería la misma cerca de los bornes que a varios metros de ellos (disminuye con la distancia) y la velocidad de arrastre del mar electrónico sería grande en unos puntos y muy pequeña en otros. Eso produciría una intensidad de corriente que no sería la misma a lo largo del circuito, lo que sabemos que no ocurre.

De hecho, la única manera de explicar lo que sucede en un circuito en régimen estacionario es admitir que la densidad de carga se distribuye, también, por toda la superficie exterior del hilo metálico, de tal manera que hace que pase el mismo número de electrones por segundo en cualquier sección del conductor. Así, una representación aproximada de la densidad de carga en un circuito con un cable homogéneo sería como se indica en la figura de la izquierda.

Puesto que deseamos saber qué es lo que hace que la intensidad tenga un determinado valor u otro, según lo que esté (y cómo esté) conectado a la pila y por qué una modificación de lo que está conectado en el circuito afecta (aparentemente de modo rapidísimo) a todas las partes del circuito, vamos a plantearnos cómo se transmiten las fuerzas eléctricas entre partículas cargadas y qué es lo que limita los valores que puede tener la intensidad en un circuito.



La carga neta se distribuye por la superficie externa del cable, de tal manera que la intensidad de la corriente sea igual en todos los puntos.



## EJERCICIOS Y PROBLEMAS

- Hallad la fuerza que se ejercerán entre ellos:
  - Un electrón ( $1,6 \cdot 10^{-19}$  C) y otro electrón situado a 1 cm de distancia, en el vacío.
  - Ídem un electrón y un protón.
  - Comparad con la atracción gravitatoria entre los dos electrones.  
Representad gráficamente las fuerzas.  
Datos:  $K = 9 \cdot 10^9$  U.I.;  $m_e = 9 \cdot 10^{-31}$  kg.  
Resultado: a)  $2,3 \cdot 10^{-24}$  N; b) Ídem pero atractivas; c)  $5,4 \cdot 10^{-67}$  N.
- Hallad la fuerza que ejercerá un anillo muy fino, de 1 mm de radio, con una carga total de  $10^{-12}$  C distribuida uniformemente, sobre un electrón situado:
  - En su centro.  
Resultado: a) 0; b)  $5,1 \cdot 10^{-16}$  N.  
Dividid el anillo en trozos iguales y sumad las fuerzas que ejercen sobre el electrón.
- Utilizando la ley de Coulomb, hallad la intensidad del campo eléctrico creado por una carga puntual de  $10^{-6}$  C en el aire ( $K = 9 \cdot 10^9$  U.I.), en los puntos que se encuentran a 1, 2 y 3 m de distancia de ella. Representad, a escala, los vectores correspondientes.  
Resultado:  $E_{1m} = 9.000$  N/C;  $E_{2m} = 2.250$  N/C;  $E_{3m} = 1.000$  N/C.
- Dibujad un vector que represente la intensidad del campo eléctrico creado por una carga positiva de 2 C en un punto A, en los siguientes casos:
  - Si colocamos en A 0,1 C.
  - Ídem con una carga de 0,5 C.
  - Ídem con una carga negativa de 0,1 C.
  - Nada.  
Resultado: En todos los casos,  $|\vec{E}|$  será la misma, haya o no haya carga.
- El módulo de  $\vec{E}$  en un punto es de  $3 \cdot 10^3$  N/C, y se dirige horizontalmente hacia la derecha. ¿Qué le ocurrirá a una carga de  $10^{-6}$  C si la colocamos en ese punto? ¿Y si es de  $-10^{-6}$  C?  
Resultado: En ambos casos sufre una fuerza de  $3 \cdot 10^{-3}$  N, en el sentido del campo para la carga positiva y contrario para la negativa.

Sabemos de cursos anteriores que dos cuerpos puntuales cargados se ejercen entre ellos una fuerza que viene dada por la ley de Coulomb:

$$F = K \frac{q_1 \cdot q_2}{d^2}$$

Si en lugar de haber dos cargas puntuales hay tres o más, la fuerza eléctrica sobre una de ellas se obtendrá sumando (vectorialmente) las fuerzas que sobre ella ejercería cada una de las otras si estuviera sola (**principio de superposición**). Cuando los cuerpos cargados no pueden ser considerados puntuales, el cálculo es más complejo, excepto en situaciones especialmente simétricas (ver ejercicio 2).

Es fácil calcular la fuerza entre dos partículas cargadas, pero, ¿cómo tiene lugar esta interacción? Aunque durante mucho tiempo se pensó que se trataba de una interacción instantánea a distancia, podemos pensar que una carga  $Q$  crea «algo», que llamaremos **campo eléctrico**, que se distribuye por el espacio y la materia que la rodea, pero que sólo puede ser detectado cuando colocamos carga  $q$  en un punto de dicho espacio. Esto supone pensar que la interacción se produce en dos fases: primero, la carga  $Q$  crea un campo eléctrico y, segundo, dicho campo interacciona con cualquier carga que esté en contacto con él, ejerciendo sobre ella una fuerza.

### 5.1. Intensidad del campo eléctrico

#### ¿Cómo podemos medir lo intenso que es el campo creado por una carga $Q$ en un punto?

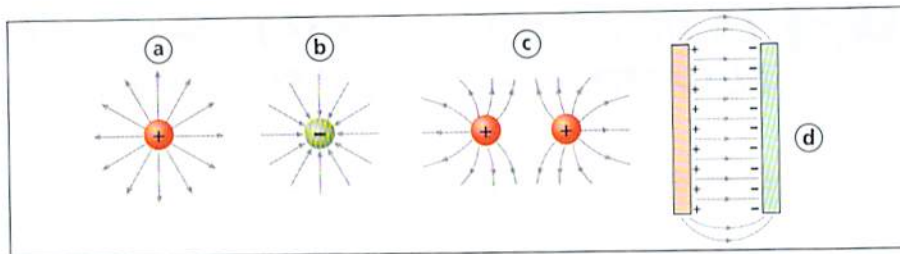
Si sólo podemos detectarlo cuando ejerce fuerzas sobre objetos cargados, se podría colocar en dicho punto una carga «testigo»,  $q$ , y medir la fuerza,  $\vec{F}$  que el campo ejerce sobre ella. Como dicha fuerza dependerá del valor de  $q$  (con  $q$ ,  $2q$ ,  $3q$ , mediríamos  $\vec{F}$ ,  $2\vec{F}$ ,  $3\vec{F}$ ), podemos caracterizar la intensidad del campo eléctrico en un punto, independientemente de la carga testigo, mediante la magnitud  $\vec{F}/q$  que llamaremos «intensidad del campo eléctrico» y representaremos por  $\vec{E}$ . Así,  $\vec{E} = \vec{F}/q$ . Puesto que la dirección y sentido de la fuerza dependerá del signo de la carga testigo, se toma como acuerdo que **la intensidad del campo eléctrico en un punto nos indique la fuerza que sufriría una unidad de carga positiva si se colocara en dicho punto**.

El símbolo de su unidad es N/C. (¿Qué significa que la intensidad del campo eléctrico en un punto es 1 N/C? ¿Y  $2 \cdot 10^{-2}$  N/C? Haced los ejercicios 3, 4 y 5 del margen.)

Una forma de concretar visualmente el campo eléctrico es dibujando líneas tangentes a  $\vec{E}$  en todos sus puntos. Dichas líneas se llaman **líneas de fuerza**.



- a) Líneas de fuerza del campo eléctrico producido por una carga puntual positiva.
- b) Ídem negativa.
- c) Ídem por dos cargas positivas próximas.
- d) Ídem por dos placas metálicas con igual carga de distinto signo.



El concepto de campo eléctrico es útil: una vez que se ha calculado la  $\vec{E}$  creada por una distribución de cargas dada en un punto, podemos calcular rápidamente la fuerza que se ejercerá sobre cualquier carga,  $q$ , situada en dicho punto (que no altere la distribución de las fuentes del campo): simplemente será  $q \cdot \vec{E}$ .

¿Pero es solamente un artificio para facilitar los cálculos? Para decidir esto imaginad que hay un péndulo electrizado en uno de los rincones del techo del aula y que tenemos en nuestras manos un trozo de plástico también electrizado. El plástico ejercerá una fuerza (por pequeña que sea) sobre el péndulo que dependerá de la distancia entre ellos. Si desplazamos el plástico rápidamente, acercándolo y alejándolo del péndulo, ¿«notará» el péndulo ese cambio en la fuerza instantáneamente o tardará algo en notarlo? La respuesta es que tardará en notarlo. Desde Einstein sabemos que ningún objeto ni señal puede viajar más rápidamente que la luz en el vacío ( $3 \cdot 10^8$  m/s). Como los cambios en  $\vec{E}$  tardan tiempo en transmitirse desde la carga hasta el punto, puede ocurrir que la fuente del campo haya desaparecido y  $\vec{E}$  en un punto todavía no sea cero (¡al fin y al cabo, vemos la luz enviada hace millones de años por estrellas que puede que ya no existan!). Luego  $\vec{E}$  no es un artificio matemático para facilitar los cálculos: tiene existencia real, y, como se verá en el curso próximo, masa y energía. **Un cambio en la intensidad del campo en un punto se transmite a otros puntos del campo a la velocidad de la luz en el medio en que se encuentren.**

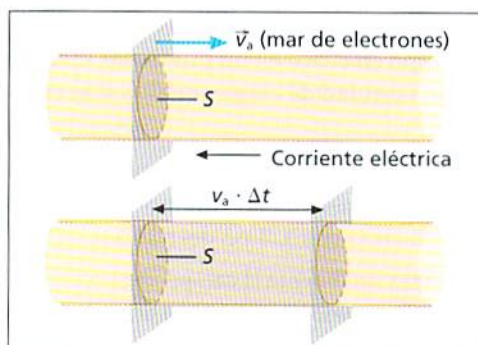
## 5.2. Relación entre $I$ y $\vec{E}$ en el interior de un circuito

Sabemos que en un circuito con una pila y un cable en régimen estacionario la intensidad, medida con un amperímetro, es igual en todos los puntos y no varía con el tiempo. El valor de dicha intensidad,  $I$ , debe estar relacionado con la intensidad del campo,  $\vec{E}$ , creado por las cargas de su superficie y las que hay en el interior de la pila. Vamos a tratar de encontrar dicha relación.

Según el convenio establecido para el sentido de  $I$ , la cantidad de carga positiva que atraviesa una sección transversal del cable metálico por segundo será la suma de las cargas (pero positiva) de los electrones que atraviesan dicha sección por segundo. Si el movimiento del mar de electrones se produce igual por toda la sección, en un tiempo  $\Delta t$  habrá avanzado una distancia  $v_a \cdot \Delta t$ , por lo que el número de electrones (o portadores positivos de carga en el sentido opuesto) que habrá atravesado la sección será el número de electrones libres que hay en el volumen indicado en la figura. Cada material tiene un número de electrones libres/m<sup>3</sup>,  $N$ , característico (en el cobre es de  $10^{28}$ ). La carga de los electrones libres contenida en dicho volumen será  $N \cdot q_e \cdot S \cdot v_a \cdot \Delta t$ , por lo que tendremos:

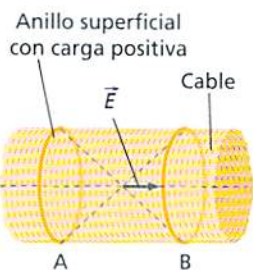
$$I = \frac{q}{\Delta t} = N \cdot q_e \cdot S \cdot v_a$$

donde  $q_e$  es una carga positiva igual a la del electrón. Si en régimen estacionario  $I$  es constante,  $v_a$  será constante si lo son  $N$  y  $S$  (cable homogéneo y sección constante).





Según nuestro modelo de conducción metálica, la velocidad de arrastre del mar de electrones en un metal ( $v_a$ ) dependerá del metal y del valor de  $\vec{E}$ . Es decir,  $v_a = \mu \cdot |\vec{E}|$ , donde  $\mu$  sería una propiedad de cada material, llamada **movilidad**, cuyo valor coincide con la velocidad de arrastre de los electrones en ese material cuando el campo en su interior es de 1 N/C (para el cobre es de 4,5 mm/s). Si la movilidad de un material es constante, no depende de la intensidad que circula por él, se dice que el material es **óhmico** (los metales que utilizamos como conductores son de este tipo). En ese caso,  $I$  estará relacionada con la intensidad del campo en el interior del modo:  $I = N \cdot q_e \cdot S \cdot \mu \cdot |\vec{E}|$  y, por tanto, si  $I$  es constante en cualquier punto del conductor (homogéneo,  $S$  y movilidad constante),  $|\vec{E}|$  también lo es.



La carga neta/m<sup>2</sup> (densidad de carga), varía gradualmente en el exterior del cable, produciendo un campo eléctrico en su interior.

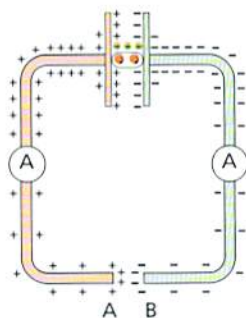
### ¿Cómo debe distribuirse la carga en la superficie del cable para producir una intensidad de campo constante en todo su interior?

Si elegimos un punto algo lejos de los bornes, la mayor parte del campo será debida a la carga que se distribuye en la superficie cilíndrica en torno a él. Si cogemos un anillo muy estrecho, A, de carga (supongamos positiva), la  $\vec{E}$  debida sólo a dicho anillo en un punto del interior del cable en el eje que pasa por su centro será como se muestra en la figura. Si en la otra parte del punto considerado, a la misma distancia, hubiera otro anillo, B, con igual densidad de carga, la  $\vec{E}$  debida a B sería igual y opuesta a la debida a A, por lo que el campo resultante sería nulo. Sin embargo, si el anillo B tiene una densidad de carga menor que la del A (aunque positiva), la  $\vec{E}$  resultante no sería nula, tendría la dirección del eje y sentido desde el anillo de mayor densidad de carga positiva hacia el de menor. Si la densidad de carga del anillo B fuera menor o cero, la intensidad del campo en el punto aumentaría, y aún lo haría más si B tuviera carga neta negativa. Como vemos, **en régimen estacionario es necesario que exista una variación en la densidad superficial de carga a lo largo de un trozo del cable para que haya campo eléctrico. La  $\vec{E}$  en el interior de un conductor es mayor cuanto mayor sea dicha variación por unidad de longitud del cable (cuanto más bruscamente varíe).**

## 5.3. Autorregulación de un circuito

Podemos ahora plantearnos cómo se producen los cambios de intensidad en un circuito.

### ¿Cómo «saben» los electrones que tienen que parar en un circuito abierto?



Hasta que la carga se distribuya uniformemente por el exterior de los cables habrá corriente en ambas ramas.

Al conectar la pila el mar de electrones será empujado inicialmente por la concentración de carga negativa en el polo negativo de la pila y de positiva en el polo positivo; esto irá produciendo una acumulación de carga negativa en B que se distribuirá rápidamente por la superficie de la rama B, y ejercerá una fuerza repulsiva sobre el mar de electrones que fluye hacia el extremo. La densidad de carga superficial irá aumentando hasta que el campo en el interior sea cero. Habrá densidad de carga neta negativa en la rama B, pero se distribuirá uniformemente por su superficie.

En la rama A pasa lo mismo simultáneamente, creándose una densidad superficial de carga positiva (déficit de electrones) que atraerá a los electrones que fluyen hacia el polo positivo, hasta que se detengan. De manera que **ambos amperímetros indicarán el paso de corriente durante un instante y después marcarán cero**. El estado transitorio, en circuitos normales, dura un tiempo imperceptible. En algunos casos, no obstante, puede durar varios segundos.