

# Experiencias de Electricidad

1. - Corrientes alternas y continuas.
2. - Freno eléctrico.
3. - Fenómenos de autoinducción y transformadores.

Por **CARLOS LOPEZ BUSTOS**  
(Catedrático del Instituto de Ciudad Real)

## CORRIENTES ALTERNAS Y CONTINUAS

Se colocan las bornas con aislador en los soportes cónicos y se unen al transformador variable (T) (fig. 1). De ellas es muy fácil derivar dos circuitos; en uno se coloca la bobina de 450 espiras (B) y un portalámparas con la correspondiente lámpara de 3,5 volt. (L). En el otro, el rectificador 0-15 volt. 8 amp. (R), una bobina de 450 (B') y una lámpara de 3,5 volt. (L'), como en el anterior.

De este modo, el primero será recorrido por corriente alterna y el segundo por corriente continua. Se regula el transformador para que luzcan ambas lámparas (siempre la de el

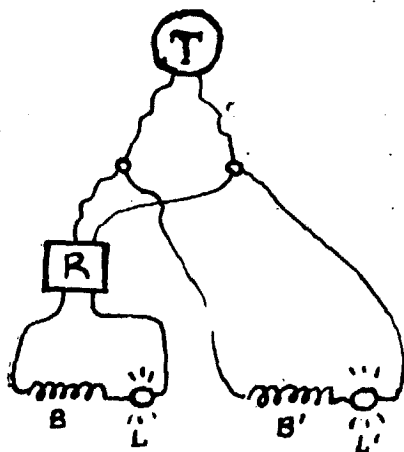


FIG. 1

de continua lo hará con menor intensidad a causa de la resistencia del rectificador). Si en estas condiciones introducimos en la bobina del circuito de alterna el núcleo en U de hierro dulce, disminuirá notablemente a causa de la autoinducción la intensidad de la corriente, y con ella la luz de la lámpara e incluso, cerrando el circuito magnético con el núcleo corto se logrará que no luzca.

Repetiendo estas mismas operaciones con la bobina del circuito de corriente continua los efectos serán mucho menores, aunque apreciables, pues no se trata de una corriente realmente continua, sino de una corriente «rectificada».

Por ello es interesante repetir las alimentando el circuito no con el rectificador, sino con una pila seca. En este caso no se observará efecto alguno, pues la corriente es realmente continua. Con este circuito de la pila es posible hacer otro experimento interesante: se introduce en la bobina un núcleo de hierro dulce en U, y de este modo tendremos un electroimán. Si se cierra con rapidez su circuito magnético con el núcleo corto, cesan bruscamente las fuerzas desmagnetizantes del campo  $H_m$  originado en los polos del electroimán y opuesto

al  $H$  del solenoide. En resumen, se produce un rápido aumento del campo magnético que induce una corriente en sentido contrario a la del circuito y que se aprecia por un momentáneo descenso de la luz de la lámpara. Por el contrario, al retirar rápidamente el núcleo corto y abrir el circuito magnético, como es fácil comprender, se producirá una corriente inducida en el mismo sentido que la del solenoide, consecuencia de la disminución del campo magnético al aparecer de nuevo el campo  $H_m$ , y que es acusada por un brusco aumento de la luz de la lámpara. Estas corrientes podríamos llamarlas «extracorrientes de apertura y cierre del circuito magnético».

Colocando la otra bobina de 450 en el otro lado del núcleo en  $U$  conectada a una lámpara de 3,5 volt. es posible «separar» dichas corrientes que se aprecian por un momentáneo encendido de esta lámpara al abrir y cerrar el circuito magnético. En este caso, en el primer circuito no se coloca lámpara, sino solamente la pila seca.

## FRENO ELECTRICO

Se monta el motor eléctrico de corriente continua ( $M$ ) (figura 2) de la práctica EDF 42 del equipo «Torres Quevedo». Llevando hasta el máximo el voltaje, se le hace girar rápidamente, y si está bien engrasado, al abrir el circuito continúa girando bastante tiempo.

Por medio de un conmutador doble ( $C$ ) es posible lograr que al mismo tiempo que se abre el circuito de alimentación se cierre un circuito derivado de las escobillas con una resistencia intercalada, y al hacer esta maniobra se frena el motor con más rapidez.

Resulta más vistoso el experimento colocando en este segundo circuito una lámpara de 3,5 volt. ( $L$ ), que se encenderá momentáneamente y el motor cesará de girar.

No hay que advertir la serie de consideraciones sobre la transformación de la energía en sus diversas formas que se pueden deducir de esto y su importancia técnica: freno eléctrico y frenado por recuperación.

El primero corresponde al primer caso; la energía cinética del inducido se transforma en energía eléctrica, el motor funciona como dinamo, y ésta, en calor en la resistencia. Lo mismo que en los frenos mecánicos, la energía cinética se disipa en forma de calor, pero es posible recuperar esta energía, no en forma de luz, como en el segundo experimento, sino como energía eléctrica que se devuelve a la línea. En esto consiste el frenado por recuperación que se utiliza en los ferrocarriles. Gracias a él, se logra que la energía eléctrica producida por los motores de las locomotoras cuando actúan como dinamos en los trayectos de bajada, sea devuelta a los cables y sirva para la tracción de los que suben.

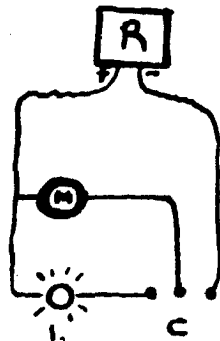


FIG. 2

## FENOMENOS DE AUTOINDUCCION Y TRANSFORMADORES

Las prácticas EDC 13 y EDC 14 del *Manual de Experimentos de Física* del Instituto «Torres Quevedo» tienen para mí el inconveniente de hacer desaparecer las extracorrentes de cierre y de apertura con montajes distintos, y por ello he pensado otro esquema sencillo para mostrar los fenómenos de autoinducción.

Con el núcleo en U de hierro dulce y el corto se cierra un circuito magnético como el utilizado en las prácticas de transformadores, con dos bobinas iguales de 450 espiras. Con una de ellas y una lámpara de 3,6 voltios se cierra un circuito que denominaremos secundario. La otra bobina se conecta al rectificador, con una tensión muy pequeña, o simplemente a una pila seca. A este circuito le denominaremos primario y al cerrarle se observa cómo momentáneamente se enciende la lámpara del secundario, a causa del mismo efecto de inducción que produciría la extracorrente de cierre, originado por el aumento del flujo magnético, cuyo valor pasa de cero al máximo. Igualmente observaremos cómo también se enciende al abrirle, a causa de la disminución del flujo magnético desde dicho valor hasta anularse. Esta disminución es la que provocaría la extracorrente de apertura. Al tratar de los transformadores veremos lo que realmente ocurre a causa de la inducción mutua entre ambas bobinas.

Se observará también cómo la bombilla brilla más en el momento de abrir el circuito que al cerrarle, de acuerdo con el hecho de que la extracorrente de apertura es siempre más intensa.

Naturalmente, con esta idea son posibles muchos montajes similares. Por ejemplo, colocar en el circuito secundario, a más de la lámpara, un aparato de medida (escala 1 amp. c. c.), funcionando como galvanómetro, con la aguja en la parte central. En él, observando las desviaciones de aquella, comprobaremos cómo las extracorrentes tienen sentidos opuestos.

También puede colocarse otro aparato de medida en el circuito primario, pero como la intensidad con la bobina de 450 espiras es excesiva, se cambian ambas bobinas por las de 1.800. Ahora observaremos cómo al abrir y al cerrar el circuito la aguja del aparato del secundario se mueve en sentido opuesto a la del primario.

Por último, puede hacerse un montaje más completo (fig. 3) con una

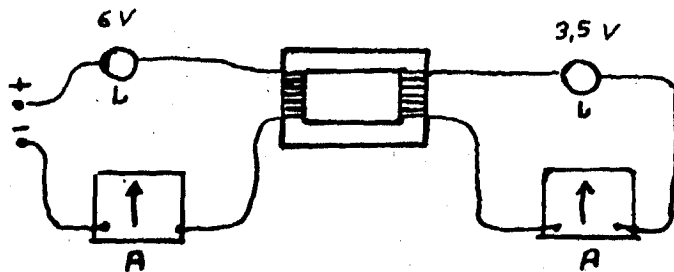


FIG. 3

bobina de 450, un aparato de medida (A) y una lámpara en cada circuito (L). La del primario debe ser de 6 volt., pues para observar los fenómenos es preciso una tensión mayor. (Naturalmente, será preciso la fuente de corriente continua del equipo, transformador-rectificador.)

Con este montaje se observan simultáneamente los dos fenómenos: al encender la lámpara de 6 volt. momentáneamente lucirá la del secundario, e igualmente al apagarla, y las desviaciones de las agujas de ambos aparatos al cerrar y al abrir.

Es frecuente que los alumnos, dada la forma en que se suelen explicar los fenómenos de autoinducción, crean que este fenómeno es propio de las corrientes continuas, cuando en realidad con éstas sólo se dejan sentir los efectos de un modo pasajero.

Con las corrientes alternas las fuerzas electromotrices debidas a los fenómenos de autoinducción que incluso pudiéramos llamar «fuerzas contraelectromotrices», actúan de un modo permanente, oponiéndose en todo momento a las fluctuaciones del flujo y, por tanto, de la corriente primaria. De este modo se origina un nuevo tipo de «resistencia», propio sólo de las corrientes alternas, que se denomina «inductancia».

Después de hacer la demostración anterior es muy interesante repetirla alimentando el primario con corriente alterna (ahora la lámpara del primario puede ser también de 3,5 volt.) y observar cómo la lámpara del secundario permanece encendida mientras esté conectado el primario.

Veamos lo que ocurre realmente. En el caso de no existir más que una bobina, la corriente alterna es prácticamente anulada por la fuerza contraelectromotriz inducida, y sólo pasa la intensidad necesaria para producir las fluctuaciones del campo magnético precisas para originar dicha fuerza contraelectromotriz, igual y contraria en todo momento a la aplicada (en oposición, es decir, desfasada 180°). Si despreciamos la resistencia óhmica,

$$V = L \frac{dI}{dt},$$

pero como

$$V = V_m \cdot \text{sen } 2\pi f \cdot t \quad I = I_m \cdot \text{sen } 2\pi f \cdot t,$$

tendremos

$$I_m = \frac{V_m}{2\pi \cdot f \cdot L}$$

siendo  $2\pi \cdot f \cdot L$  la inductancia ( $L$  es el coeficiente de autoinducción) e  $I_m$  el valor máximo de dicha intensidad mínima que atraviesa la bobina. Naturalmente, al aumentar la tensión aplicada,  $V$ , aumentará esta corriente, pues para oponerse a aquélla se precisa una mayor intensidad, cumpliéndose la ley de Ohm.

En resumen, la fuerza contraelectromotriz tiende a producir una corriente igual y en oposición (desfasada 180°) a la que circularía de no existir los efectos de autoinducción.

Con dos bobinas; si llamamos  $I_1$  e  $I_2$  a las intensidades de las corrientes del primario y del secundario, tendremos cómo la tensión aplicada en el primero  $V$  será igual a la suma de la autoinducida en él por la propia corriente y la inducida por la del secundario. Despreciando la resistencia de la bobina  $R_1$  podremos escribir:

$$V = L_1 \frac{dI_1}{dt} + M \frac{dI_2}{dt}$$

$L_1$ , coeficiente de autoinducción del primario proporcional al cuadrado del número,  $n_1$ , de espiras del mismo,  $n_1^2$ .

$M$ , coeficiente de inducción mutua entre las dos, proporcional a  $n_1 \cdot n_2$  ( $n_2$ , número de espiras del secundario).

En el secundario, como no se aplica tensión externa alguna, la fuerza electromotriz autoinducida será igual y contraria a la inducida por el primario en él:

$$-M \frac{dI_1}{dt} = L_2 \frac{dI_2}{dt}$$

despreciando su resistencia,  $R_2$ , y siendo  $L_2$  su coeficiente de autoinducción proporcional a  $n_2^2$ .

La corriente del secundario por los efectos de inducción tiende a hacer disminuir el flujo  $\phi$ , y por lo tanto, la fuerza contraelectromotriz del primario (la suma antes indicada). Pero como ésta hemos visto que es igual a la tensión aplicada que se hace permanecer constante, también lo será el flujo  $\phi$  en ambos arrollamientos.

Si el circuito del secundario se abre  $I_2 = 0$ , por el primario sólo circulará, como en el caso de una sola bobina, la corriente mínima denominada de imantación  $I_0$ , y tendremos:

$$\phi = L_1 \cdot I_0 = \frac{V}{2\pi f}$$

Si cerramos el circuito circulará una corriente  $I_2$  y el valor del flujo será igual al producido por ambas corrientes,  $I_1$  e  $I_2$ :

$$L_1 \cdot I_1 + M \cdot I_2 = L_1 \cdot I_0 = \frac{V}{2\pi \cdot f}$$

Es decir, el aumento de flujo producido sobre el originalmente existente debido a  $I_0$ ,  $L_1 (I_1 - I_0)$ , es anulado rigurosamente por el flujo  $M I_2$ , y resulta, por tanto, que siempre el flujo es debido únicamente a la corriente de imantación  $I_0$ .

Teniendo en cuenta los valores de  $L_1$  y  $M$  podremos escribir:

$$I_0 \cdot n_1^2 = I_1 \cdot n_1^2 + I_2 \cdot n_1 \cdot n_2 \quad I_0 = I_1 + \frac{n_2}{n_1} I_2$$

$$I_1 = I_0 \frac{n_2}{n_1} I_2$$

Si  $I_2 = 0$ , como ya se ha indicado,  $I_1 = I_0$ , y a medida que aumenta  $I_2$  aumenta  $I_1$ . Cuando el transformador trabaja a plena carga (el montaje nuestro es en realidad un transformador),  $I_0$  es despreciable frente a  $I_1$  y se puede escribir:

$$-I_2 \cdot n_2 = I_1 \cdot n_1 \quad [1]$$

El signo  $-$  indica que la corriente  $I_2$  está en oposición con la  $I_1$ .

En el diagrama de la figura 4 se indica la composición vectorial de las intensidades. Si en el circuito secundario sólo hay resistencias óhmicas,  $I_2$  estará en fase con la tensión  $V_2$ , e igualmente su opuesta  $-I_2$ , originada en el primario.

La corriente de imantación  $I_0$ , como se ha despreciado la resistencia óhmica y sólo existe, por lo tanto, una inductancia, estará desfasada (retrasada)  $90^\circ$  con respecto a  $V_1$ , y, por lo tanto, con respecto a  $I_2$ . La intensidad total  $I_0$  es la resultante de ambas.

En cuanto a las tensiones  $V_1$  y  $V_2$  entre los bornes de ambos arrollamientos, es fácil deducir:

$$V_1 = n_1 \frac{d\phi}{dt} \quad \text{tensión aplicada.}$$

$$V_2 = n_2 \frac{d\phi}{dt} \quad \text{tensión que se aplica al circuito.}$$

De ambas:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{n_1}{n_2}$$

[2]

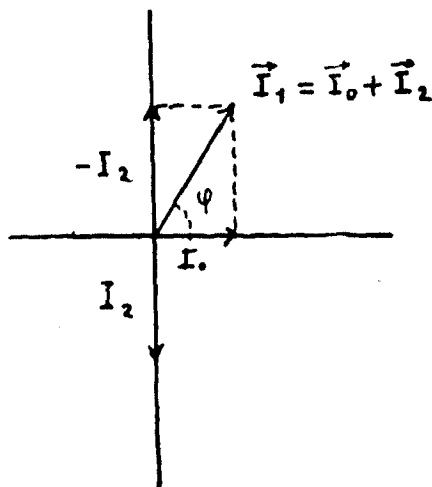


FIG. 4

Esta y la [1] constituyen las fórmulas fundamentales del transformador. Variando la relación  $n_2/n_1$  (relación de transformación) es posible hacer variar las características V e I de una corriente alterna.

Si la relación de transformación es mayor que 1, se dice que el transformador es elevador,  $V_2 > V_1$ , pero en la misma proporción disminuye I,  $I_2 < I_1$ . Todo esto puede comprobarse con la práctica EDB del Manual de Torres Quevedo.

Volviendo a nuestro montaje, al aumentar la tensión aplicada observaremos un aumento de la luz en ambas lámparas, y al abrir el circuito secundario la del primario apenas brillará, alimentada sólo por la débil corriente de imantación  $I_m$ .

De las relaciones [1] y [2] se deduce cómo la potencia  $V \cdot I$  se mantiene constante en uno y otro circuito. Las cosas ocurren como si en el primario la energía eléctrica se transforma en magnética y aparece una fuerza contraelectromotriz E. Sin despreciar su resistencia podremos escribir:

$$V_1 = R_1 \cdot I_1 + E_c.$$

En el secundario, dicha energía magnética se transforma en eléctrica y habrá una fuerza electromotriz E:

$$V_2 = E - R_2 \cdot I_2.$$

En cuanto a la corriente de imantación, volvamos a los efectos que en las corrientes continuas produce la autoinducción. En el periodo de cierre, mientras el flujo aumenta de 0 a  $\phi$ .

$$E = L \cdot \frac{dI}{dt};$$

$$I = \frac{E \cdot t}{R};$$

de donde

$$E = I \cdot R + L \cdot \frac{dI}{dt}.$$

Expresada en forma de energía:

$$E \cdot I \cdot t = R \cdot I^2 \cdot t + I \cdot L \cdot \frac{dI}{dt} \cdot t.$$

El primer sumando es la energía que se manifiesta en el circuito en forma de calor y el segundo la que queda en forma «potencial» en el campo magnético, como energía electromagnética, y se suele denominar energía intrínseca de la corriente.

Después, en el periodo de apertura, dicha energía origina la extracorrente de apertura y se disipa en forma de calor, especialmente en la chispa, pues allí la resistencia es mayor.

En las prácticas EDC 13 y 14 que hemos indicado al principio puede observarse esto. En la primera, la bombilla del circuito con la bobina de fuerte autoinducción se retrasa a causa de que la energía en los primeros momentos es absorbida, como ya se ha indicado. En el segundo puede verse cómo la energía antes absorbida se recupera después de abierto el interruptor en forma de la luz momentánea de la lámpara de neón.

En nuestro montaje la energía, que en el periodo de cierre es transformada en forma electromagnética y hace que se retrase el establecimiento de la corriente, es la que a través de los fenómenos de inducción vemos aparecer en la lámpara del circuito de la segunda bobina en forma de luz. Igualmente en la apertura dicha energía produce de nuevo el encendido de la lámpara.

Despreciando la resistencia interna, la energía de imantación no supone pérdidas energéticas. Origina una energía fluctuante que varía cuatro veces por periodo, siendo en cada alternancia de la corriente: primero negativa en el cuarto de periodo correspondiente al aumento de flujo (se absorbe), y luego positiva, en el segundo, en el correspondiente a la disminución (se recupera). Su valor medio durante un periodo completo es cero, de modo que de no haber pérdidas por histéresis,  $I_0$  no supone consumo de energía exterior.

Obsérvese que la corriente  $I_0$  está desfasada  $90^\circ$  con respecto a la tensión y su potencia será nula:

$$W = I_0 \cdot V_0 \cdot \cos 90 = 0.$$

Por último veamos las pérdidas que se pueden producir en los transformadores. En primer lugar los calentamientos  $R_1 \cdot I_1^2$  y  $R_2 \cdot I_2^2$ .

Además, el calentamiento debido a las corrientes de Foucault que se originan en la masa del núcleo, como consecuencias de las fluctuaciones del campo magnético y que se evitan o al menos atenúan utilizando núcleos formados por láminas. De este modo se «fragmentan» alargando su recorrido en total y, por tanto, aumenta la resistencia disminuyendo la intensidad (ver práctica EDB 71). A causa de los fenómenos de histéresis, la energía absorbida por el núcleo al imantarse no es la misma que cede al desimantarse, y la diferencia se pierde en forma de calor. Por este motivo deben hacerse los núcleos de un material como el hierro dulce, cuyo ciclo de histéresis sea lo más estrecho posible, es decir, tenga un campo coercitivo pequeño.

El fundamento del carrete de Ruhmkorff también lo podemos estudiar. Supongamos el montaje primero con las dos bobinas, utilizando corriente continua; si abrimos y cerramos con rapidez, la bombilla del secundario permanecerá encendida casi todo el tiempo, apreciándose cómo fluctúa la luz emitida entre un valor menor, cierre, y otro mayor, apertura. En los carretes de inducción se logra la interrupción intermitente por un artificio semejante al del timbre eléctrico. Además, la tensión se eleva colocando como secundario una bobina de muchas más espiras, coaxial con el primario. Con objeto de aumentar aún más la tensión inducida en el secundario, en los periodos de apertura, se coloca un condensador que



absorbiendo la extracorrente que se prolonga a través de la chispa, abierto el circuito, haga más rápida la disminución del flujo. Si la resistencia de la bombilla se hace mayor es posible que sólo se encienda en los periodos de apertura, lográndose así que la corriente que la atraviese sea rectificadora. En los carretes, separando lo suficiente los electrodos, la chispa sólo salta en un sentido, en el de las corrientes inducidas en la apertura, y se logra tener una corriente «rectificada», de mucha mayor tensión que la primaria.

Para completar, exponemos unas breves consideraciones sobre las clases de «resistencias» que se presentan en los circuitos de corriente alterna. La meramente óhmica: el campo alterno acelera las vibraciones de los electrones de la masa metálica en un sentido y en el opuesto, transformándose en energía cinética (en energía interna). A su vez los electrones comunican ésta por choque a los iones metálicos de la red cristalina y la energía se disipa en forma de calor hacia el exterior.

En las inductancias, la energía eléctrica se utiliza en establecer y hacer desaparecer un campo magnético fluctuante y queda allí «retenida» en la forma que llamamos intrínseca, pero no se pierde, salvo en el caso de que se produzcan fenómenos de histéresis.

Lo mismo ocurre cuando se intercala un condensador, una capacitancia; pero en este caso el campo variable es eléctrico. El condensador se carga y descarga y hay «retención», pero no pérdida de energía.

Los circuitos con inductancia son cerrados y la energía de los campos magnéticos vuelve a ellos en forma de las corrientes inducidas, pero si hay un condensador el circuito queda abierto entre las armaduras y se origina una pérdida de la energía electromagnética en la forma que vamos a ver. En un circuito con un condensador, entre las armaduras de éste tendremos un campo eléctrico y sus variaciones inducen un campo magnético. Ahora bien; a su vez, las variaciones de éste originan un campo eléctrico de líneas cerradas, y no corrientes eléctricas, puesto que no existen conductores en los que puedan movilizarse los electrones. En resumen: queda un campo eléctrico y magnético variable, cuyos vectores E y H varían en el tiempo y el espacio, lo mismo que las partículas materiales que constituyen una onda sonora, y estas ondas electromagnéticas, propagándose por el espacio, suponen una pérdida de energía en los circuitos en los que existan condensadores.

## LA EDUCACION CRISTIANA DE LOS HIJOS

Por JUAN MONEVA PUYOL

Ptas. 55

BIBLIOTECA PEDAGOGICA DE LA REVISTA "ENSEÑANZA MEDIA"