



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE HONDURAS
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE FÍSICA



FS-415 Electricidad y Magnetismo II

Guia #4: “Ley de Faraday”

Elaborada por: Eros Daniel Rivera

1. Objetivos

- Estudiar la relación entre la variación del flujo magnético y f.e.m. inducida en una bobina.
- Determinar la relación de transformación de potencia que existe entre bobinas vinculadas por un núcleo ferromagnético.
- Analizar las diferencias de potencial entregadas por diferentes funciones periódicas AC suministradas a un transformador.

2. Introducción

En el estudio inicial del electromagnetismo, solemos empezar con la separación de este fenómeno en dos rostros, la electricidad y luego el magnetismo. Lo cual funciona mientras nos mantenemos en los límites estáticos de campos no dinámicos. Pero conforme vamos avanzando en el estudio para ir generalizando las ecuaciones para dar una explicación más completa a los fenómenos pronto nos vemos en la situación de ir unificando los conceptos que antes estudiábamos por separado.

Es en este umbral, donde uno de los más importantes científicos en la teoría electromagnética incursionó, ese científico era Michael Faraday, quien en medio de sus observaciones, intuía que establecer las ecuaciones de divergencia y rotacional del campo eléctrico y el de inducción como independientes entre sí no estaba completamente correcto, sino que era posible que existiera alguna relación entre ellos, por lo que experimentó en múltiples ocasiones buscando probarlo y logró obtener resultados que indicaban sus suposiciones para los casos de comportamientos dinámicos de los campos y formuló lo que llegaría a conocerse como “Ley de Faraday”.

Podemos imaginar la situación descrita por Faraday de manera simplista imaginando un caso en que se tiene un circuito cerrado (imaginemos una espira cuadrada) formado por un alambre conductor, y que se encuentra en una región donde existe una inducción \mathbf{B} . Debido a que existirá \mathbf{B} tendremos en el espacio lo que vendría a ser el flujo producido por dicha inducción, al cual llamaremos Φ y este flujo se encontraría atravesando la superficie encerrada por la espira, si el flujo Φ que está atravesando la espira varía con el tiempo, sea debido a que \mathbf{B} es variable temporalmente, o que la espira se encuentra en alguna situación mecánica que hace que las líneas que la atraviesen cambien con el tiempo, se tendrá el fenómeno observado por Faraday: Dado que el flujo es variable en el tiempo, esto origina que en la espira conductora, los portadores de carga se muevan, generando una corriente, esta corriente se generó debido a la variación temporal del flujo, por lo que esta corriente diremos que fue *inducida* por el cambio de flujo, y debido a la aparición de esta corriente, y la resistencia misma del material, somos capaces de medir una diferencia de potencial entre dos terminales escogidas en la espira, esta diferencia de potencial, surgió a raíz de la corriente que fue inducida en la espira, por lo que lo describiríamos como un *voltaje inducido* producto del fenómeno temporal dependiente del flujo. Y debido a motivo histórico, a este voltaje se le llamo “f.e.m inducida” lo que tras su formalización vino a abrir todo un estudio y desarrollo inmenso de generación y transformación electromagnética.

3. Marco Teórico

3.1. Ley de Faraday

Se considera aquí sustancialmente la misma situación experimental que utilizó Faraday, aunque hasta cierto punto simplificada. Supóngase que se tiene un circuito cerrado, C , formado por un alambre conductor como el que se muestra en la figura 1. Supóngase también que existe una inducción \mathbf{B} , de manera que existe un flujo ϕ a través de la superficie S encerrada por C . Si se escoge una dirección arbitraria de recorrido de C , como la que se indica con la flecha, queda definida la dirección del elemento de superficie da , por lo que se puede así obtener ϕ a partir de $\int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{a}$; ϕ será positivo para la dirección que se muestra en la figura. Se supone que no existen baterías ni otras fuentes de fem en el circuito.

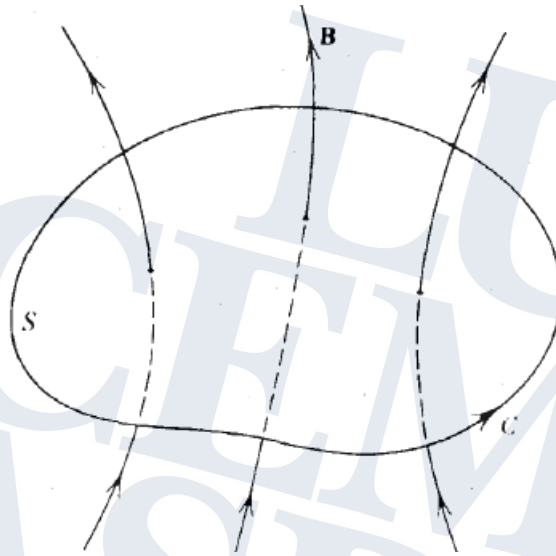


Figura 1: El flujo a través de este circuito es positivo

Si el flujo a través de C es constante, de modo que $d\phi/dt=0$, entonces puede observarse que no existe corriente en el circuito. Sin embargo, Faraday encontró que si el flujo no es constante a través de C , de modo que $d\phi/dt \neq 0$, entonces existe una corriente provocada en C . Se dice que esta corriente fue “inducida” por el cambio de flujo, por lo que el valor numérico de la corriente depende de la resistencia del circuito, por lo que es más conveniente expresar el resultado cuantitativo del experimento en función de la fem inducida. Es decir, el trabajo realizado por unidad de carga. Resulta que

$$\varepsilon_{ind} = -\frac{d\phi}{dt} \quad (1)$$

Lo que viene a ser la Ley de Faraday. Dado que ε se mide en volts, a veces también se le llama *voltaje inducido* o solamente *voltaje*; otro nombre que se le suele dar es el de *electromotancia inducida*.

El flujo ϕ puede cambiar por diversas razones: la inducción \mathbf{B} puede variar con el tiempo, el circuito puede moverse por traslación o por rotación encerrando así diferentes valores de \mathbf{B} , o bien puede haber una combinación de ambos efectos. Una experimentación muy extensa ha demostrado que (1) es válida cualquiera que sea la causa de $d\phi/dt$. Se puede observar también que no es necesario que \mathbf{B} sea diferente de cero en todas las partes de la superficie S , pudiendo anularse en algunas porciones de S ; aun en estos casos (1) sigue siendo aplicable. Más aún, la forma (1) de la ley de Faraday sigue siendo válida incluso en presencia de materia.

El signo negativo que se incluye en (1) representa la “dirección.” o “sentido” de la fem inducida en *comparación* con el sentido original arbitrariamente elegido para el recorrido por C . Este sentido queda descrito de una manera más conveniente por la *ley de Lenz*: la fem inducida (y, por lo tanto, la corriente inducida) tiene un sentido tal que tiende a oponerse al cambio que la provoca. Las palabras claves a recordar de esta ley son *oponerse* y *cambio*: en otras palabras, no es el valor absoluto de ϕ ni su signo lo que aquí importa, sino la

manera en que cambia. Para ilustrar la aplicación de la ley de Lenz, por simplicidad considérese un circuito que es fijo en forma, tamaño y posición, de manera que únicamente puede haber una variación de ϕ si cambia \mathbf{B} . La figura 2 muestra el caso, y en ella se ha elegido como dirección de recorrido de C aquella para la cual ϕ es positivo. Primero se supone que \mathbf{B} está aumentando; en este caso $d\phi/dt$ es positivo y, según (1), ε_{ind} debe ser negativa. Esto significa que ε_{ind} será opuesta a la elección original de recorrido por C y, por lo tanto, quedará en el “sentido” de las flechas dobles de (a) en la figura; esta misma será la dirección de la corriente inducida I_{ind} , tal como se ilustra. Considérese ahora la concordancia entre estos resultados y la ley de Lenz. Dado que ϕ está aumentando, la corriente inducida tenderá a oponerse a este cambio tratando de hacer disminuir el flujo por medio de la producción de líneas de \mathbf{B} opuestas al sentido positivo de la normal a la superficie, es decir, hacia “adentro” del circuito. Las curvas punteadas muestran las direcciones generales de las líneas de \mathbf{B} producidas por I_{ind} , obtenidas de acuerdo con la regla de la mano derecha, y puede observarse que en realidad representan una tendencia a disminuir el flujo a través de C .

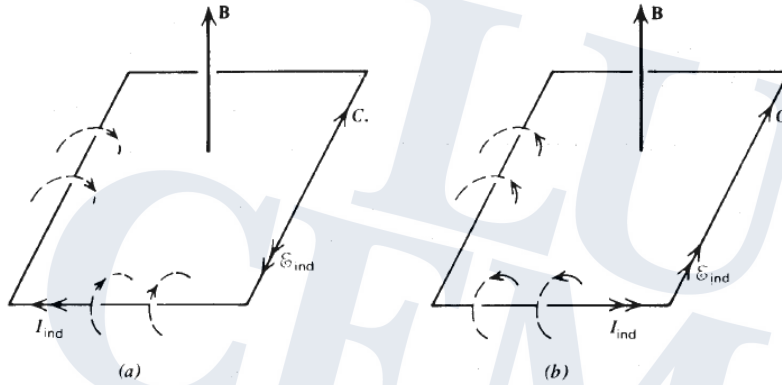


Figura 2: La dirección de la corriente inducida cuando la magnitud de \mathbf{B} esta (a) aumentando y (b) disminuyendo

Así, las dos proposiciones llevan a la misma conclusión cualitativa. En la parte (b) de la figura se ilustran los resultados obtenidos cuando se supone que \mathbf{B} esta en disminuyendo. Así ϕ sigue siendo positivo pero decreciente, de modo que $d\phi/dt$ es negativo y ε_{ind} es positiva, es decir en el mismo sentido que el de recorrido original por C . La dirección de I_{ind} en este caso es tal que produce líneas de \mathbf{B} que tienden a aumentar el flujo a través de la superficie encerrada, es decir, *se opone al cambio*, de acuerdo con la ley de Lenz.

Recordando la ecuación para la fuerza electromotriz (ε) puede observarse que la existencia de la fem inducida puede interpretarse como indicativa de la presencia de un *campo eléctrico inducido*, \mathbf{E}_{ind} , no conservativo a lo largo del alambre, de modo que también podemos expresar (1) en la forma:

$$\oint_C \mathbf{E}_{ind} \cdot d\mathbf{s} = -\frac{d\phi}{dt} \quad (2)$$

Recordando condiciones de frontera, las componentes tangenciales del campo eléctrico son continuas, y en las siguientes secciones se verá que eso sigue siendo correcto en este caso. Por lo tanto, el campo eléctrico justo afuera del alambre será el mismo que adentro, de tal forma que (2) es también aplicable a una trayectoria muy próxima al circuito y fuera de él. De hecho, (2) ya no contiene ninguna característica específica del alambre, por lo que es lógico suponer que (2) representa una ley física general que relaciona el campo eléctrico inducido con el flujo cambiante y que por lo tanto se puede aplicar a cualquier curva cerrada, sea o no que existe ahí un circuito capaz de llevar una corriente inducida. Más aún, para cualquier punto del espacio, el campo eléctrico total puede expresarse como la suma de una parte conservativa, \mathbf{E}_c y una parte no conservativa, \mathbf{E}_{ind} , es decir, $\mathbf{E} = \mathbf{E}_c + \mathbf{E}_{ind}$, con lo que se tiene:

$$\oint_C \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} = -\frac{d\phi}{dt} = -\frac{d}{dt} \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{a} \quad (3)$$

Aquí se tomara (3) como el enunciado final de la ley de Faraday expresada en función de los vectores de

campo, y es válida para cualquier trayectoria cerrada C y para cualquier motivo por el que pueda variar ϕ . Debido a las diversas posibilidades para la variación del flujo, es conveniente dividir el subsecuente estudio de (3) en dos grandes categorías, dependiendo de si el medio se encuentra en reposo o en movimiento.

3.2. Transformador

Al estudiar un circuito compuesto de varias espiras conectadas una con otra, observamos que la f.e.m inducida depende también de la cantidad de espiras (N) usadas, quedando una expresión como la siguiente:

$$\varepsilon = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (4)$$

La ley de Faraday proporciona el principio para la conversión de energía mecánica en energía eléctrica, el transformador es una aplicación de ello. Estos inducen un voltaje en un devanado denominado secundario, a partir del campo variable generado al circular una corriente en otro devanado denominado primario.

El flujo magnético Φ_1 tiene dos componentes, un flujo Φ_{11} y un flujo Φ_{12} que interactúa con la segunda bobina induciendo así un flujo Φ_2 . Al aplicar la ley de Faraday obtenemos entonces dos expresiones que nos indican como es el comportamiento de la f.e.m. en cada lado del circuito:

$$\varepsilon_1 = V_1 = -N_1 \frac{d\Phi_1}{dt} \quad (5)$$

$$\varepsilon_2 = V_2 = -N_2 \frac{d\Phi_2}{dt} \quad (6)$$

Debido a las diferentes componentes de los flujos el análisis se vuelve complicado. Es por ello que para simplificar este problema en un transformador ideal se usa un núcleo ferromagnético en el cual casi todo campo magnético este contenido. De esta manera se puede realizar la siguiente simplificación:

$$\Phi_1 = \Phi_2 = \Phi \quad (7)$$

Aproximando $\Phi_{12} \approx 0$.

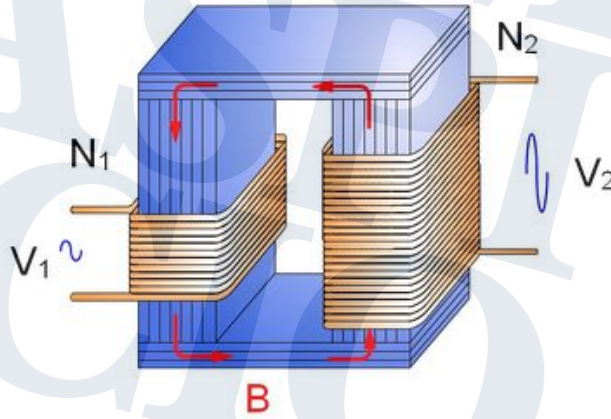


Figura 3: Representación de un transformador con núcleo ferromagnético.

Con esto podemos expresar las f.e.m. en cada devanado de la siguiente forma:

$$\varepsilon_1 = V_1 = -N_1 \frac{d\Phi}{dt} \quad (8)$$

$$\varepsilon_2 = V_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt} \quad (9)$$

permitiendo encontrar una expresión que nos indique como se relacionan cada una de las f.e.m. si dividimos la (8) y (9):

$$\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (10)$$

4. Materiales y Equipo



Figura 4: Materiales y Equipo

Cada montaje consta de:

- 5-6 Transformadores de diferente valor de embobinado N con espacio para núcleo igual al tamaño de núcleo a usar
- Núcleo ferromagnético en forma de “U”
- Pieza de cierre de núcleo ferromagnético en forma de “I”
- 2 Multímetros Digitales Peaktech 3335 o 3340
- 6 Cables Conexión Tipo Banana (SE-9751)
- 1 Generador de Funciones Digital USB Phywe (13654-99)

5. Procedimiento Experimental

5.1. Parte 1: Bobinas Fijas

1. Según la intención de transformación a realizar, sea elevadora o reductora de voltaje, escoger 2 bobinas cuya relación entre ellas de el comportamiento esperado
2. Introducir las bobinas seleccionadas en el núcleo ferromagnético en forma de “U”
3. Cerrar el núcleo utilizando la pieza ferromagnética en forma de “I”
4. Conectar el Generador de Funciones Digitales al toma-corriente y encenderlo.
5. Asegurarse que la salida de las funciones del generador este en la opción “OUT” y no en la salida a audífonos.
6. Con los botones localizados debajo de las opciones “Freq.” “Ampl.” y “Signal” podemos modificar a conveniencia los parámetros de **Frecuencia, Amplitud y Tipo de Señal.**

7. Con los botones del paso anterior y utilizando la perilla de la derecha, además de los botones para desplazarnos a diferentes sensibilidades de saltos escogeremos una función con parámetros convenientes para la práctica (De preferencia que sea Sinusoidal, Triangular o Escalón y 60 Hz o menos de frecuencia).
8. Con el botón de “Ampl” en nuestra señal ya escogida, daremos un valor de voltaje inicial para las mediciones. Tomando en cuenta que se realizaran 10 mediciones y el V_{pp} del generador solamente existe en el rango de 0-20 V.
9. Anotamos en la tabla 1 los valores leídos por los multímetros para la entrada y salida de Voltaje en el transformador
10. Aumentamos 1 V el V_{pp} en nuestro generador de funciones y repetimos desde el paso 9, hasta llenar la tabla 1
11. Cambiamos el tipo de función y repetimos los pasos del 1 al 10 pero esta vez llenando la tabla 2

5.2. Parte 2: Voltaje Fijo

1. Replicamos los pasos 1-7 de la parte 1.
2. Para esta parte, el voltaje que escogeremos para V_{pp} quedara fijo para toda nuestra colección de datos, por lo que se debe usar un valor medio de entre la región de voltajes tomada en la parte 1.
3. Una vez configurado el valor de voltaje, el primer dato se tomara con la configuración de transformación que ya se tenía y se registrara el numero de vueltas del devanado primario y el respectivo voltaje de salida en la tabla 3
4. Ahora, se reducirá el V_{pp} a 0 V para cambiar la bobina primaria por una con un numero de vueltas diferente y tras finalizar las conexiones, se le dara el mismo V_{pp} que se tenía para el caso anterior, y se registraran estos valores de vueltas y voltaje de salida en la tabla 3.
5. Se repetirá el paso anterior hasta llenar la tabla o que no queden mas opciones de N_1 disponibles para medir.
6. Cambiamos el tipo de función y repetimos los pasos 1 a 5 pero esta vez llenando la tabla 4

6. Tablas de Datos

N	ε_1 (V)	ε_2 (V)
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		

Tabla 1: V_{pp} variable

N	ε_1 (V)	ε_2 (V)
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		

Tabla 2: V_{pp} variable

N_1 : _____

N_2 : _____

N_1 : _____

N_2 : _____

Señal: _____

Señal: _____

N	N_1 (Vueltas)	ε_2
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		

Tabla 3: N_1 variable

N	N_1 (Vueltas)	ε_2
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		

Tabla 4: N_1 variable ε_1 : _____ N_2 : _____

Señal: _____

 ε_1 : _____ N_2 : _____

Señal: _____

7. Procesamiento de Datos Experimentales

Los procedimientos para las dos partes detalladas a continuación se realizarán para cada señal utilizada

7.1. Parte 1

1. Introducir los datos a Mathematica y realizar un gráfico de ellos.
2. Siguiendo la relación $\varepsilon_1 = \frac{N_1}{N_2} \varepsilon_2$ realizar el ajuste correspondiente a los datos y el gráfico del ajuste
3. Presentar en un mismo plano el gráfico del ajuste y el gráfico de datos.
4. Determinar el valor de “n” que representa el cociente de la relación de transformación y presentar su resultado.
5. Calcular el porcentaje de error de exactitud de su resultado.

7.2. Parte 2

1. Introducir los datos a Mathematica y realizar un gráfico de ellos.
2. Siguiendo la relación $\varepsilon_2 = \varepsilon_1 N_2 \frac{1}{N_1}$ hacer un apropiado **ajuste lineal** dándole a los datos de su variable independiente la modificación requerida para asegurar un comportamiento lineal.
3. (Opcional) Graficar el nuevo conjunto de puntos para observar que ahora su comportamiento es como se espera.
4. Graficar el ajuste de los datos y determinar su pendiente con su respectiva incertidumbre.
5. Reportar el resultado para el valor del número de vueltas del devanado secundario del transformador.
6. Calcular el porcentaje de error de exactitud de su resultado.

8. Cuestionario

1. Explique los dos efectos que pueden producir una f.e.m. ¿Cree usted que podemos decir que la f.e.m. puede ser explicada como una ecuación con dos términos, cada uno de ellos representando cada efecto que la produce?
2. ¿Por qué se utilizaron señales A.C para la práctica? ¿Es posible observar el fenómeno que condujo a la formulación de la Ley de Faraday utilizando una fuente de voltaje D.C y alguna modificación extra en el experimento? Explique
3. ¿Por qué la red de distribución nacional opera bajo una señal sinusoidal en lugar de una triangular o una heaviside? Explique detalladamente.
4. ¿Porque el voltaje medido por el multímetro para la entrada al transformador es diferente del voltaje debido a la amplitud de la señal que se lee en el generador de funciones? ¿Cuales son los factores que modificarían el voltaje de la señal visto en el generador con su diferencia en el multímetro para los tres tipos de señal estudiadas en la práctica?
5. ¿Qué fenómeno sucede con el núcleo formado por dos piezas separadas una vez se envía la señal al transformador? ¿Qué sucedería si la pieza de cierre de núcleo en forma de "I" fuese el doble de larga que la utilizada en el experimento? Explique

Referencias

Wangsness, R. K. (2001). *Campos Electromagnéticos*. LIMUSA.