El aspecto común de estos dos casos es que al inducir una corriente en una dirección se crea un flujo inducido que se opone al cambio en el flujo externo que impone B_{ext}. Es decir, el *flujo inducido trata de mantener la condición de flujo original.* Esta observación es un principio general conocido como *ley de Lenz* :

> *Un cambio en el flujo magnético externo Φ_{ext} por una bobina induce una fem en la bobina. La dirección de la corriente producida por esta fem es tal que el campo magnético que crea, B_{ind}, produce un flujo Φ_{ind} que se opone al cambio en Fext.*

Un enunciado más conocido de esta ley es:

> *La dirección de una corriente inducida es tal que se opone a la causa que la produce.*

El signo menos en la ecuación D.3 indica la polaridad de la fem inducida, que se encuentra si se considera la corriente inducida y su efecto, de acuerdo con la ley de Lenz.

La aplicación de la ley de Lenz para determinar la dirección de una corriente inducida es más sencilla si se recuerda el procedimiento siguiente :

1.- Determinar la dirección del campo magnético externo que pasa por la bobina. Una ves que se conozca la dirección de B_{ext}, se sabrá cuál es el signo de Φ_{ext}. Si Bext tiene componente sobre el eje x positivo, Fext será positivo ; si Bext tiene componente sobre el eje x negativo, Fext será negativo.

2- Determinar si B_{ext} aumenta o disminuye.

3.- Determinar el signo que debe tener Φ_{ind} para oponerse al cambio en Φ_{ext} que ocasiona el cambio en B_{ext}. Recordemos que el flujo no necesariamente se opone al flujo externo, pero siempre se opone a los *cambios* en el flujo.

4.- Determinar la dirección que debe tener B_{ind} para producir un flujo Φ_{ind} con el signo determinado en el paso 3.

5.- Determinar con la regla de la mano derecha la dirección que debe tener la corriente inducida para crear la dirección de B_{ind} establecida en el paso 4.

Hasta ahora se han considerado cambios de flujo producidos por cambios en el campo magnético que pasa por una bobina. Sin embargo, recordemos que el flujo también depende del área de la bobina y de su orientación con respecto al campo. Por lo tanto, el flujo por una bobina puede cambiar en cualquiera de las tres formas :

1.- Cambios en B.

2.- Cambios en el área *A*.

3.- Cambios en θ.

Las leyes de Faraday y Lenz han demostrado ser válidas *sin importar cómo se ocasione el cambio de flujo.*

D.4.- INDUCCIÓN MUTUA

La ley de Faraday de la fem inducida en una bobina se aplica a cualquier método de cambio del flujo en la bobina. Supongamos que tenemos dos bobina lado a lado, como en la figura D.8. Al abrir el interruptor, las dos bobina s tienen flujo magnético de cero ; al cerrar el interruptor repentinamente, la bobina primaria actuará como electroimán y generará un flujo en la región cercana. Una parte de este flujo pasará por la bobina secundaria y por lo tanto el flujo en la bobina secundaria cambiará al cerrar repentinamente el interruptor. De acuerdo con la ley de Faradady, se generará una fem inducida en la bobina secundaria mientras la corriente en la bobina primaria sube de cero a su valor final. Debes demostrar que la dirección de la corriente inducida que circula por la resistencia de la figura D.8 irá de *b* a *a* al cerrar el interruptor y en sentido opuesto al abrirlo.

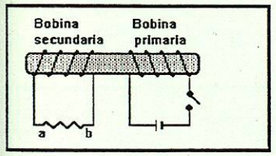


Fig. D.8.- ¿Porqué la corriente va de *a* a *b* en la bobina secundaria *en el instante en que se abre el interruptor S ?*

La magnitud de la fem inducida en la bobina secundaria depende de muchos factores geométricos, entre los cuales están el número de vueltas o espiras de alambre en cada bobina, la proximidad de las bobinas, su orientación relativa y su área transversal. Además, el flujo en la bobina secundaria será proporcional a la corriente eléctrica en la bobina primaria, de manera que la fem inducida en la bobina secundaria será proporcional a la rapidez de cambio de la corriente eléctrica en la bobina primaria, DIp/Dt. Con base en lo anterior, se escribe la siguiente ecuación de la fem inducida en la bobina secundaria :

$$fem = -M\frac{\Delta I_p}{\Delta t} \quad \textbf{(ec. D.4)}$$

donde la constante de proporcionalidad M considera los efectos de la geometría de las dos bobinas. M se conoce como *inductancia mutua* de las

dos bobinas. Si la fem está en volts, I en amperes y t en segundos, la unidad de inductancia M se define como el *henry* (H) o $\frac{V \cdot s}{A}$

Por último, una forma importante de aumentar la inductancia mutua es enlazando las dos bobinas a través de un núcleo de material ferromagnético como el hierro. Por el gran valor de permeabilidad magnética relativa, el campo producido por una corriente en la bobina primaria aumenta mucho con respecto a lo que sería sin el núcleo de hierro. A su vez, esto aumenta el flujomagnético que enlaza a las dos bobinas con cualquier corriente que exista en la primaria. Al variar la corriente en la bobina primaria, el flujo cambia y la fem inducida en la bobina secundaria es proporcionalmente mayor que lo que sería sin el núcleo. Esto da como resultado un gran valor de inductancia mutua, como puede verse en la definición de M de la ecuación D.4.

D.5.- AUTOINDUCTANCIA

La ley de Faraday dice que cualquier cambio en el flujo magnético por una bobina induce una fem en la bobina. Una bobina aislada que transporta corriente crea un campo magnético cuyo flujo pasa por el plano de la bobina. De esto se desprende que al variar la corriente en la bobina, cambia el flujo que pasa por ella. Por lo tanto, en cualquier instante en que cambia la corriente en una bobina, se *autoinduce* una fem en la bobina durante ese cambio.

Supongamos que la corriente ilustrada en la figura D.9 cambia de cero a un valor finito cuando se cierra el interruptor. El aumento de corriente genera un campo magnético creciente que se dirige hacia la izquierda por la bobina. Según la ley de Faraday, se induce una fem en la bobina que intenta producir un campo opuesto, hacia la derecha por la bobina. Por tanto, la fem inducida debe oponerse a la fem de la batería. Sin embargo, si de repente se abre el interruptor, la fem inducida ayudará a la batería, en lugar de oponerse a ella. Debes ser capaz de demostrarlo.

La rapidez de cambio del flujo magnético en la bobina será proporcional a la rapidez de cambio de la corriente eléctrica en la bobina. Si DI/Dt es la rapidez de cambio de la corriente eléctrica por la bobina, se puede escribir la siguiente ecuación para la fem media inducida :

$$\overline{fem} = -L\frac{\Delta I}{\Delta t} \quad \textbf{(ec. D.5)}$$

La constante de proporcionalidad L se denomina *autoinductancia* de la bobina. Depende de la geometría de la bobina y del material del núcleo alrededor del cual se enrolla la bobina. L tiene las mismas unidades que la inductancia mutua: *henrys*.

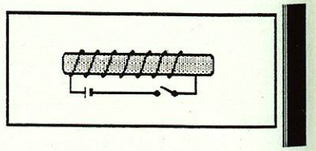


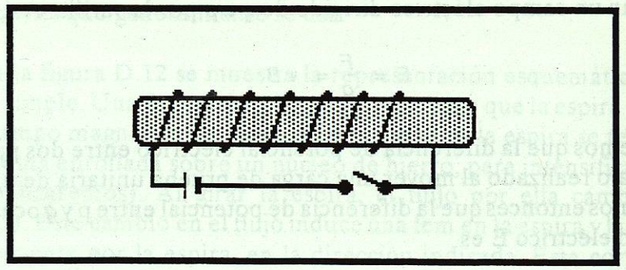
Fig D.9.- Al cerrar por primera vez el interruptor, la bobina inducirá una fem en sí misma. Esta fem, ¿será a favor o en contra de la batería ?

Si la bobina está alrededor de un núcleo de hierro, el flujo que pasa por ella es mucho mayor que si estuviera presente un material no ferromagnético. Por tanto, si se desea una autoinductancia muy grande, se deberá enrollar la bobina sobre un núcleo de hierro. Estos conceptos son muy importantes en los circuitos de corriente alterna (ca), donde la corriente, y por consiguiente el flujo, cambian continuamente.

D.6.- FEM DE MOVIMIENTO O FEM CINÉTICA

Una fem puede inducirse de varias maneras. Hasta ahora nos hemos centrado en los camnios de flujo en bobinas estacionarias y la fem inducida correspondiente. Sin embargo, en ocasiones la fem se induce como resultado del movimiento de un alambre por el campo magnético. En estos casos es más conveniente obtener un resultado que no se base de manera directa en el concepto de cambio de flujo en una espira.

Analicemos el sencillo experimento que se muestra en la figura D.10. Una varilla de longitud l rueda con velocidad v sobre los alambres paralelos que forman una espira en forma de U por m, r, s, y n.



FigD.10.- Cuando la varilla se mueve hacia la derecha, el área encerrada por el circuito *pqrsp* aumenta y crece el flujo magnético por el circuito. De acuerdo con la ley de Lenz, esto ocasiona la inducción de una fem en el circuito.

Observemos que la varilla y los alambres forman un circuito(*pqrsp*) a la izquierda de la varilla. cuando ésta se mueve hacia la derecha, aumenta el área de este circuito.

Supongamos que en esta región existe un campo magnético B dirigido hacia afuera de la página. Cuando la varilla avanza, el flujo por el área del circuito aumenta porque el área crece. Por lo tanto, se induce una fem en el circuito. Para calcular esta fem observemos que en el tiempo Δt la varilla rueda una distancia $v\Delta t$. Como resultado, el área del circuito aumenta en una cantidad $\Delta A = l(v\Delta t)$, que es el área a la derecha der la varilla en la figura D.10. El cambio en el flujo que acompaña a este movimiento es

$$\Delta \Phi \; B \; \Delta A = B \; lv\Delta t$$

De acuerdo con la ley de Faraday, la magnitud de la fem inducida en el circuito es

$$\textit{fem inducida} = \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

Hay otra forma de analizar la situación. Consideremos una carga positiva *q* en la varilla móvil, como se muestra en la figura D.11. Esta carga, por su movimiento con velocidad v por el campo B, experimenta una fuerza. En este caso, el campo es perpendicular a la velocidad de la carga, así que . Por lo anterior, llegamos a la conclusión de que

F = fuerza sobre q = qvB

¿Hacia dónde se dirige la fuerza sobre *q* ?

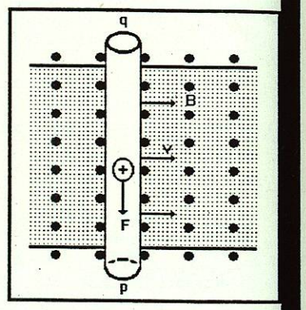


Fig. D.11.- Fuerza sobre una carga en una varilla conductora que se mueve en forma transversal a un campo magnético.

A partir de la definición del campo eléctrico como fuerza por unidad de carga, se llega a la conclusión de que las cargas que se mueven con la varilla experimentan un campo eléctrico dirigido de *q* a *p* por la varilla. Así,

$$E = \frac{F}{q} = vB$$

Recordemos que la diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos es igual al trabajo realizado al mover una carga de prueba unitaria de un punto a otro. Sabemos entonces que la diferencia de potencial entre p y *q* ocasionada por el campo eléctrico E es

$$V = El = B\,vl$$

Observemos que esto es lo mismo que la fem inducida en el circuito que se calculó con la ley de Faraday. Asimismo, el campo eléctrico inducido por el movimiento de la carga produce una corriente en el sentido de las manecillas del reloj en el circuito, en el mismo sentido que el predicho por la ley de Faraday.

Se pueden resumir estos resultados como sigue :

Un alambre(o una varilla) de longitud l que se mueve con velocidad perpendicular a un campo magnético B y a su longitud tiene una fem inducida a lo largo del alambre dada por : fem inducida = B vl (ec. D.6)

Esto se conoce como *fem cinética*. observemos que no se requiere una espira ni un circuito completo para que se induzca la fem entre los extremos de la varilla. En el caso más general en el que B, v y el alambre no son mutuamente perpendiculares, se deberá usar las componentes de B y v que sean perpendiculares entre sí y con el alambre. El enunciado anterior puede expresarse también de la siguiente manera :

Un alambre en movimiento se induce él mismo una fem proporcional a la rapidez con la que el alambre corta las líneas del campo magnético.

En muchas ocasiones es conveniente usar el concepto de fem cinética.

D.7.- GENERADORES DE CORRIENTE ALTERNA(CA)

Un generador es un dispositivo que convierte la energía mecánica en energía eléctrica. Esto lo logra cambiando el flujo en una bobina e induciendo así una fem entre las dos terminales de la bobina. En teoría, el flujo podría cambiarse moviendo un imán con respecto a la bobina o moviendo la bobina con respecto al imán. El segundo procedimiento es más fácil de realizar en la práctica y el que generalmente se usa.

En la figura D.12 se muestra la representación esquemática de un generador simple. Una fuente de energía externa hace que la espira metálica gire en el campo magnético del imán. (En la práctica, la espira se reemplaza con una bobina enrollada sobre un núcleo de hierro, para intensificar los efectos que analizaremos). Al girar la espira, el flujo por ella cambia en forma continua. Este cambio en el flujo induce una fem en la espira y la fem produce una corriente por la espira, en la dirección indicada. Esta corriente puede usarse para realizar trabajo útil, por ejemplo, para encender un foco como en la figura.

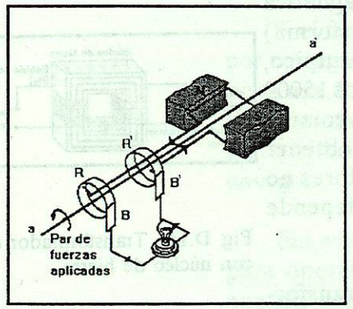


Fig. D.12.- Se produce una fem alternante entre las terminales B y B' cuando la espira gira en un campo magnético externo.

En un generador bien diseñado, la fuente externa que hace girar la bobina realiza un trabajo mínimo en contra de la fricción. Sin embargo, debe efectuar trabajo, ya que el generador produce corriente que puede realizar un trabajo. Para ver como ocurre este intercambio del trabajo de entrada y el trabajo de salida, recordemos lo que le sucede al alambre con corriente de la bobina. Ya que el alambre pasa a través de un campo magnético, la corriente experimenta una fuerza debido a dicho campo. Como en la sección anterior, esta fuerza tiene una dirección que se opone a la rotación de la bobina ; cuanto mayor sea la corriente, mayor será la fuerza opositora. Vemos entonces que la fuente de energía externa debe efectuar trabajo para girar la bobina y cuanta más corriente se extraiga del generador para realizar