

Velocidad de los electrones en los conductores de las instalaciones eléctricas

F. R. Quintela, R. C. Redondo, N. R. Melchor, J. M. G. Arévalo y M. M. Redondo
Universidad de Salamanca

Resumen

En ingeniería hay conceptos erróneos que permanecen a lo largo del tiempo. Son citados como comunes en diversos países, por lo que no pueden interpretarse solo como consecuencia de una mala formación científica originada por un mal sistema de enseñanza. Suelen estar relacionados con los conceptos fundamentales, y provocan, por eso, notable inseguridad en la utilización de los saberes que derivan de ellos. Este artículo trata de uno de esos conceptos, que se refiere a la velocidad de los electrones en los conductores de las instalaciones eléctricas. En concreto se analizan las consecuencias a que conduciría el extendido error de que la velocidad de los electrones que producen la corriente eléctrica es la velocidad de la luz o próxima a ella.

Introducción

La creencia de que la velocidad de los electrones en los conductores de las instalaciones eléctricas es la velocidad de la luz está muy extendida. No pocos de los alumnos que llegan a las escuelas de ingeniería y a las facultades de ciencias de las universidades creen que los electrones que dan lugar a la corriente eléctrica en los hilos y cables metálicos de las líneas eléctricas se mueven con esa velocidad. No es este un mal resultado de la enseñanza española exclusivamente, pues es citado como error común por autores de otros países[1]. Más bien parece tener su origen en la relación confusa que quizá se establece entre la velocidad de las ondas electromagnéticas, que sí es la velocidad de la luz, porque la luz son ondas electromagnéticas, y la velocidad de arrastre de los electrones que dan lugar a la corriente eléctrica en los conductores metálicos.

No es la primera vez que nos ocupamos de conceptos físicos erróneos relacionados con la Electrotecnia[2][3]. Una razonable atención a los fundamentos es siempre útil. Suele ocurrir que, con los conocimientos ya adquiridos, casi siempre es posible una crítica razonable sobre muchos conceptos para poder decidir sobre su grado de aceptación. El contraste con el saber que ya se posee es una forma eficaz de evitar que incorporemos conocimientos erróneos o, al menos, una forma de ponerlos en duda. Este artículo pretende ser un ejemplo de esta práctica. Se exponen en él algunas de las consecuencias a que conduce la afirmación de que la velocidad de los electrones en los conductores eléctricos de nuestras instalaciones es la velocidad de la luz. Veremos que los resultados a que da lugar esa hipótesis están tan alejados de la realidad, que enseguida ha de rechazarse.

Densidad de electrones libres

Conductor eléctrico es cualquier cuerpo que tenga cargas libres. El número de cargas libres por unidad de volumen, que designaremos por n , se llama densidad de cargas libres. Los metales son los mejores conductores porque tienen muchos electrones libres. Por ejemplo, en el cobre hay, al menos, 8.45×10^{22} electrones libres por centímetro cúbico. Esta cantidad es

inconcebiblemente grande. La población humana actual es de seis mil millones de personas, o sea, 6×10^9 , cantidad despreciable frente a la de los electrones libres que hay en un centímetro cúbico de cobre. Para comprobarlo basta restar con una calculadora 6×10^9 de 8.45×10^{22} ; el resultado es 8.45×10^{22} , como si no se hubiera restado nada.

La densidad de electrones libres del resto de los metales es del mismo orden de magnitud. En el aluminio es 6×10^{22} , y en el volframio 6.3×10^{22} electrones libres por centímetro cúbico[4].

Velocidad de los electrones libres y densidad de corriente

Si a través de una superficie pasan cargas eléctricas, se dice que hay corriente eléctrica a través de esa superficie. La carga que pasa cada segundo se llama intensidad a través de esa superficie. Si la superficie es perpendicular al movimiento de las cargas, la intensidad que atraviesa cada unidad de superficie es la densidad de corriente j . La velocidad v con que se mueven las cargas que originan la corriente se llama velocidad de arrastre de las cargas libres. Esta es la velocidad de la que, erróneamente, se cree que es igual a la velocidad de la luz.

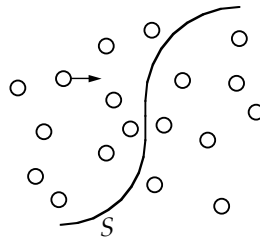


Fig. 1.- Si hay carga que pasa a través de una superficie, se dice que hay una corriente eléctrica a través de esa superficie.

En la figura 2 se muestra un cilindro imaginario en el interior de un conductor. Supondremos que los electrones libres del conductor se mueven hacia la derecha. La base S es perpendicular a la dirección en que se mueven los electrones libres. La altura del cilindro la elegimos de longitud v , que es la velocidad de los electrones libres, o sea, la distancia que recorren en un segundo. Por eso solo los electrones libres que estén dentro del cilindro atravesarán la superficie S de la derecha en el próximo segundo. En efecto, el electrón que se dibuja dentro del cilindro recorre durante el próximo segundo una distancia v , que es mayor que la que lo separa de S . Por eso cruza S . El que se dibuja fuera no pasa, pues en un segundo solo recorre la distancia v . Es decir, los electrones libres que atraviesan la superficie S cada segundo son los que están dentro del cilindro de la figura 2. Si el número de los que hay en cada unidad de volumen es n , para hallar los que hay dentro del cilindro basta multiplicar el volumen del cilindro por n . Ese número es, por tanto, Svn , que es, como hemos dicho, el número de electrones que cada segundo atraviesan S . La carga que atraviesa S cada segundo, es decir, la intensidad por S , se obtiene multiplicando por la carga q del electrón: $Svnq$. Dividiendo por S se obtiene el módulo de la densidad de corriente:

$$j = qnv$$

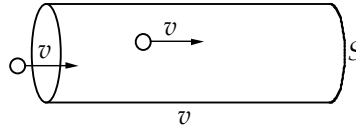


Fig. 2.- Solo las cargas libres contenidas en un cilindro de generatriz igual a la velocidad de arrastre v cruzarán la superficie S antes de transcurrir un segundo.

Esta fórmula se deduce en muchos libros de electricidad[4] y de física, y es suficiente para mostrar la imposibilidad de que la velocidad de los electrones de los conductores de las instalaciones eléctricas sea la de la luz. En efecto, el valor absoluto de la carga del electrón es 1.602×10^{-19} culombios[4]; la densidad de electrones libres en el cobre es, como se ha dicho, $n \cong 8.45 \times 10^{22}$ electrones / cm^3 , o sea, 8.45×10^{28} electrones / m^3 . Si la velocidad de arrastre de los electrones fuera la de la luz, 3×10^8 m/s, o próxima a ella, resultaría que la densidad de corriente en los conductores de cobre sería

$$j \cong 1.602 \times 10^{-19} \times 8.45 \times 10^{28} \times 3 \times 10^8 \cong 4 \times 10^{18} \text{ A / m}^2 = 4 \times 10^{12} \text{ A / mm}^2$$

El resultado indica que, por cada hilo de cobre de un milímetro cuadrado de sección, circularían cuatro billones de amperios; y que, como todos los electrones libres circularían a la velocidad de la luz, la densidad de corriente en cualquier hilo de cobre sería la misma. Es evidente que las cosas no son así: la densidad de corriente en los conductores de cobre de las instalaciones que empleamos no es siempre la misma, sino que puede variar y, desde luego, sus valores nada tienen que ver con la inconcebible cantidad deducida.

Choques en las esquinas

Se pueden poner más ejemplos de consecuencias catastróficas para las instalaciones si la velocidad de arrastre de los electrones fuera la de la luz. Supongamos que hay una corriente eléctrica en un tramo recto de un hilo de cobre y que, después de ese tramo, el hilo forma un ángulo de noventa grados. Si, debido a su velocidad, los electrones no salen fuera del conductor cuando llegan al ángulo, chocarán contra la superficie del lado del ángulo recto (fig. 3), que encuentran de frente, transversal a su velocidad, y, como mínimo, cederán toda su cantidad de movimiento al conductor. Ya vimos que el número de los que llegan por segundo a una superficie S es Svn . Si es m la masa de cada electrón, la masa que cada segundo choca contra ese lado del conductor es $Svnm$, y lo hace con velocidad v . Por tanto, la cantidad de movimiento que ceden los electrones cada segundo al conductor es Sv^2nm , que es igual a la fuerza que ejercen sobre el lado transversal del ángulo. Como la masa de un electrón es $m = 9.108 \times 10^{-31}$ kg, si la velocidad de los electrones libres en el conductor fuera la de la luz, para un hilo de un milímetro cuadrado de sección esta fuerza sería

$$f = v^2nmS \cong (3 \times 10^8)^2 \times 8.45 \times 10^{28} \times 9.108 \times 10^{-31} \times 10^{-6} \cong$$

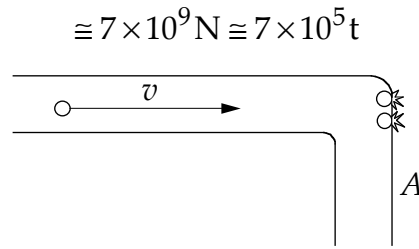


Fig. 3.- Si la velocidad de los electrones libres en este conductor fuera la de la luz, la fuerza que ejercerían al chocar en A sería de setecientos mil toneladas sobre cada milímetro cuadrado.

Setecientos mil toneladas. De nuevo una cantidad enorme cuyo efecto sería empujar el conductor con esa fuerza en la dirección y en el sentido del movimiento de los electrones. Eso si, como se ha dicho, se lograra retener los electrones en el hilo.

La fuerza centrífuga

El ejemplo anterior es un caso particular de cambio de dirección de los electrones en un conductor filiforme. Pero, en general, cualquier cambio de dirección, aunque sea suave, conduce a resultados desmesurados si se supone que la velocidad de los electrones es la de la luz. En efecto, si el hilo conductor describe una curva de radio r , cada electrón, al seguirla, ejerce sobre el hilo, hacia fuera de la curva, la fuerza $\frac{mv^2}{r}$, que es la fuerza centrífuga. Si la sección del hilo es S , en una longitud L hay SLn electrones libres, por lo que la fuerza centrífuga que los electrones ejercen sobre esa longitud L de conductor se obtiene multiplicando la que ejerce un electrón por todos los que hay. Es decir,

$$F_L = \frac{mv^2}{r} SLn$$

La fuerza por unidad de longitud se obtiene dividiendo por L , y vale

$$F = \frac{mv^2}{r} Sn$$

Por ejemplo, en un hilo de cobre de un milímetro cuadrado de sección que describa una curva de un metro de radio, la fuerza sobre el hilo por cada metro de longitud hacia fuera de la curva sería

$$F = \frac{9.108 \times 10^{-31} \times (3 \times 10^8)^2}{1} \times 10^{-6} \times 8.45 \times 10^{28} \cong 6.9 \times 10^9 \text{ N} \cong 7 \times 10^5 \text{ t}$$

Setecientos mil toneladas. Eso significa, por ejemplo, que en cada vano de una línea eléctrica se ejercerían toneladas de fuerza hacia abajo en el conductor debido a la fuerza centrífuga de los electrones, al tener que seguir la catenaria. El resultado equivaldría a aumentar cantidades enormes el peso del propio cable.



Fig. 4.- Si la velocidad de arrastre de los electrones libres fuera próxima a la de la luz, en cada hilo de una línea eléctrica aérea se ejercerían toneladas de fuerza hacia abajo debidas a la fuerza centrífuga de los electrones al tener que seguir la catenaria.

Energía

En el choque de los electrones contra la esquina en ángulo recto que consideramos antes, su velocidad se anularía. Por tanto ceden toda su energía cinética al conductor. La energía cinética que cede cada electrón es $\frac{1}{2}mv^2$. El número de los que chocan cada segundo contra la superficie S es Svn , por lo que la energía que ceden cada segundo es $\frac{1}{2}mv^2Svn = \frac{1}{2}mv^3Sn$. Esa cantidad es la potencia que ceden, pues es energía por segundo. Si la velocidad de arrastre fuera la de la luz, en un conductor de cobre de un milímetro cuadrado de sección esta potencia valdría

$$p = \frac{1}{2}mv^3Sn \cong \frac{1}{2} \times 9.108 \times 10^{-31} \times (3 \times 10^8)^3 \times 10^{-6} \times 8.45 \times 10^{28} \cong \\ \cong 10^{18} \text{ W} = 10^9 \text{ GW}$$

Mil millones de gigavatios. Para vislumbrar lo inconcebible de esta cantidad, recuérdese que la potencia de todos los generadores eléctricos de España, lo que se llama potencia de generación instalada, es de unos 60 GW. Desde luego, la energía que se cedería al conductor en el choque haría imposible la misma existencia del conductor.

A pesar de suponer que la velocidad de los electrones es la de la luz, se han utilizado las fórmulas de la mecánica clásica y se ha supuesto, por ejemplo, que la masa del electrón es siempre la masa en reposo. Aún así los resultados son

suficientemente elocuentes. Pero, conviene recordar que la teoría de la relatividad niega la propia posibilidad de la hipótesis de partida, ya que los electrones nunca pueden alcanzar la velocidad de la luz. Pero, si se aproximaran a ella, su masa aumentaría mucho, lo que exageraría aún más los resultados.

Como se ve, si la velocidad de arrastre de los electrones libres en los conductores fuera la de la luz o próxima a ella, ninguna de nuestras instalaciones eléctricas sería posible.

Velocidad de arrastre real

Afortunadamente las cosas no son así, porque la velocidad de arrastre de los electrones libres de los conductores no es la velocidad de la luz ni próxima a ella. La fórmula deducida al principio, $j = qnv$, que relaciona la densidad de corriente con la velocidad de las cargas libres que la originan, permite hallar muy fácilmente la velocidad de arrastre de los electrones libres en los conductores de nuestras instalaciones. Si se despeja v de la fórmula citada resulta

$$v = \frac{j}{qn}$$

Una densidad de corriente muy normal de los conductores de las instalaciones ordinarias es 10 amperios por milímetro cuadrado o menor. Esa densidad de corriente equivale a 1000 amperios por centímetro cuadrado. Para ese valor, si el conductor es de cobre, la velocidad de arrastre de los electrones es

$$v = \frac{j}{qn} \cong \frac{1000}{1.602 \times 10^{-19} \times 8.45 \times 10^{22}} \cong 0.07 \text{ cm / s}$$

Menos de un milímetro por segundo. Un electrón a esa velocidad tardaría dieciséis días y medio en recorrer un quilómetro. Pero, aunque la densidad de corriente fuera de 100 A/mm², que equivale a 10000 A/cm², la velocidad de los electrones sería de 0.74 cm/s, ni siquiera un centímetro por segundo. Este es, realmente, el orden de magnitud de la velocidad de arrastre de los electrones libres en los conductores, que depende de la densidad de corriente, pero que es inferior muchas veces al milímetro por segundo. La razón es que, para que pase un amperio a través de la sección de cualquier hilo, los electrones no necesitan moverse de prisa, les basta hacerlo tan lentamente como se ha deducido, porque hay muchos en cada unidad de volumen. Por ejemplo, en la figura 5 se representa un conductor de cobre de 1 mm² de sección. El número de electrones libres que hay en cada milímetro de cable es

$$0.01 \times 0.1 \times 8.45 \times 10^{22} = 8.45 \times 10^{19}$$

Que son

$$8.45 \times 10^{19} \times 1.602 \times 10^{-19} \cong 13.54 \text{ C}$$

Es decir, en cada milímetro de longitud de un hilo de cobre de 1 mm² de sección hay 13.54 culombios de carga libre. Por tanto, si los electrones libres se movieran a 1 mm/s, en un segundo atravesarían la sección del hilo 13.54

culombios, o sea, la densidad de corriente sería de 13.54 A/mm^2 . Por eso, para que la densidad de corriente sea de 10 A/mm^2 , han de moverse a menor velocidad, concretamente a 0.7 mm/s , tal como se dedujo antes.

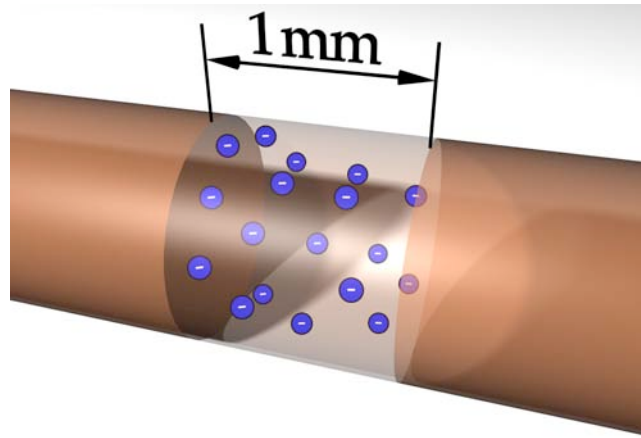


Fig. 5.- Si todos los electrones libres contenidos en el milímetro de conductor dibujado cruzaran la sección en un segundo, la intensidad sería de 13.54 amperios.

Con esta velocidad, cuando chocan con la esquina del ejemplo anterior, la fuerza es

$$f = v^2 nmS \cong (0.07 \times 10^{-2})^2 \times 8.45 \times 10^{28} \times 9.108 \times 10^{-31} \times 10^{-6} \cong 3.8 \times 10^{-14} \text{ N} \cong 4 \times 10^{-12} \text{ g} = 4 \text{ pg}$$

Cuatro picogramos, una cantidad inapreciable, lo mismo que la fuerza centrífuga en las curvas.

Velocidad de los electrones cuando la intensidad es sinusoidal

La fórmula $v = j/(qn)$ da valores instantáneos de la velocidad en función de la densidad de corriente, por lo que es válida tanto para corrientes con intensidades constantes como variables. En los dos últimos ejemplos eso significa que, si la corriente es continua de densidad 10 A/mm^2 , la velocidad de los electrones libres del cobre es constante e igual a 0.07 cm/s . Pero, si la intensidad es sinusoidal, como pasa en los hilos de las instalaciones de corriente alterna, la densidad de corriente instantánea es $j = J_m \text{sen} \omega t$, por lo que la velocidad de arrastre de los electrones vale

$$v = \frac{j}{qn} = \frac{J_m}{qn} \text{sen} \omega t = V_m \text{sen} \omega t$$

que es una velocidad también sinusoidal, de valor máximo $V_m = \frac{J_m}{qn}$ y de la misma pulsación que la intensidad.

El espacio recorrido por cada electrón debido a la velocidad de arrastre se obtiene integrando la velocidad:

$$x = \int v dt = \int \frac{j}{qn} dt = \frac{1}{qn} \int j dt$$

Si la intensidad es sinusoidal, entonces $j = J_m \text{sen}(\omega t)$, y el espacio recorrido resulta

$$x = \int v dt = \int \frac{J_m}{qn} \text{sen}(\omega t) dt = \frac{J_m}{qn} \int \text{sen}(\omega t) dt = -\frac{J_m}{qn\omega} \cos(\omega t)$$

que es sinusoidal: cada electrón oscila a ambos lados de un punto central. La separación máxima entre cada electrón y su punto central de oscilación es

$$X_m = \frac{J_m}{qn\omega}$$

Lo anterior significa que, en corriente alterna, los electrones libres no recorren distancias, sino que solo oscilan alrededor de un punto. Por ejemplo, para una intensidad sinusoidal de densidad de corriente eficaz de 10 A/mm^2 , que equivale a 1000 A/cm^2 , la densidad de corriente instantánea es $j = 1000\sqrt{2}\text{sen}(\omega t)$, en A/cm^2 , lo que da para la velocidad de arrastre de los electrones en cm/s

$$v = \frac{j}{qn} \cong \frac{1000\sqrt{2}\text{sen}(\omega t)}{1.602 \times 10^{-19} \times 8.45 \times 10^{22}} \cong 0.10\text{sen}(\omega t)$$

Es decir, una velocidad alterna de valor máximo 0.10 cm/s o sea, 1 mm/s .

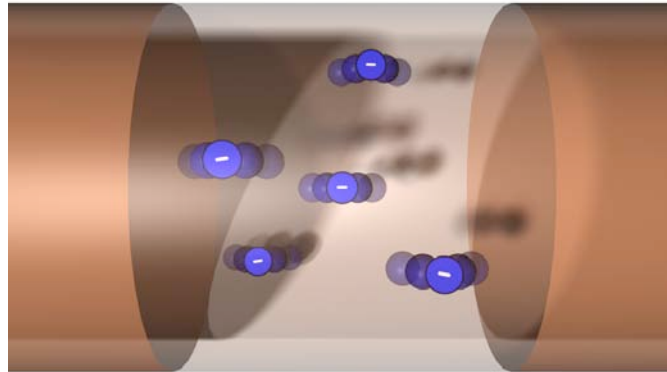


Fig. 6.- Si la corriente es alterna, los electrones solo vibran dentro del conductor. La separación máxima respecto al punto central de la oscilación es solo de algunos micrómetros.

Para frecuencia de 50 Hz la pulsación vale

$$\omega = 2\pi f = 2\pi \times 50 \cong 314 \text{ rad / s}$$

Por tanto, el máximo desplazamiento de los electrones libres es

$$X_m = \frac{J_m}{qn\omega} \cong \frac{1000\sqrt{2}}{1.602 \times 10^{-19} \times 8.45 \times 10^{22} \times 314} \cong 3.3 \times 10^{-4} \text{ cm} = 3.3 \mu\text{m}.$$

Algo más de tres micrómetros. Resulta, por consiguiente, que, en corriente alterna, para una densidad de corriente eficaz de 10 A/mm², el movimiento de los electrones en los conductores solo consiste en una ligerísima oscilación por la que se desplazan tres micras aproximadamente a cada lado de un punto central.

Conclusiones

Que la velocidad de arrastre de los electrones libres en los conductores es la velocidad de la luz es un error muy extendido. Se ha visto en este artículo que, si fuera esa su velocidad, la densidad de corriente en los conductores sería enorme y constante, que las fuerzas por choques en los ángulos y la fuerza centrífuga en las curvas también serían enormes, y que la energía que los electrones cederían al conductor lo volatilizaría. Realmente las consecuencias de esa velocidad harían imposible la existencia de instalaciones eléctricas.

Por el contrario, para las densidades de corriente ordinarias, la velocidad de los electrones pocas veces supera el milímetro por segundo. Para esas mismas densidades en corriente alterna, los electrones solo oscilan imperceptiblemente, pues apenas se alejan alternativamente muy pocas micras del punto central de la oscilación.

Hay conceptos erróneos muy extendidos. Algunos afectan a los fundamentos físicos, por lo que dificultan la correcta asimilación del saber posterior. El análisis crítico que consiste en comprobar la compatibilidad de lo recién aprendido con lo que ya se sabe, es un buen escudo contra los posibles errores.

Referencias

- [1] M. E. Van Valkenburg, *Análisis de redes*, Editorial Limusa, México 1983, pág. 18.
- [2] F. R. Quintela, R. C. Redondo, J. M. G. Arévalo, N. R. Melchor y M. M. Redondo. 'Carga de una batería' y 'electricidad', dos términos de utilización confusa. *Técnica Industrial*. Junio de 2005.
- [3] <http://www3.usal.es/electricidad>
- [4] Félix Redondo Quintela, Roberto Carlos Redondo Melchor. *Redes eléctricas de Kirchoff*, 2ª edición. Ed. Revide S. L. Béjar 2005.