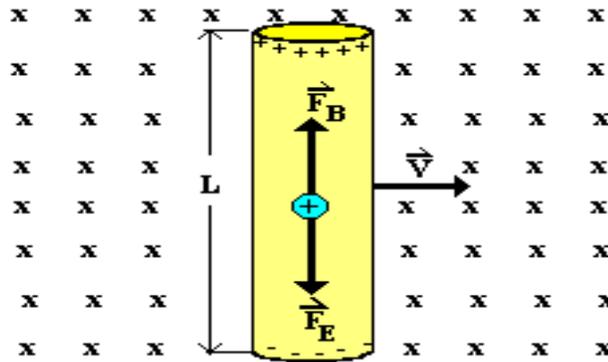


Unidad IX : Electromagnetismo

Esta es la unidad fundamental de Física II, ya estudia la **interacción de los campos eléctricos y magnéticos** en la que se fundamenta el funcionamiento de las máquinas eléctricas (del tipo industrial, alta potencia).

Fuerza electromotriz de movimiento (F_{em})



Si movemos una barra conductora de longitud L perpendicular a un campo magnético B (entrante) a una velocidad v , sobre las cargas positivas se va a generar una fuerza de tipo magnética (F_B) que las llevará hacia arriba y a las cargas negativas hacia abajo (según vimos en la unidad VI, $\mathbf{F} = q \mathbf{v} \mathbf{B}$). Dichas cargas separadas generarán un campo eléctrico (E) de fuerza (F_E); cuando dichas fuerzas se equilibran, en los extremos de la barra podemos medir una cierta tensión eléctrica (f_{em}).

Recordar que $F_{em} = E L = F/q L$ y reemplazando F queda:

$$F_{em} = B L v$$

Siendo B perpendicular a L y la velocidad v perpendicular a ambos.

Dimensionalmente sería: **Volt** = (N / A m) m (m/seg) = **Joule / Coul** . (A= Coul./seg).

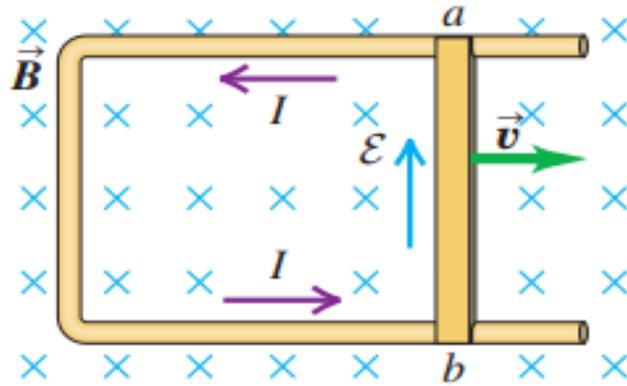
Ley de Faraday-Lenz

La f_{em} que se induce en un circuito es directamente proporcional a la variación del flujo magnético respecto al tiempo y la corriente que genera dicha f_{em} se opone a la variación que le dió origen, o sea :

$$F_{em} = - d\Phi / dt.$$

Esta es la ley básica de funcionamiento de los generadores y transformadores eléctricos.

Supongamos que la barra conductora anterior se desliza sobre dos conductores cerrados entre sí (ver imagen). Se generará una f_{em} con idéntico sentido anterior, al estar cerrado el circuito, circulará una corriente (I) en el sentido indicado; si la barra móvil a- b se sigue desplazando aumentará el flujo magnético encerrado (flujo= B área), porque aumenta el área. Esta variación positiva de flujo (aumento) hará que circule una I que genere otro campo B que se oponga a dicha variación.



Observar que la **I del circuito genera un campo B saliente en el interior del área** (aplicar regla de tirabuzón), lo que hace disminuir el flujo magnético encerrado.

Cuanto mayor sea v (de la barra móvil) mayor será la fem y la I , lo que generará más campo saliente en el área, haciendo disminuir el B original, lo que hará disminuir la fem generada y la I .

Conservación de potencia

Supongamos que el circuito formado (por los conductores cerrados) posee una resistencia R , entonces la I circulante será: $I = \text{fem} / R = B L v / R$.

La **potencia mecánica (de la barra móvil)** es $P = F v$, pero la fuerza que aparece sobre un conductor circulando I en un campo B es: $F = I L B$ (ver unidad VI) reemplazando quedaría:

$$P = I L B v = (B L v / R) L B v = B^2 L^2 v^2 / R = \text{fem}^2 / R = \text{Pot eléctrica}$$

La potencia mecánica con la que se mueve la barra móvil es igual a la potencia eléctrica que podemos extraer del circuito.

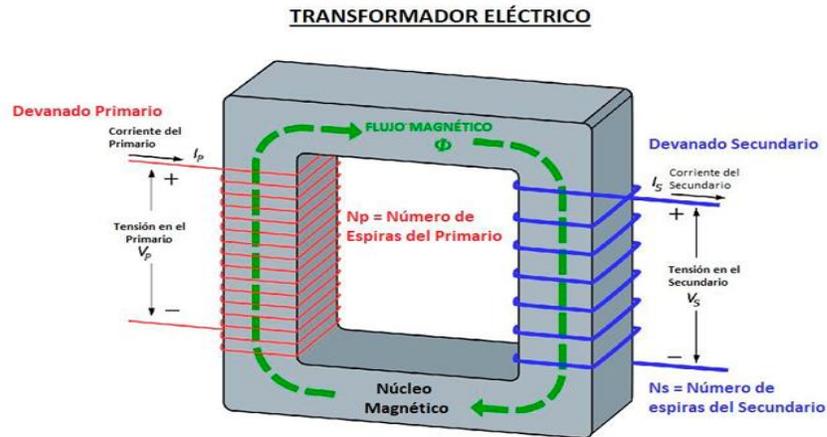
Observar que la ley de **Faraday-Lenz es aplicable a un circuito cerrado**, mientras que la fem de movimiento es para un circuito abierto. Lenz da una manera de encontrar el sentido de la fem inducida, es equivalente en la mecánica a la ley de acción y reacción.

En un **circuito abierto** se habla de **tensión inducida** mientras que en un **circuito cerrado** hablamos de **corriente inducida**.

Aplicaciones: en el caso de un generador eléctrico no podremos sacar más potencia eléctrica de sus bornes de la que ponemos en su entrada en forma mecánica (eólica, hidráulica, térmica, etc.).

En el caso de un **transformador eléctrico**, que es una máquina estática, no existe movimiento, lo que se aplica de un lado es **tensión variable**, lo que genera **corriente variable**, y ésta **flujo magnético variable** lo que, según la ley de Faraday Lenz, **induce** en el otro lado (bobina) otra **tensión (fem)**, que si se cierra el circuito, produce **corriente (inducida)** que al aumentar

aumenta también el campo magnético que se opondrá al que le dio origen. Si queremos sacar más potencia de un lado, tendremos que poner más potencia del otro.

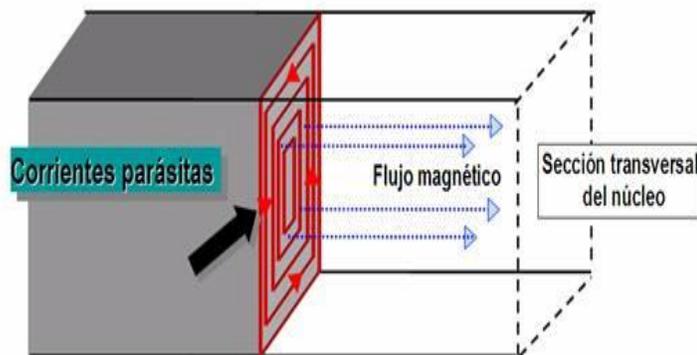


Lo que ocurre en un **transformador** es inducción de tensión porque hay un **campo B variable** (alterno o no) que hace variable el flujo magnético.

Corrientes de Foucault (o parásitas)

Estas corrientes se producen en el interior de los núcleos magnéticos cuando hay un **campo variable** o en el interior de un material conductor cuando se mueve (variación de área) dentro de un **campo magnético constante**.

- Caso de campo variable:



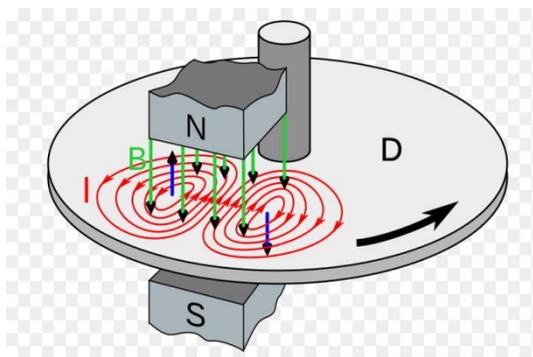
Supongamos una sección transversal del núcleo de un transformador; al existir variación del flujo magnético (porque varía el campo), existirá fem inducida, como el material es conductor, se generan corrientes que se cierran sobre la masa del material.

En la imagen, el campo está creciendo hacia la derecha por lo que se **inducirán corrientes que tienden a disminuir ese crecimiento** (aplicar regla del tirabuzón sobre las corrientes inducidas o parásitas).

Estas corrientes se generan en todas las máquinas eléctricas y, según la ley de Joule ($P = I^2 r$), se producen pérdidas por calentamiento del núcleo. Para minimizarlas se lamina el núcleo en el

sentido longitudinal con espesores de 0,35 a 0,5mm, lo que implica que se aumenta la longitud de recorrido de las corrientes y la r involucrada.

- Caso de campo constante:



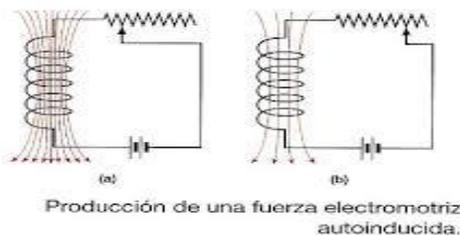
Supongamos un disco de material conductor (aluminio, hierro, etc.) girando, y sobre un lado un imán. Sobre el área que está pasando bajo el imán (variable) se inducen corrientes parásitas con los sentidos indicados en rojo (observar que del lado derecho del imán, donde va **decreciendo el área** las corrientes tienen un sentido que tienden a **aumentar el campo**, mientras que del lado izquierdo donde al **área va creciendo**, las corrientes tienen un sentido que tienden a **disminuir el campo** (ver líneas azules)).

Considerando las corrientes sobre el disco, en el centro del imán, vemos que se genera una fuerza = $B I L$ (L radio del disco) que tiende a frenar el disco.

Este efecto es aplicable en los frenos magnéticos, por ejemplo una bicicleta fija, donde el disco sería la corona y uno puede acercar a alejar el imán (para frenar más o menos).

Ver enlace <https://www.youtube.com/watch?v=1JqNcuSbxPY>

Autoinducción



Supongamos que a una bobina se la produce una variación de corriente (en la imagen de a pasará más corriente que en la de b). **Mientras se produce dicha variación** en la bobina se inducirá un fem (según Faraday-Lenz), que dependerá de la variación del flujo magnético y del número de espiras (N) de la misma, o sea:

Fem = - N dØ /dt. = -N d(BA) /dt = -N A d(µ H)/dt si recordamos $H=N I / l$ y reemplazamos, sacando las constantes fuera del diferencial, queda:

$$\text{Fem} = -(N N \mu A / l) \, dI / dt = - (N^2 \mu A / l) \, dI / dt = - L \, dI / dt$$

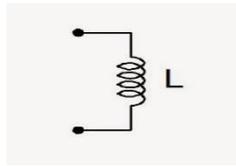
L es el coeficiente de autoinducción o autoinductancia. Depende de las características propias de la bobina (número de espiras (N), permeabilidad del núcleo (μ), área (A) y longitud (l)).

Así como en una resistencia se produce una tensión al circular corriente, **en una bobina se produce tensión al existir una variación de corriente.**

Dimensionalmente **L = volt seg / Ampere = Webber / Ampere = Henry (Hy) (Henrio)**

También como $\text{fem} = -L \, dI / dt$ y $\text{fem} = -N \, d\Phi / dt$ resulta **$L = N \Phi / I$**

En un circuito, una **bobina pura** se representa:



Obs: el análisis realizado corresponde a una bobina pura, es decir, sin considerar la resistencia de su bobinado ni las pérdidas de campo B que pudiera existir.

Las bobinas pueden estar en serie o en paralelo en un circuito y se las trabaja como a las resistencias (en serie o paralelo). Si las mismas están muy próximas entre sí aparece el efecto de mutua inducción (ver más adelante).

Energía almacenada en una bobina pura

La tensión existente en una bobina pura al aplicar una variación de corriente es: $\text{Fem}_L = L \, dI / dt$, o sea, la potencia desarrollada será $P_L = L \, dI / dt \cdot I$ y la **energía**

$$U_L = L \int I \, dI = L I^2 / 2$$

Reemplazando $L = \mu N^2 A / l$ y la I en una bobina por $I = B / n \mu$ queda:

$$U_L = \frac{1}{2} (\mu N^2 A / l) \, B^2 / n^2 \mu^2 = \frac{1}{2} N^2 A l B^2 / \mu = \frac{1}{2} \text{vol.} \, B^2 / \mu \quad (\text{recordar que } n = N / l)$$

La energía almacenada por unidad de volumen (vol.) será:

$$U_L / \text{vol} = \frac{1}{2} B^2 / \mu$$

Recordar que la energía por unidad de volumen en un capacitor es: $U_C / \text{vol} = \frac{1}{2} \epsilon \, E^2$.

Estas serán las dos energías asociadas que viajan en una onda electromagnética (luz, comunicaciones, en un microondas, rayos X, etc.).

Circuitos R-L (Régimen transitorio)

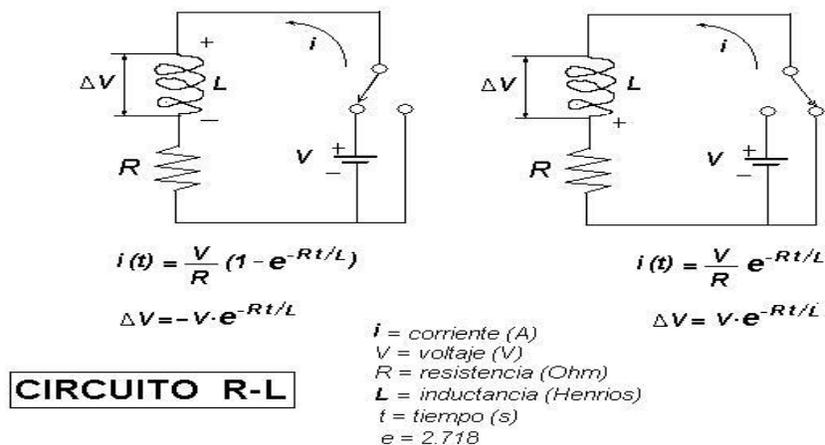
Un circuito de una R y una L en serie (similar al circuito RC) se presenta en la industria, o en las líneas de energía de longitudes considerables cuando se energiza la misma (se cierra un

interruptor), lo que puede provocar disturbios eléctricos (sobretensiones o actuación de termomagnéticas inesperadamente), en las líneas.

En todos los circuitos (eléctricos, neumáticos, hidráulicos) siempre hay dos períodos a analizar:

Período o régimen transitorio: variaciones que se producen durante un pequeño intervalo de tiempo (mseg, seg o minutos).

Período o régimen permanentes: sería el estado estacionario, luego del transitorio, de las variables en juego.



En la **imagen de la izquierda** vemos que al cerrar el interruptor, sobre la bobina se instala una **tensión transitoria** con la polaridad indicada ($\Delta V = L di/dt$), ya que la variación de corriente inicial es máxima (la bobina actúa como un amortiguador de I). Al transcurrir el tiempo, manteniendo constante *V*, la *I* se va instalando en el circuito hasta que sobre la bobina pura ya no existe tensión y sobre la *R* está toda la *V* de la fuente.

El **planteo inicial del circuito** serie (según Kirchoff) sería: $V = RI + L di/dt$

Similar a un circuito RC, se realizan cambios de variables, pasajes de términos y se resuelve la ecuación (considerando la condición inicial $I=0$ y final $I=V/R$). Resultando:

$$I = V/R (1 - e^{-Rt/L})$$

Esta es la *I* transitoria que circulará en el circuito.

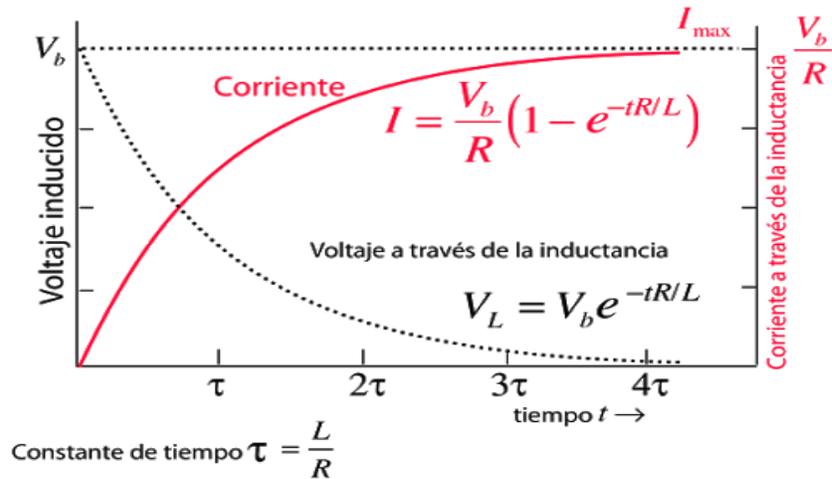
L/R se llama constante de tiempo y para un valor igual a **5 L/R se considera que la I se instaló totalmente en el circuito**, y sobre la *L* no existe más tensión.

Dimensionalmente $L/R = (\text{volt seg} / A) / \text{volt} / A = \text{seg}$.

Observar en el gráfico de abajo:

- Al inicio la di/dt (línea roja) es máxima y luego a los $5 L/R$ se anula y queda el valor de *I* de **régimen permanente ($I= V / R$)**.

- La tensión en la bobina (línea de puntos) al inicio (cierre del interruptor) es máxima (toda la V de la fuente) y luego se hace cero a los $5 L/R$



Si luego de $5 L/R$ (con la I ya instalada en el circuito), pasamos el interruptor hacia la derecha la I sobre la L tenderá a circular en sentido contrario (tenderá a anularse instantáneamente), a lo que la bobina se opondrá, y en la misma se generará una tensión con la polaridad indicada en el circuito (de la derecha) del valor indicado ($\Delta V = V e^{-Rt/L}$). La I, cuyo valor es $I = V/R e^{-Rt/L}$, luego de $5L/R$ se considera que se anula.

El desarrollo de lo pueden ver en el PDF de la Facultad Regional Rosario, (adjunto en Moodle).

Inducción mutua (o mutuainducción)

Este fenómeno ocurre cuando dos circuitos o dos bobinas están próximos entre sí de tal modo que el flujo generado en una de ellas concatena (abrazo) a la otra bobina. Cuando las bobinas están realizadas sobre un mismo núcleo y superpuestas (caso de los transformadores de tensión) la mutuainducción es máxima.

4.2 Inducción mutua

- ◆ El flujo que atraviesa la bobina 2 Φ_2 es debido a la corriente que circula por la propia bobina, Φ_{22} , y la debida a la bobina 1, Φ_{21} .

$$\Phi_2 = \Phi_{\text{a través de 2 creado por } I_2} + \Phi_{\text{a través de 2 creado por } I_1}$$
- ◆ La inductancia mutua es la relación del flujo en la bobina 2 creado por la bobina 1 y la intensidad que recorre la bobina 1.

$$M_{21} = \frac{\text{flujo total en la bobina 2 creado por la bobina 1}}{\text{intensidad por la bobina 1}} = \frac{N_2 \Phi_{21}}{I_1}$$

Puede demostrarse que la inducción mutua M_{21} es igual a la inducción mutua M_{12} lo que se denomina simplemente **coeficiente de mutuainducción M**.

La relación entre el flujo de la bobina 1 que abraza la bobina 2 respecto al flujo de la bobina 1 se llama **coeficiente de acoplamiento (K)**, o sea:

$$K = \Phi_{12} / \Phi_1 = \Phi_{21} / \Phi_2 \quad \text{y siempre} \quad K \leq 1$$

El coeficiente de mutuainducción, en función de las autoinductancias de cada bobina (L_1 y L_2) y del coeficiente de acoplamiento (K) es:

$$M = K (L_1 L_2)^{1/2}$$

La unidad de M, al igual que L es Henrio (Hy).

Considerando la mutuainductancia podemos determinar la tensión inducida en la bobina 2 con la variación de I de la bobina 1, o sea: **$Fem_2 = -M di_1/dt$** . Y recíprocamente, podemos determinar la tensión inducida en la bobina 1 con la variación de I de la bobina 2, o sea: **$Fem_1 = -M di_2/dt$** .

En los transformadores de tensión idealmente se considera la $K=1$ de tal manera que los flujos de ambas bobinas están totalmente concatenados (abrazados), lo que implica que no se pierden líneas de campo magnético y la inducción de tensión entre los bobinados es máxima.