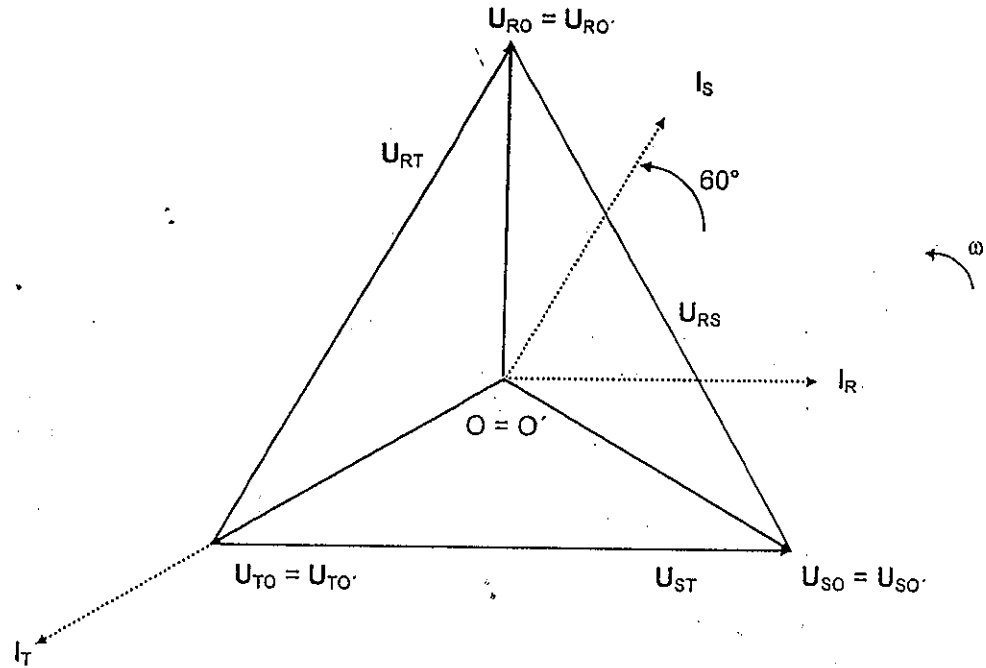


$$P_{\text{TRIF.}} = P_R + P_S + P_T = 0 + 0 + 2200 = 2200 \text{ W}$$

$$Q_{\text{TRIF.}} = Q_R + Q_S + Q_T = 1273,8 - 1273,8 + 0 = 0$$

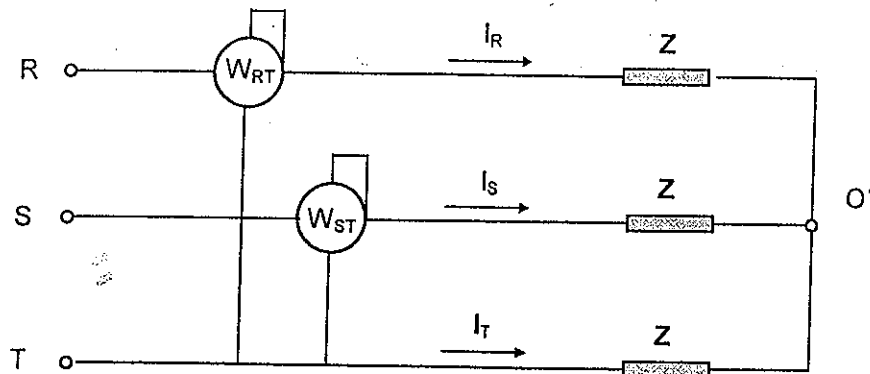
$$S_{\text{TRIF.}} = 2200 \text{ VA}$$

d)



Ejercicio N° 2 : En el siguiente circuito la indicación de los vatímetros es $W_{RT} = W_{ST} = 330$. Si la carga es equilibrada y la tensión de alimentación es de $3 \times 380 \text{ V} - 50 \text{ Hz}$, hallar:

- El valor de las impedancias.
- Las corrientes de línea.



$$a) \quad P_{\text{TRIF.}} = W_{\text{RT}} + W_{\text{ST}} = 330 + 330 = 660 \text{ W}$$

$$Q_{\text{TRIF}} = \sqrt{3} (W_{\text{RT}} - W_{\text{ST}}) = 0 \quad \Rightarrow \quad \text{Carga óhmica pura}$$

$$P_{\text{R}} = P_{\text{S}} = P_{\text{T}} = P = \frac{P_{\text{TRIF}}}{3} = 220 \text{ W}$$

$$R = \frac{U^2}{P} = \frac{220^2}{220} = 220 \Omega$$

$$b) \quad I_{\text{L}} = I_{\text{F}} = \frac{U_{\text{F}}}{R} = \frac{220}{220} = 1 \text{ A}$$

CIRCUITOS MAGNÉTICOS

5.1 Generalidades

Una corriente circulando por un conductor de gran longitud, genera alrededor del mismo un campo magnético, cuyas líneas de fuerza describen círculos concéntricos según se observa en la figura 5.1.

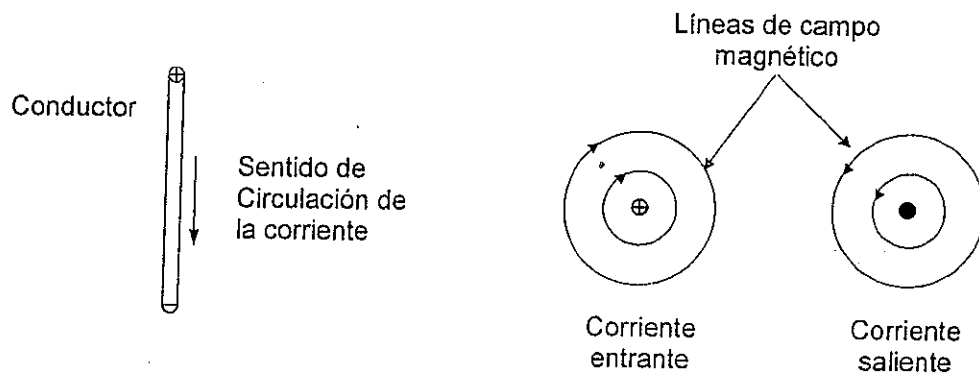


Figura 5.1 Generación de un campo magnético, debido a la corriente circulando en un conductor

En la figura puede observarse, que si la corriente es entrante las líneas de campo magnético tienen un sentido horario, en cambio si la corriente es saliente el sentido es antihorario.

El valor de la intensidad de campo magnético, en un punto que se encuentre a una distancia "r" del conductor está dado por la ley de Biot y Savart, de acuerdo a la siguiente expresión:

$$H = \frac{I}{2 \cdot \pi \cdot r}$$

Donde

I : Intensidad de corriente [A]

H: Intensidad de campo magnético [A/m]

r : Distancia hasta el punto en cuestión [m]

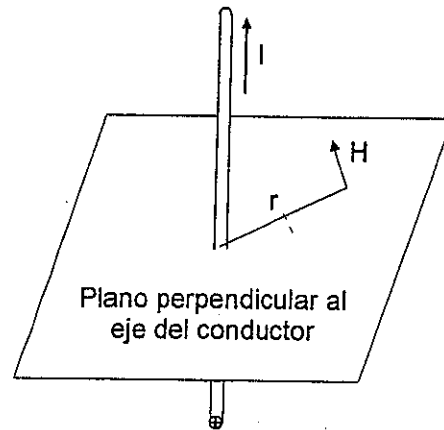


Figura 5.2 Intensidad de campo magnético originado por la corriente en un conductor

Ley de Ampere

La misma establece, que la integral de la intensidad de campo magnético "H", alrededor de una trayectoria cerrada, es igual a la corriente encerrada por esa trayectoria.

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{L} = \int \mathbf{J} \cdot d\mathbf{S}$$

- Siendo :
- \mathbf{H} el vector de intensidad de campo magnético [A/m]
 - $d\mathbf{L}$ el vector elemento de distancia [m]
 - \mathbf{J} la densidad de corriente [A/m²]
 - $d\mathbf{S}$ diferencial del área que abarca la trayectoria [m²]

En la figura 5.3 se muestra un conductor de gran longitud, siendo la trayectoria un círculo de radio "r".

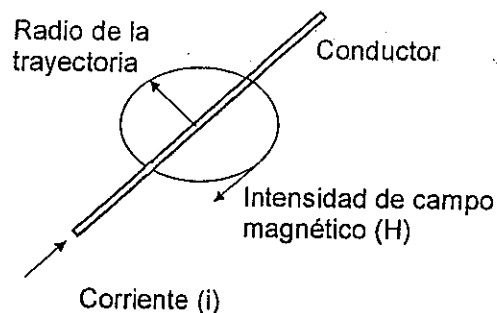


Figura 5.3 Esquema de la trayectoria de la intensidad de campo magnético debido a la corriente por un conductor

Como la trayectoria es un círculo de radio "r", la longitud de la misma es: $2 \cdot \pi \cdot r$ con lo que nos queda:

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{L} = H \cdot 2 \cdot \pi \cdot r$$

$$\oint \mathbf{J} \cdot d\mathbf{S} = i$$

$$H \cdot 2 \cdot \pi \cdot r = i \quad \Rightarrow \quad H = \frac{i}{2 \cdot \pi \cdot r}$$

En el caso de que la trayectoria abarque más de un conductor, como es el caso de una bobina, según se muestra en la figura 5.4

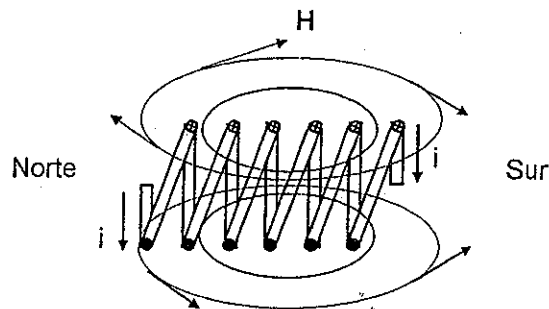


Figura 5.4 Campo magnético originado por una bobina

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{L} = N \cdot i$$

El producto $N \cdot i$ se llama Fuerza magnetomotriz (Fmm). El sentido de las líneas de campo magnético están definidas por el sentido de la corriente, y definiremos como polo "norte", la región por la que salen las líneas de campo magnético y polo "sur", aquel por el que entran.

Si la intensidad del campo magnético es constante a lo largo del circuito magnético, y además tiene la dirección del diferencial de la trayectoria se cumple:

$$H \cdot L = N \cdot i$$

Flujo magnético

Definimos como flujo magnético, la cantidad de líneas de campo magnético que atraviesan una superficie.

$$\Phi = \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S}$$

Siendo: Φ : Flujo magnético en Weber [Wb]

B : Densidad de flujo magnético (Inducción magnética), en Tesla [T]

dS : Diferencial de superficie [m^2]

El flujo magnético que entra en una superficie cerrada, es igual a la que sale o sea:

$$\oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 0$$

La relación entre la intensidad de campo magnético "H" y la densidad de flujo magnético "B", es una propiedad del material en el que existe el campo y la relación está dada por:

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$$

Siendo μ la permeabilidad del material [T.m/A]

μ se puede expresar en relación con la permeabilidad del vacío o del aire:

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$$

μ_r : permeabilidad relativa del material

μ_0 : permeabilidad del vacío cuyo valor es $4 \pi 10^{-7}$

Ley de Faraday

Cuando una o varias espiras son atravesadas por un flujo magnético variable en el tiempo (ϕ), entre sus extremos se induce una fuerza electromotriz, cuyo valor está dado por la siguiente expresión:

$$e = N \frac{d\phi}{dt}$$

Este efecto se logra teniendo un flujo magnético variable en el tiempo y una espira en reposo, o bien un flujo magnético constante y una espira en movimiento de acuerdo a los siguientes esquemas

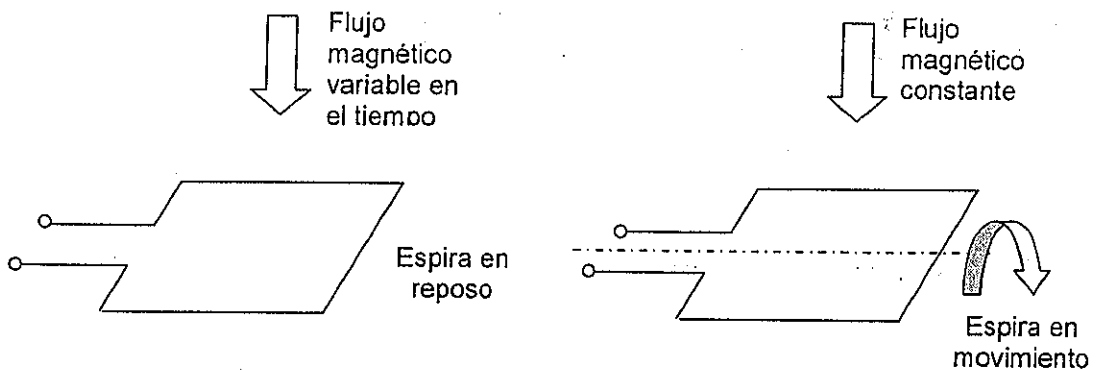


Figura 5.5 Generación de fuerzas electromotrices por inducción

En ambos casos el flujo magnético concatenado por la espira es variable en el tiempo.

El signo o polaridad de la fuerza electromotriz inducida, debe ser tal que haga circular una corriente, que origine un flujo magnético de sentido contrario al que le dio origen. Esto se muestra en la figura 5.6.

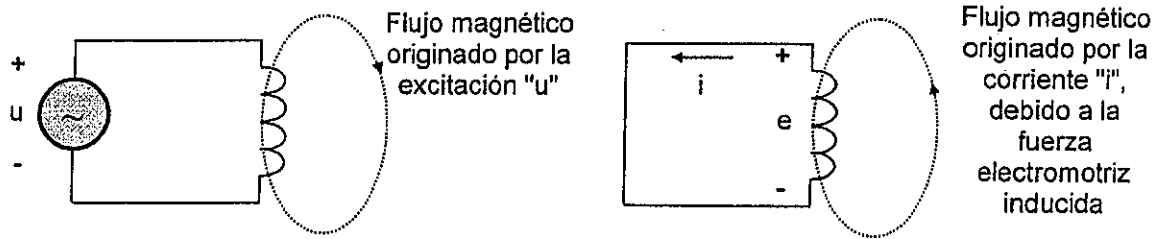


Figura 5.6 Sentido de la fuerza electromotriz inducida

También se puede aplicar a un conductor en movimiento dentro de un campo magnético uniforme, de acuerdo a la figura 8.7.

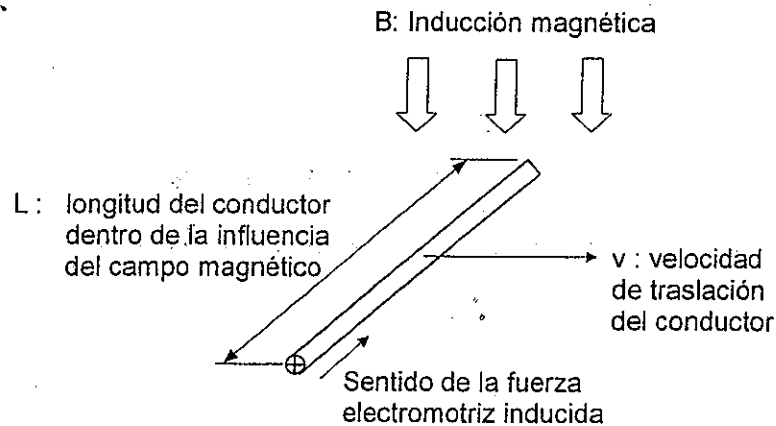


Figura 5.7 Fuerza electromotriz inducida en un conductor

El valor de la fuerza electromotriz inducida es:

$$e = B \cdot L \cdot v$$

5.2 Materiales magnéticos

En los dispositivos de conversión de energía, es muy importante el uso de materiales magnéticos, ya que mediante su empleo, se pueden obtener valores elevados de densidad de flujo magnético (B) con valores de fuerza magnetizante (N.I) relativamente pequeños.

Mediante el uso de estos materiales se pueden dirigir los campos magnéticos en las trayectorias deseadas.

Los núcleos, magnéticos que se utilizan en la práctica, son de hierro y sus aleaciones, siendo la relación entre la inducción "B" y la intensidad de campo magnético "H" no lineal. La correspondencia entre ambos está dada por lo que se llama curva de imanación, la cual observamos en la figura 5.8.

En la misma se observa que hay una primera zona que a iguales incrementos de la intensidad de campo magnético se producen iguales incrementos de inducción magnética (Zona A), luego aparece una zona en la cual los incrementos de inducción magnética son menores (zona "B") y por último una zona en la cual grandes incrementos de intensidad de campo magnético producen pequeños incrementos de inducción magnética (zona "C").

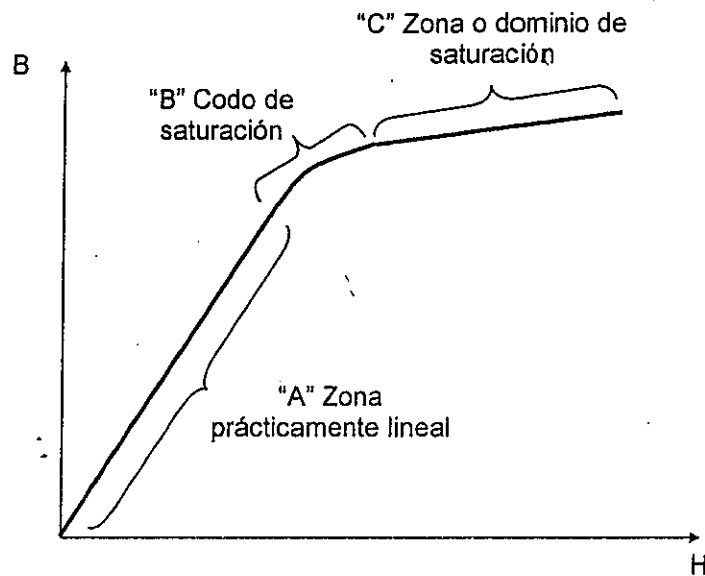
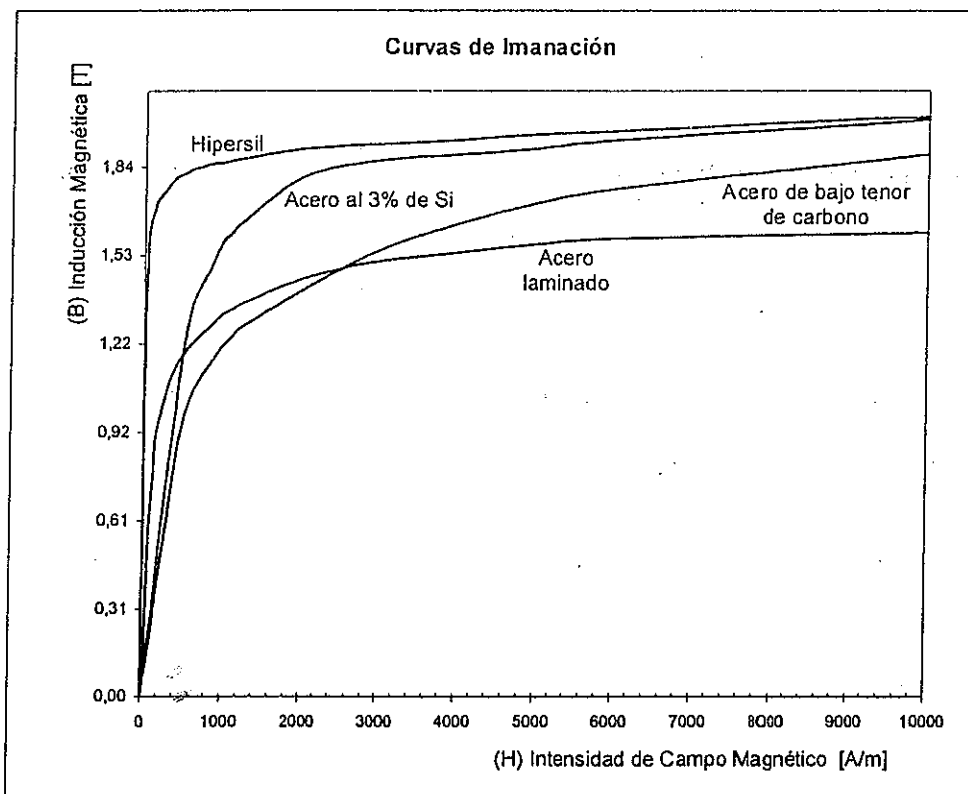


Figura 5.8 Curva típica de imanación de un material ferromagnético

Los valores utilizados en la construcción de máquinas, están en la zona del codo de saturación, ya que mayores valores de inducción magnética, implicaría un incremento de la corriente que no justifica económicamente su uso.

En la figura 5.9, se encuentran las curvas de imanación para los materiales más empleados en la construcción de aparatos eléctricos.



5.9 Curvas de imanaci3n de los materiales ferromagn3ticos m3s usados

5.3 Ley de Hopkinson

Si tomamos un circuito magnético como el de la figura 5.10, y suponemos que el flujo magnético originado por la bobina, se canaliza totalmente por el núcleo, se cumple lo siguiente:

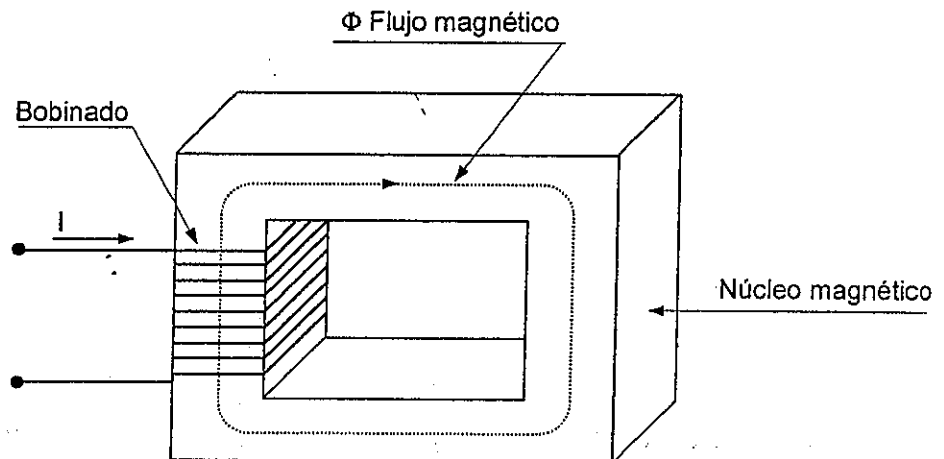


Figura 5.10 Esquema de un circuito magnético

$$\Phi = B \cdot S = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H \cdot S = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \frac{N \cdot I}{L_m} \cdot S = \frac{N \cdot I}{\frac{L_m}{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot S}}$$

- Donde :
- Φ : Flujo magnético [Wb]
 - B : Inducción magnética [T]
 - μ_0 : Permeabilidad absoluta ó del vacío, cuyo valor es $4\pi \cdot 10^{-7}$ [H/m]
 - μ_r : Permeabilidad relativa que depende del material y que para el vacío vale "1"
 - N : Número de espiras
 - I : Corriente [A]
 - L_m : Longitud media del circuito magnético [m]
 - S : Sección transversal del núcleo
 - H : Intensidad de campo magnético [A/m]

Llamaremos al producto de: $N \cdot I \Rightarrow$ Fuerza magnetomotriz (F_{mm})

$$\frac{L_m}{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot S} \quad \text{Reluctancia } (\mathfrak{R})$$

$$\Phi = \frac{F_{mm}}{\mathfrak{R}}$$

Esto es válido si la reluctancia del circuito magnético se mantiene constante.

Podemos observar que hay una cierta analogía entre los circuitos magnéticos y los circuitos eléctricos, las cuales se encuentran resumidas en el siguiente cuadro:

CIRCUITO ELÉCTRICO	CIRCUITO MAGNÉTICO
E: Fuerza electromotriz [V]	F _{mm} : Fuerza magnetomotriz [A]
I: Intensidad de corriente [A]	Φ: Flujo magnético [Wb]
R: Resistencia óhmica [Ω]	ℜ: Reluctancia [1/H]
$\sum I = 0$	$\sum \Phi = 0$

5.4 Ciclo de histéresis

Si partimos de un núcleo ferromagnético virgen, y alimentamos la bobina con una fuente de corriente continua, tal como se muestra en la figura 5.11, al ir aumentando la intensidad del campo magnético "H" (aumentando la intensidad de corriente I), los valores de la inducción magnética aumentan en una relación prácticamente lineal (tramo A-B), luego, para iguales incrementos de la intensidad de campo magnético, se obtienen menores incrementos de inducción magnética (tramo B-C), formando en esta zona lo que se llama codo de saturación. Continuando el incremento de la corriente vemos que para grandes incrementos de la intensidad de campo magnético se obtienen pequeños incrementos de la inducción magnética (zona C-D), llamándole a esta zona saturada, lo que se puede observar en la figura 5.12.

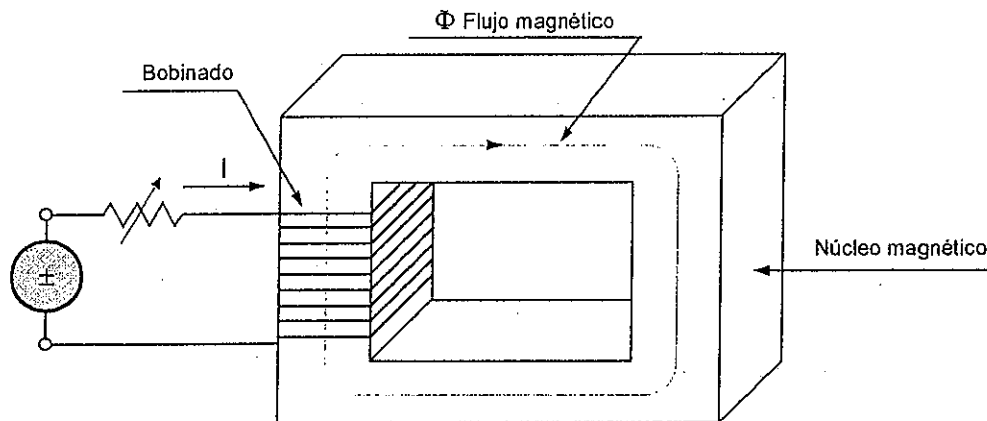
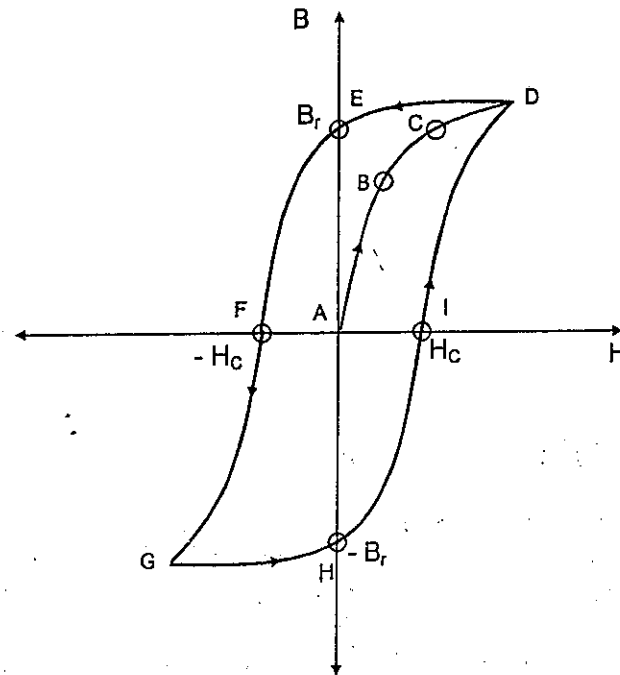


Figura 5.11 Ensayo de un material ferromagnético

Si a partir del punto "D", se comienza a disminuir la corriente que circula por la bobina, disminuye la intensidad de campo magnético, con lo cual observamos que la correspondencia entre los valores de "B" y "H" se hace a través de la curva D - E - F, y cuando se anula dicha corriente, vemos que la inducción magnética no es nula y el material queda con un magnetismo remanente B_r (punto E).

Si desde este valor, invertimos el sentido de la corriente, con lo cual se invierte el sentido de la intensidad de campo magnético, se llega a que el magnetismo remanente se anule y este valor se lo llama campo coercitivo H_c (punto F). A partir de este punto el sentido de magnetización se invierte y se llega al punto "G", en el cual si volvemos a disminuir la corriente, la relación entre "B" y "H" se hace a través de la curva G-H, invirtiendo nuevamente el sentido de la corriente, con lo cual se efectúa el recorrido H-I-D, completando un ciclo, el cual recibe el nombre de ciclo de histéresis.



5.12 Ciclo de histéresis

5.5 Circuito magnético excitado con tensión continua

Núcleo sin entrehierro

Si tenemos una bobina con un núcleo magnético y alimentamos la misma con una fuente de corriente continua, una vez que se establezca el régimen permanente, el valor de la corriente se mantendrá constante y su valor dependerá exclusivamente de la **resistencia óhmica** de dicha bobina y del valor de la **tensión aplicada**.

El valor de la intensidad de campo magnético estará dado por la expresión:

$$H_{Fe} = \frac{N \cdot I_{CC}}{L_m}$$

Mediante la curva de imanación del material del núcleo, podemos obtener la inducción magnética, y por lo tanto el flujo magnético correspondiente. La relación entre el flujo magnético y la fuerza magnetomotriz aplicada está dada por:

$$\Phi = \frac{N \cdot I_{CC}}{\mathfrak{R}_{Fe}}$$

Núcleo con entrehierro

Al tener un entrehierro en el núcleo, la reluctancia del circuito magnético, se hace mucho más grande que en el caso anterior. Dado que la corriente no varía, tampoco lo hará la fuerza magnetomotriz ($F_{mm} = N \cdot I_{CC}$), motivo por el cual el flujo magnético se verá reducido, ya que su valor depende de la reluctancia total que está dada por:

$$\mathfrak{R}_a + \mathfrak{R}_{Fe} \text{ siendo: } \mathfrak{R}_a \gg \mathfrak{R}_{Fe}$$

5.6 Circuito magnético excitado con tensión alterna senoidal

Núcleo sin entrehierro

Si la bobina del circuito magnético anterior lo excitamos con una fuente de tensión alterna senoidal, sucede lo siguiente:

- a) Al aplicar una tensión senoidal la fuerza electromotriz de autoinducción en la bobina también es senoidal y del mismo valor que la tensión aplicada (no se tiene en cuenta el flujo disperso ni la resistencia óhmica del conductor de la bobina).

$$U = E$$

- b) Esta fuerza electromotriz está relacionada con el flujo magnético, a través de la ley de Faraday:

$$e = N \frac{d\phi}{dt}$$

- c) Al ser la fuerza electromotriz senoidal, también lo es el flujo magnético.
- d) La relación entre el valor eficaz de la tensión aplicada y el flujo magnético está dada por la expresión ya vista y que es la siguiente:

$$U = E = 4,44 \cdot N \cdot f \cdot \Phi \quad (1)$$

Φ : Es el flujo magnético máximo

- e) La corriente que circula por la bobina está relacionada con el flujo magnético a través del ciclo de histéresis, con lo que la misma no es senoidal, siendo la forma de la misma la que se observa en la figura 5.13:

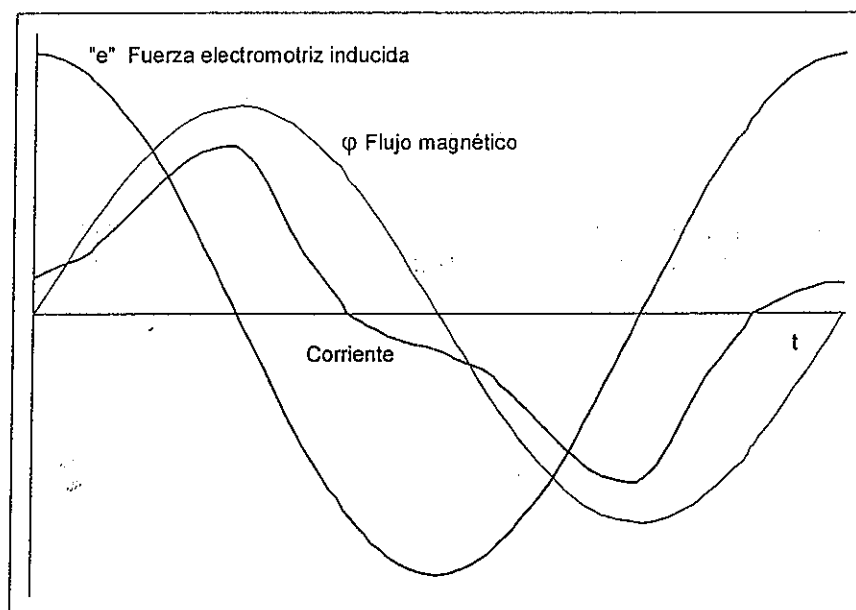


Figura 5.13 Valores instantáneos del flujo magnético, fuerza electromotriz inducida y la corriente por la bobina

Núcleo con entrehierro

Al tener un entrehierro, la reluctancia total del circuito magnético se ve aumentada, pero como el **flujo magnético no varia** ya que depende de la tensión aplicada (1), la corriente por la bobina se verá incrementada para poder mantener dicho valor de flujo magnético.

5.7 Pérdidas magnéticas

Quando un material magnético está sometido a un flujo magnético variable en el tiempo, se produce calentamiento del mismo, el cual se debe a la histéresis magnética del material y a unas corrientes inducidas en el mismo.

Pérdidas por histéresis

Si en el circuito magnético de la figura 5.14, alimentamos la bobina con una fuente de tensión variable en el tiempo (Por ejemplo sinusoidal), la corriente que circula por dicha bobina será variable en el tiempo lo cual hace que el ciclo de histéresis analizado para corriente continua (cuyo valor se fue cambiando mediante la resistencia variable y la polaridad de la fuente), se repita tantas veces por unidad de tiempo de acuerdo a la frecuencia de la fuente de alimentación.

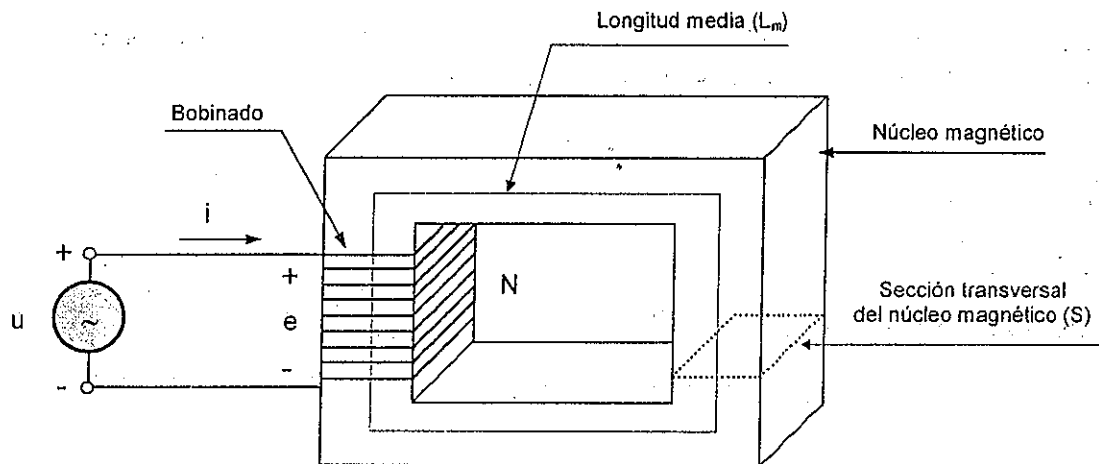


Figura 5.14 Circuito magnético alimentado por tensión alterna senoidal

Admitiendo que la resistencia óhmica de la bobina es nula y que todo el flujo magnético que la misma origina se establece en el núcleo, la energía que la fuente suministra es la siguiente:

$$dA = e \cdot i \cdot dt = u \cdot i \cdot dt \quad (2)$$

La fuerza electromotriz inducida en la bobina está dada por la ley de Faraday y su valor es:

$$e = N \frac{d\varphi}{dt} = u \quad \varphi = S \cdot dB \quad \text{con lo que nos queda :}$$

$$e = N \cdot S \frac{dB}{dt} \quad \text{Reemplazando en (2)}$$

$$dA = e \cdot i \cdot dt = N \cdot S \cdot i \cdot dB = S \cdot L_m \cdot H \cdot dB$$

Lo que nos indica que la energía suministrada por la fuente, está dada por el producto del volumen del circuito magnético ($S \cdot L_m$), por el área formada entre la curva de magnetización y el eje de ordenadas, siendo la misma absorbida por el núcleo, si la intensidad de campo magnético esta aumentando, y devuelta a la fuente, si está disminuyendo, según se observa en la figura 5.15.

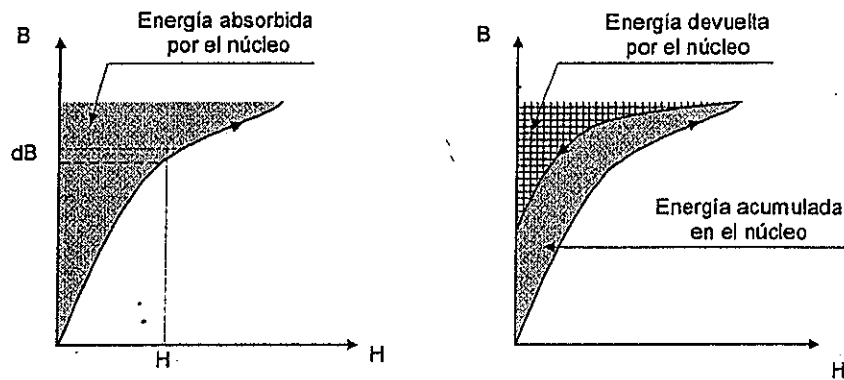


Figura 5.15 Sentido de la energía de acuerdo a la variación del campo magnético

Se observa que el área encerrada por el ciclo de histéresis es proporcional a la energía acumulada en el núcleo por unidad de volumen y por ciclo.

Si el material se ve obligado a recorrer "f" ciclos de histéresis por segundo, la energía por unidad de tiempo, es la potencia que se disipa en calor, dado que esta potencia no se utiliza se la considera como una pérdida.

Las pérdidas mencionadas son proporcionales a la frecuencia de la corriente excitadora, al volumen de material magnético, al área del ciclo de histéresis teniendo en cuenta el valor máximo que se alcanza de la inducción magnética.

Las pérdidas magnéticas por histéresis se estiman utilizando la fórmula empírica de STEINMETZ, cuyo valor es el siguiente:

$$P_H = K_H \cdot f \cdot B_{\max}^n \text{ [W/Kg]}$$

El valor de la constante K_H depende del tipo de chapa magnética, y el valor de "n" está comprendido entre 1,7 y 2,3 pudiendo adoptarse un valor igual a 2. De esta forma a los efectos prácticos podemos utilizar la siguiente expresión:

$$P_H = K_H \cdot f \cdot B_{\max}^2 \text{ [W/Kg]}$$

Para poder disminuir las pérdidas, se debe buscar chapas magnéticas cuyo ciclo de histéresis, sea lo más delgado posible, lo que se logra con cierto tipo de aleaciones con silicio y orientando el grano del material mediante un proceso adecuado.

Pérdidas por corrientes parásitas o de Foucault

Estas pérdidas se deben a las corrientes inducidas sobre el material ferromagnético, como consecuencia de estar sometido el mismo a un campo magnético variable en el tiempo.

Para evaluar estas pérdidas, debemos tomar un pequeño volumen de material como el de la figura 5.16, el cual es atravesado por una inducción magnética variable en el tiempo, en dirección perpendicular al plano del dibujo.

En la espira elemental analizada se induce una fuerza electromotriz, cuyo valor está dado por la ley de Faraday, la cual hace circular una corriente, cuyo valor depende de la resistividad que presente el material ferromagnético, de la longitud y la sección que se adopte en dicha espira.

Esa corriente origina una potencia que se transforma en calor, la cual es proporcional al valor de la resistencia óhmica de la espira y de la corriente que circula al cuadrado.

La potencia total de pérdidas surge de sumar el efecto analizado en todas las trayectorias.

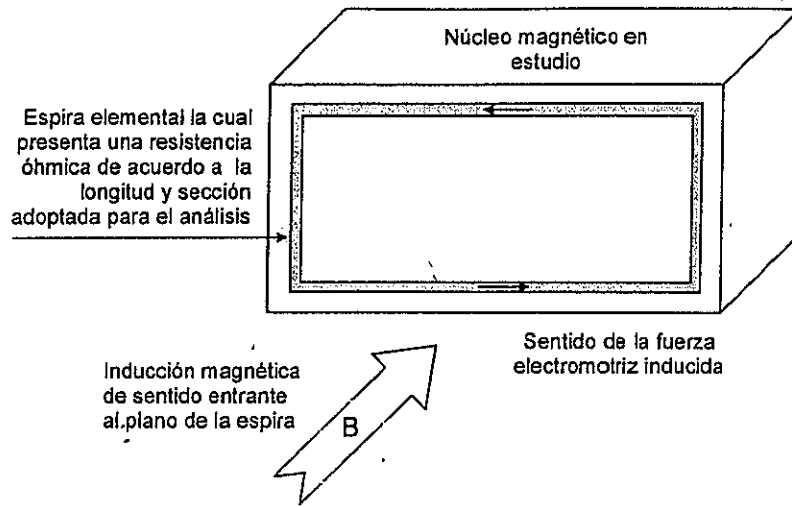


Figura 5.16 Esquema de las corrientes parásitas originadas por un campo magnético variable

Si el material es macizo la resistencia que presenta esta espira elemental es uniforme en todo su recorrido, lo cual hace que el valor de las pérdidas por unidad de volumen de material no difiera, cualquiera sea el material ferromagnético utilizado, ya que su resistividad es prácticamente la misma. El valor de las pérdidas se determina de acuerdo a la siguiente expresión:

$$P_F \left[\frac{W}{Kg} \right] = \frac{B_{\text{máx}}^2 \cdot \omega^2 \cdot e^2}{24 \cdot \rho_{Fe} \cdot \gamma_{Fe}}$$

- Donde:
- $B_{\text{máx}}$: Inducción máxima [T]
 - ω : Pulsación [r/s]
 - e : Espesor del núcleo
 - ρ_{Fe} : Resistividad del hierro [$\Omega \cdot m$]
 - γ_{Fe} : Densidad del hierro [Kg/m^3]

A tales efectos para poder reducir el valor de las pérdidas, lo que se hace es reemplazar el núcleo macizo por un conjunto de chapas entre las cuales se coloca material aislante como ser barnices u óxidos de hierro, lo cual hace que las espiras se circunscriban en las chapas, y como las pérdidas son proporcionales con el cuadrado del espesor de estas chapas, se logra la disminución de las mismas. El sentido de las chapas debe ser tal, que su dirección sea la del campo magnético. En la figura 5.17, se muestra un esquema con ambos casos.

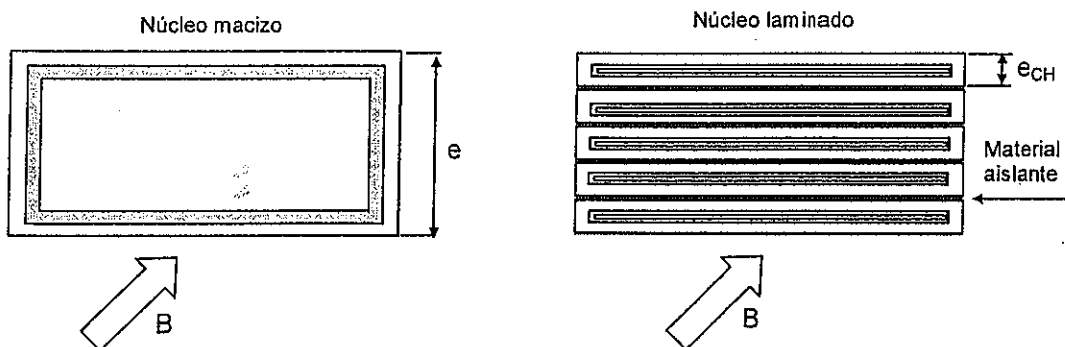


Figura 5.17 Esquema de una espira elemental para núcleo macizo y laminado

El valor de las pérdidas por corrientes parásitas o de Foucault, está dado por la siguiente expresión:

$$p_F = K_F \cdot f^2 \cdot B_{\max}^2 \text{ [W/Kg]}$$

De esta expresión se deduce que las pérdidas específicas por Foucault, son proporcionales al valor de la frecuencia de excitación y a la inducción magnética máxima, ambos al cuadrado. La constante K_F tiene en cuenta el espesor de la chapa y la resistividad del material.

Perdidas en el hierro

La suma de las pérdidas analizadas, se denomina pérdidas en el hierro, o sea

$$p_{Fe} = p_H + p_F$$

En la práctica, los fabricantes de chapa magnética efectúan ensayo de un lote de fabricación a una frecuencia de 50 Hz y con una inducción de 1 Tesla y determinan las pérdidas en el hierro específicas o también llamada cifra de pérdidas (p_0). Con este valor se pueden obtener las pérdidas en el hierro para otra frecuencia o inducción magnética, utilizando la siguiente expresión:

$$p_{Fe} = p_0 \cdot \frac{f}{50} \cdot \frac{B_{\max}^2}{1^2} \text{ [W/Kg]}$$

5.8 Resolución de circuitos magnéticos

Un circuito magnético, es un conjunto de dispositivos destinados a crear un campo magnético en una determinada parte del espacio. Generalmente está compuesto por una bobina, por la cual se hace circular una corriente la cual origina el campo magnético mencionado, un núcleo de material ferromagnético y un entrehierro.

En la figura 5.18 se ha graficado el esquema de un circuito magnético elemental con las distintas partes que lo componen.

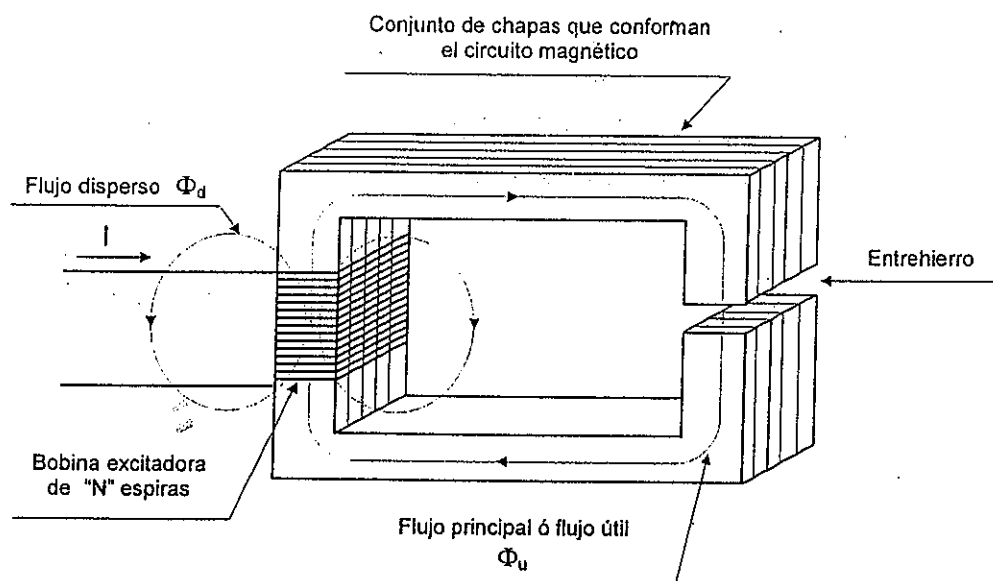


Figura 5.18 Esquema de un circuito magnético elemental

En el proceso de resolución de los circuitos magnéticos se debe tener en cuenta lo siguiente:

- El flujo magnético generado por la bobina se establece, parte en el núcleo y una pequeña parte en el aire, siendo este último lo que llamaremos flujo magnético disperso (3 al 5% del flujo magnético total)

$$\Phi_T = \Phi_u + \Phi_d$$

Siendo : $\Phi_d(\%) = \frac{\Phi_d}{\Phi_T} 100$ coeficiente de dispersión

- En los circuitos magnéticos excitados con corrientes alternas los núcleos están conformados por chapas, por lo que la sección efectiva del hierro es menor que la sección geométrica, debido a que entre las chapas se encuentra material no magnético (óxidos, barnices, etc), de acuerdo a lo mostrado en la figura 5.19.

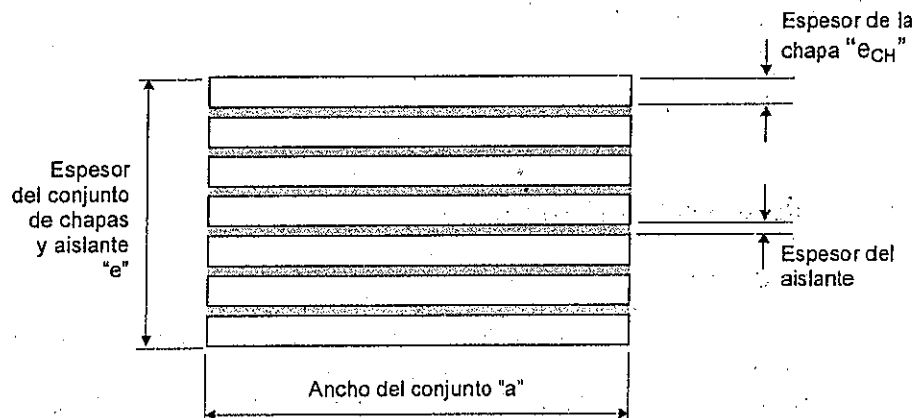


Figura 5.19 Detalle de conformación de chapas y aislante

De acuerdo al esquema la sección geométrica del núcleo está dada por:

$$S_G = a \cdot e$$

La sección real de hierro es:

$$S_{Fe} = \text{Espesor de cada chapa} \times \text{número de chapas} \times \text{ancho} = (e_{CH} \cdot n) \cdot a$$

La relación entre la sección de hierro y la sección geométrica se denomina **factor de apilado** (f_{ap}), el cual se establece en forma porcentual.

$$f_{ap}(\%) = \frac{S_{Fe}}{S_G} 100$$

Por lo tanto en el cálculo de circuitos magnéticos en los cuales intervenga la sección, la misma deberá estar afectada por el factor de apilado, o sea:

$$S_{Fe} = S_G \cdot \frac{f_{ap}(\%)}{100}$$

- En los bordes de la zona del entrehierro, las líneas de campo magnético se curvan y esto hace aparecer al mismo como si su sección fuera mayor, tal como se muestra en la figura 5.20.

A los fines prácticos, en la resolución de circuitos magnéticos, se toma la sección del entrehierro, aumentando los lados de la sección en el ancho del entrehierro, o sea:

$$S_a = (a + L_a) \cdot (e + L_a) \text{ siendo la sección geométrica: } S_G = a \cdot e$$

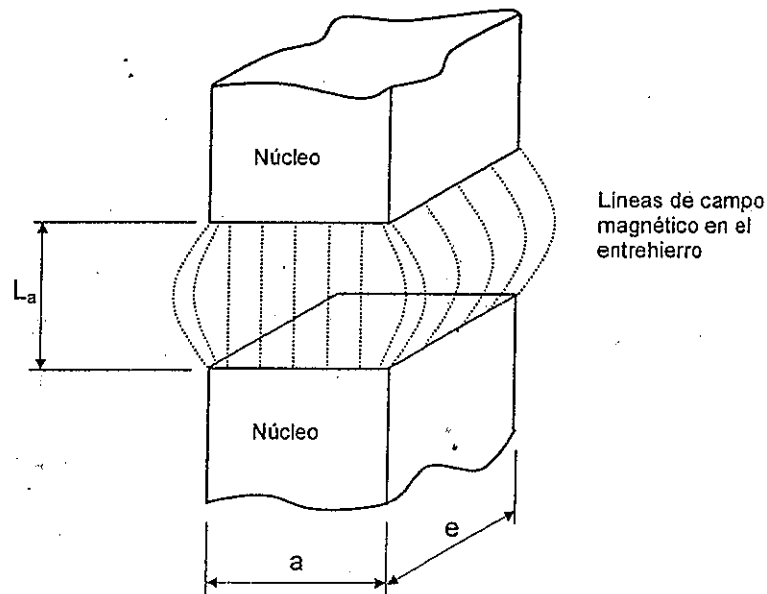


Figura 5.20 Configuración de las líneas de campo magnético en la zona del entrehierro

5.8.1 Determinación de la corriente en la bobina conociendo el flujo magnético

Este caso se presenta cuando conocemos el flujo magnético necesario en una parte del circuito magnético, y lo que se desea hallar es la corriente necesaria para excitar la bobina, para lo cual analizaremos los siguientes casos:

Circuito magnético sin entrehierro y alimentado con corriente continua

Tomemos el circuito de la figura 5.21 en el cual tenemos un núcleo macizo, y necesitamos obtener un flujo magnético de valor " Φ " en el mismo, conociendo las dimensiones geométricas, la curva de imanación del material y la cantidad de espiras de la bobina excitadora.

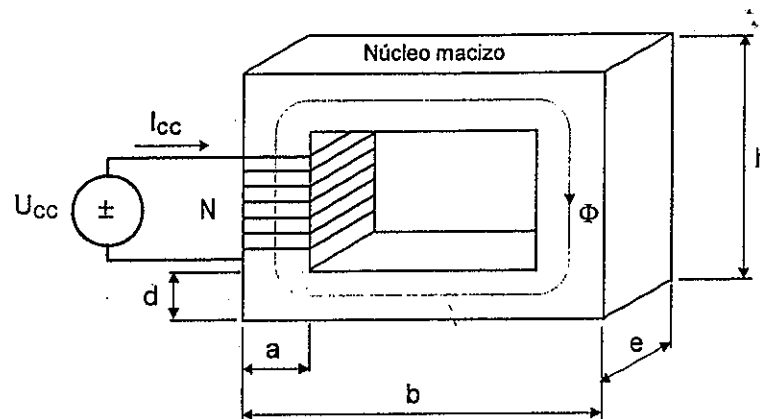


Figura 5.21 Circuito magnético alimentado con corriente continua

El proceso de cálculo es el siguiente:

- a) Cálculo de la longitud media del circuito magnético:

$$L_m = 2(b-a) + 2(h-d)$$

- b) Cálculo de la sección del hierro:

$$S_{Fe} = a \cdot e \quad (\text{lo tomamos constante para todo el circuito, caso contrario se deberá efectuar el cálculo para cada tramo en forma análoga})$$

- c) Con el flujo magnético como dato hallamos la inducción magnética:

$$B = \frac{\Phi}{S_{Fe}}$$

- d) Con el valor de la inducción magnética y la curva $B = f(H)$ característica del material ferromagnético, obtenemos el valor de la intensidad de campo magnético.

- e) Calculamos la corriente necesaria:

$$I_{CC} = \frac{H_{Fe} \cdot L_m}{N}$$

Circuito magnético con entrehierro y alimentado con corriente alterna sinusoidal

El circuito es el dibujado en la figura 5.22 en el cual conocemos sus dimensiones geométricas, el número de espiras de la bobina, el factor de dispersión del flujo magnético, la curva de imanación del material y el factor de apilado:

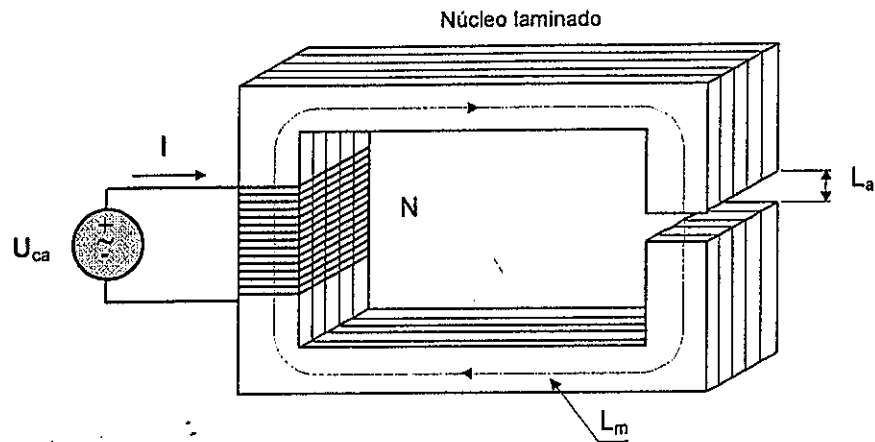


Figura 5.22 Circuito magnético con entrehierro alimentado con corriente alterna

Procedemos a efectuar los siguientes cálculos:

- a) Cálculo de la longitud del hierro:

$$L_{Fe} = L_m - L_a \cong L_m$$

- b) Cálculo de la sección del hierro:

$$S_{Fe} = S_G \cdot \frac{f_{ap}(\%)}{100}$$

- c) Cálculo de la sección del aire en el entrehierro:

$$S_a = (a + L_a) \cdot (e + L_a)$$

- d) Incrementamos el flujo útil en el valor del flujo disperso, para tener el flujo necesario originado por la bobina.

$$\Phi = \frac{\Phi_u}{1 - \frac{\Phi_d(\%)}{100}}$$

- e) Cálculo de la inducción en el hierro:

$$B_{Fe} = \frac{\Phi}{S_{Fe}}$$

- f) Cálculo de la inducción en el aire:

$$B_a = \frac{\Phi}{S_a}$$

- g) Cálculo de la intensidad de campo magnético en el hierro:

A través de la curva de imanación del material entrando con el valor de B_{Fe} obtenemos el H_{Fe}

h) Cálculo de la intensidad de campo magnético en el aire:

$$H_a = \frac{B_a}{\mu_0}$$

i) Cálculo de la corriente necesaria:

$$I_{max} = \frac{H_{Fe} \cdot L_{Fe} + H_a \cdot L_a}{N} \quad (\text{Valor máximo de la corriente})$$

Otra forma de tener en cuenta el flujo disperso, es trabajando con el flujo útil, y cuando se determina el valor de la corriente necesaria, la misma se incrementa en el porcentaje establecido para el flujo disperso.

Los resultados que se obtienen mediante estos dos métodos prácticos para obtener la corriente necesaria no son iguales, salvo el caso en que se esté trabajando en la zona lineal de la curva B-H del material.

Circuito magnético con ramas en paralelo y alimentado con corriente alterna

En este caso se desea tener un cierto valor de flujo magnético en el entrehierro del circuito que se muestra en la figura 5.23 siendo los datos, las características geométricas del circuito, las características de imanación de los distintos materiales que lo componen, los porcentajes de dispersión, el factor de apilado y el número de espiras de la bobina.

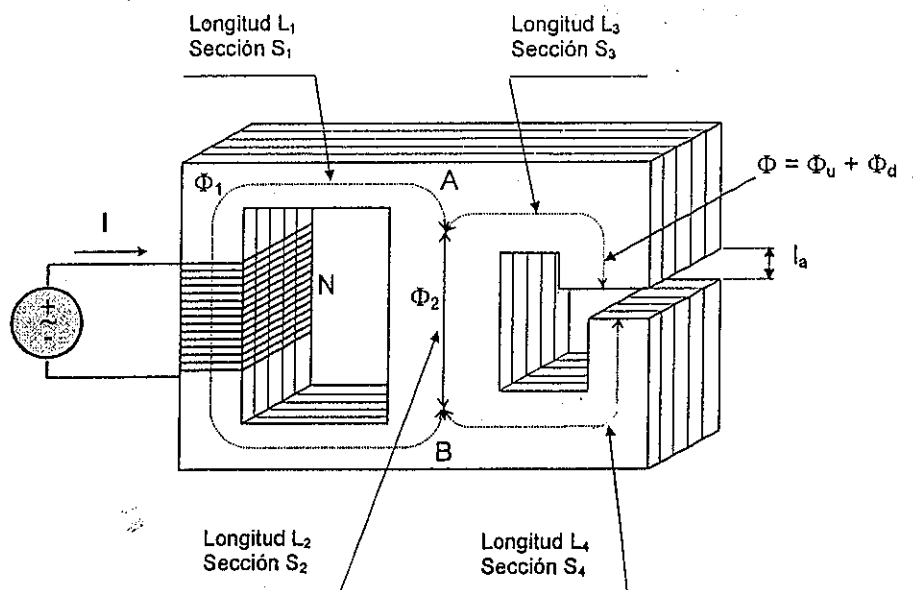


Figura 5.23 Circuito magnético con ramas en paralelo

Se procede de la siguiente forma:

- a) Se incrementa el flujo necesario para tener en cuenta el flujo disperso:

$$\Phi = \frac{\Phi_u}{1 - \frac{\Phi_d(\%)}{100}} = \Phi_3 = \Phi_4 = \Phi_a$$

El flujo es el mismo en las secciones 3, 4 y en el entrehierro.

- b) Se calcula la inducción magnética en las secciones 3 y 4

$$B_{3Fe} = \frac{\Phi}{S_3 \cdot f_{ap}} \quad B_{4Fe} = \frac{\Phi}{S_4 \cdot f_{ap}}$$

- c) Se calcula la inducción magnética en el entrehierro, a cuyos efectos y no teniendo otros datos tomaremos su sección como un promedio de la 3 y 4:

$$B_a = \frac{\Phi}{\frac{S_3 + S_4}{2}}$$

- d) Con las curvas de imanación de los materiales 3 y 4 obtenemos las correspondientes intensidades de campo magnético H_{3Fe} y H_{4Fe} .
- e) Se calcula la intensidad de campo magnético en el entrehierro:

$$H_a = \frac{B_a}{\mu_0}$$

- f) Se calcula la fuerza magnetomotriz entre los puntos A y B

$$F_{mmA-B} = H_a \cdot L_a + H_{3Fe} \cdot L_3 + H_{4Fe} \cdot L_4$$

Como: $F_{mmA-B} = H_{2Fe} \cdot L_2$ obtenemos el valor de H_{2Fe}

$$H_{2Fe} = \frac{F_{mmA-B}}{L_2}$$

- g) Con este último valor y la curva de imanación del material 2 se obtiene el valor de la inducción magnética B_{2Fe} , y procedemos a calcular el flujo magnético:

$$\Phi_2 = B_{2Fe} \cdot S_2 \cdot f_{ap}$$

- h) Calculamos el valor del flujo magnético en la zona 1 :

$$\Phi_1 = \Phi_2 + \Phi$$

- i) Calculamos la inducción magnética en la zona 1:

$$B_{1Fe} = \frac{\Phi_1}{S_1 \cdot f_{ap}}$$

- j) Calculamos el valor de la intensidad de campo magnético mediante la curva de imanación del material 1, mediante el valor de la inducción magnética obtenido en el paso anterior: H_{1Fe}
- k) Procedemos al cálculo de la corriente a suministrar a la bobina (Valor máximo:

$$I_{\max} = \frac{H_{1Fe} \cdot L_1 + H_2 \cdot L_2}{N} = \frac{H_{1Fe} \cdot L_1 + H_a \cdot l_a + H_{3Fe} \cdot L_3 + H_{4Fe} \cdot L_4}{N}$$

5.8.2 Determinación del flujo magnético conociendo la corriente en la bobina

Circuito simple sin entrehierro

Tomemos el circuito de la figura 5.21, en el cual tenemos las características geométricas, la curva de imanación del material, factor de apilado, porcentaje de flujo disperso, el número de espiras de la bobina y la corriente en la misma. Con estos datos efectuamos el siguiente proceso de cálculo:

- a) Se calcula la intensidad de campo magnético:

$$H = \frac{N \cdot I}{L_m}$$

- b) Mediante el valor hallado y la curva de imanación se determina la inducción magnética, y con la sección transversal el flujo magnético correspondiente.

Circuito con entrehierro y/o ramas en paralelo

Teniendo como datos las dimensiones geométricas del circuito, las curvas de imanación de los distintos materiales que lo puedan componer, factores de apilado, porcentaje de flujo disperso, el número de espiras y la corriente por la bobina, se procede al siguiente cálculo:

- a) Se elige un valor aproximado de la inducción magnética (B_1) en la zona requerida (Dentro de la curva de magnetización del material en estudio).
- b) Se calcula la corriente necesaria (I_1) con el proceso utilizado en 5.8.1.
- c) Este valor de corriente obtenido, no coincidirá con nuestro dato, por lo cual tomamos otro valor de la inducción magnética (B_2), por arriba del anterior si la corriente resultante es menor ó por debajo si la corriente es mayor. Con esto obtenemos un segundo valor de corriente (I_2).
- d) Se reitera el proceso las veces que se considere necesario y se llevan los valores a un gráfico, el valor de la inducción magnética, en ordenadas y la corriente en abscisas, tal como el de la figura 5.24. Con los puntos donde se cortan los valores de corriente e inducción magnética, trazamos una curva.
- e) Con el valor de la corriente en la bobina, ingresamos por el eje de abscisas y donde se corta con la curva obtenida, obtenemos el valor de la inducción útil buscada. De aquí con la sección transversal del hierro obtenemos el flujo magnético: $\Phi_u = B_u \cdot S$ La exactitud depende de la cantidad de puntos que hallemos.

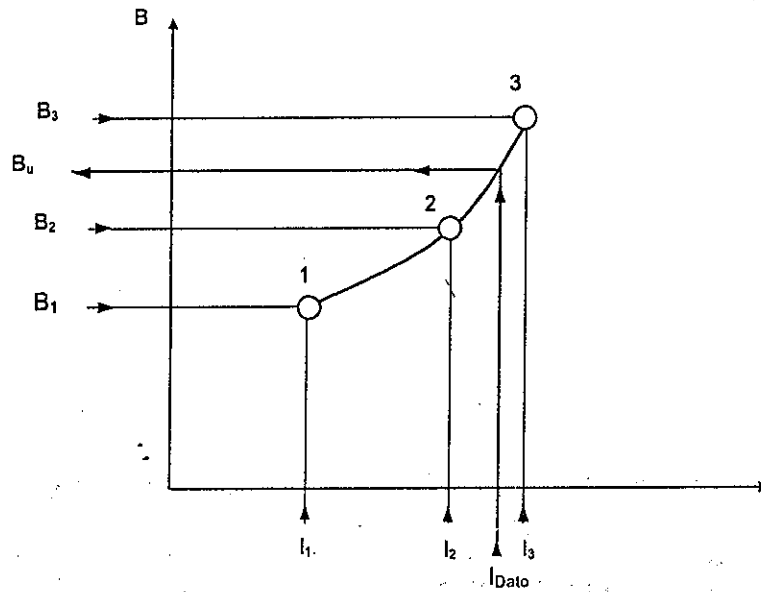


Figura 5.24 Gráfico para la determinación del flujo útil en función de la corriente en la bobina

5.9 Comportamiento de una bobina alimentada con tensión alterna senoidal con núcleos de distintos materiales

En el apartado 5.6 vimos que el flujo magnético originado en una bobina alimentada con una tensión alterna, era proporcional a la misma ($E = 4,44 \cdot f \cdot N \cdot \Phi$).

Este flujo no está totalmente inserto en el núcleo, sino que parte de las líneas de campo se cierran a través del aire (En un porcentaje pequeño del orden del 3 al 5%, dependiendo de la configuración del circuito), según se observa en la figura 5.25.

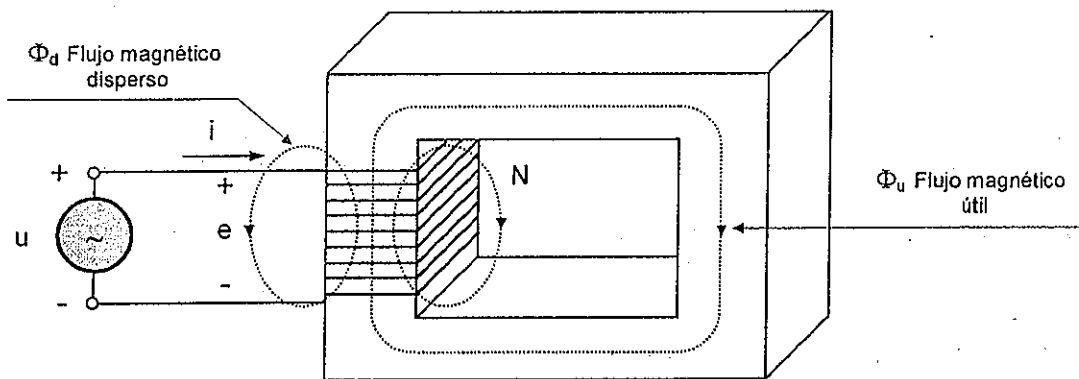


Figura 5.25 Distribución de flujos en un circuito magnético1

El flujo total originado por la fuerza magnetomotriz de la bobina, es la suma de ambos flujos, o sea:

$$\Phi_T = \Phi_d + \Phi_u$$

Como estos flujos magnéticos son variables en el tiempo, los mismos van a inducir fuerzas electromotrices en la bobina de acuerdo a los siguientes valores:

$$N \frac{d\Phi_T}{dt} = N \frac{d\Phi_d}{dt} + N \frac{d\Phi_u}{dt}$$

El primer término del segundo miembro es una tensión debida al flujo disperso y el segundo es la tensión inducida, siendo la suma igual a la tensión aplicada (Despreciando la resistencia óhmica propia de la bobina), o sea que nos queda:

$$u = e_d + e$$

Dado que la bobina está construida con un elemento conductor la misma, tiene un cierto valor de resistencia óhmica, distribuida a lo largo del conductor que la conforma, por lo tanto habrá una caída de tensión adicional.

Si adoptamos en primera instancia que el núcleo no tiene pérdidas en el hierro, la corriente que circulará por la misma será la necesaria para magnetizar el núcleo. Si separamos la resistencia óhmica distribuida y el efecto del flujo disperso y lo representamos por una resistencia concentrada (R) y una reactancia de dispersión (X_d), lo que nos queda es una bobina ideal que produce el flujo útil la cual la representamos por una reactancia (X_m).

Luego la bobina se la puede representar mediante un circuito eléctrico equivalente, tal como se muestra en la figura 5.26.

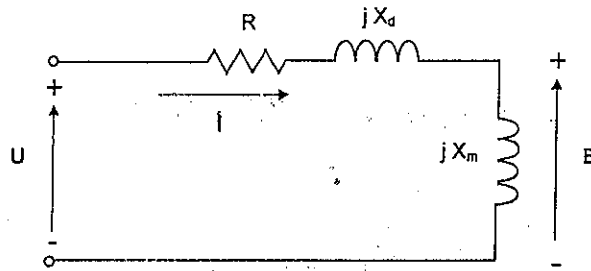


Figura 5.26 Circuito eléctrico equivalente de una bobina

Por lo tanto y de acuerdo al circuito equivalente, la tensión aplicada está dada por la siguiente ecuación:

$$U = R I + j X_d I + j X_m I$$

En este caso la corriente que circula es la necesaria para magnetizar el núcleo.

Debido a que el núcleo tiene pérdidas en el hierro, vamos a tener un consumo de potencia que se suma a las pérdidas por efecto joule en la resistencia óhmica de la bobina ($R.I^2$).

Completando entonces el circuito equivalente, a los efectos de representar estas pérdidas, el mismo queda como se muestra en la figura 5.27.

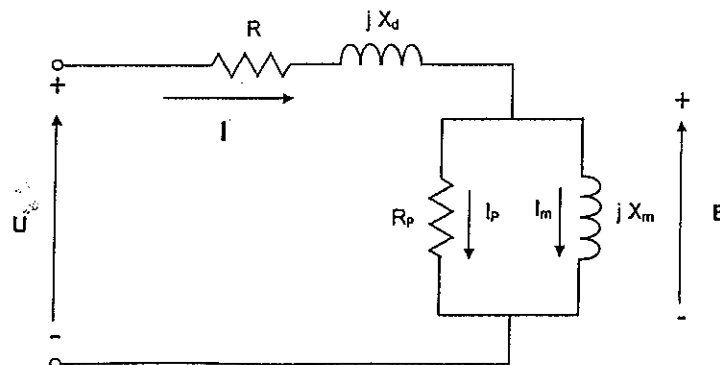


Figura 5.27 Circuito equivalente de una bobina con núcleo de hierro

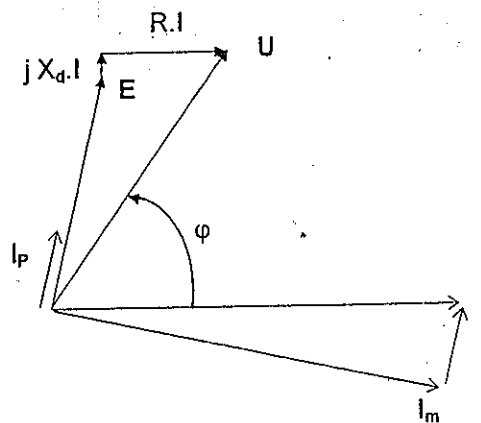
En el mismo R_p , representa las pérdidas en el hierro (potencia activa), ya que dichas pérdidas son proporcionales al cuadrado de la inducción magnética máxima, que es lo mismo que decir al flujo magnético máximo o a la fuerza electromotriz "E". Por lo tanto las pérdidas en el hierro tienen un valor:

$$p_{Fe} = \frac{E^2}{R_p} \quad [W]$$

X_m : Representa la componente magnetizante, ya que la misma es proporcional al flujo magnético máximo y este es proporcional a la fuerza electromotriz:

$$I_m = \frac{E}{j X_m}$$

El diagrama fasorial correspondiente es el mostrado en la figura 5.28



5.28 Diagrama fasorial de una bobina con núcleo de hierro

INTRODUCCIÓN A LAS MEDICIONES ELÉCTRICAS

6.1 Introducción

Nos vamos a ocupar de las mediciones destinadas a la determinación de magnitudes eléctricas, como ser: intensidad de corriente, tensión, potencia, resistencia, inductancia, capacidad, frecuencia, etc.

Estas magnitudes pueden medirse con instrumentos que dan directamente el valor correspondiente, mediante una lectura clara y constante, mediante instrumentos que reciben el nombre de la magnitud a medir, como ser, amperímetro, voltímetro, vatímetro, etc.

Dentro de los instrumentos nos encontramos con los analógicos, los cuales son de medición directa, basándose la lectura en la posición de una aguja sobre una escala adecuada y los digitales, en los cuales el instrumento por "sí" lee el valor de la medición y la misma aparece en un display.

6.2 Clasificación de los instrumentos analógicos

Podemos clasificar los instrumentos analógicos, de acuerdo a su principio de funcionamiento, o los efectos por los cuales deflexionan, de acuerdo al siguiente esquema:

6.2.1 Bobina móvil e Imán permanente

Son instrumentos que deflexionan cuando se les aplica corriente continua únicamente o bien corriente alterna con el agregado de rectificadores.

Este instrumento consta de un imán permanente, con dos expansiones polares, entre las cuales gira un bastidor formado por una base de aluminio, sobre el cual se monta un arrollamiento de alambre conductor muy de muy pequeña sección (o bien una bobina autosoportada).

Dentro de bastidor se encuentra un cilindro de hierro dulce, fijado al instrumento, con lo cual se disminuye la reluctancia del circuito magnético. En la figura 6.1 se encuentra un detalle del mismo.

El bastidor está guiado por dos semiejes de material conductor, cuyos extremos son cónicos y poseen una terminación fina, los cuales se montan sobre sendos pivotes, que le permite un movimiento giratorio.

Sobre cada semieje encontramos dos resortes arrollados en sentido contrario, los cuales se hallan fijos en un extremo a la estructura del instrumento y por la otra al semieje correspondiente, con lo cual la posición del bastidor se mantiene en una cierta posición.

El sistema está construido en forma tal, que la corriente a medir ingresa a través de uno de los resortes, pasa por el semieje correspondiente, circula por la bobina y sale por el otro semieje y su resorte.

Sobre el eje de suspensión está montada una aguja indicadora ó índice que se desplaza sobre una escala adecuada, en la cual se efectúa la lectura correspondiente.

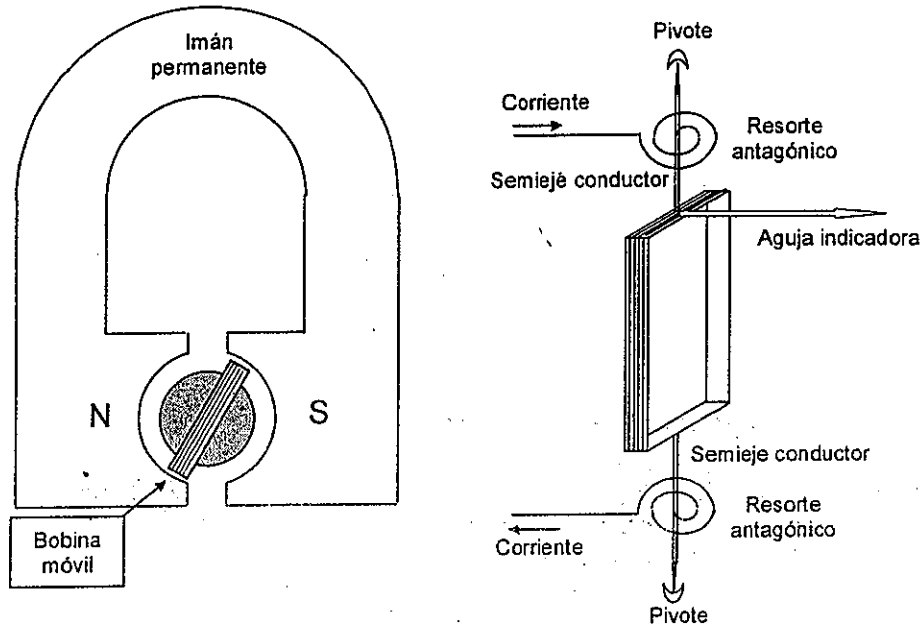


Figura 6.1 Esquema de un instrumento de imán permanente y bobina móvil

Debido a la forma que presenta el imán en la zona que enfrenta a la bobina, el campo magnético que atraviesa la misma es radial, lo cual hace que el mismo tenga un valor constante en cualquier posición de dicha bobina (dentro del ángulo que gira la misma).

Si se hace circular corriente por la bobina, en cada conductor de la misma se origina una fuerza, cuya magnitud está dada por la siguiente expresión

$$F = N \cdot B \cdot I \cdot L$$

Donde: F: Fuerza [N]

N: número de espiras que conforman la bobina

B: inducción magnética producida por el imán permanente [T]

I: Corriente que circula por la bobina [A]

L: Longitud del conductor que se encuentra inmerso en el campo magnético [m]

Esta fuerza aparece en los conductores, cuya dirección es perpendicular al campo magnético, de forma tal que de un lado de la bobina tiene un sentido y en el otro lado tiene sentido contrario (Dichos sentidos se determinan por medio de alguna regla conocida).

Dado que estas dos fuerzas tienen distinto sentido y además están en distintos planos de acción, se origina una cupla, cuyo valor está dado por:

$$C_m = F \cdot d = N \cdot I \cdot B \cdot L \cdot d = K \cdot I \quad (d: \text{ancho de la bobina})$$

De aquí observamos que la cupla es proporcional a la corriente que circula por la bobina, y origina un giro del sistema, el cual se detendrá cuando la cupla motora y la cupla antagonista originada por los resortes se igualen.

La cupla resistente provocada por los resortes, es proporcional al ángulo de giro de los mismos y a una constante propia de los mismos, siendo su valor:

$$C_R = K_R \cdot \theta$$

En equilibrio:

$$C_m = C_R$$

$$K \cdot I = K_R \cdot \theta$$

$$\theta = K/K_R \cdot I = K_A \cdot I$$

Con lo cual se observa que el ángulo de giro del sistema es proporcional a la corriente que circula por la bobina.

Este instrumento es apto para corriente continua, ya que de aplicar corriente alterna, el signo de la cupla estaría cambiando de sentido en función de la frecuencia de la corriente y el sistema quedaría en la posición de cero.

La aguja indicadora se desplaza sobre una escala adecuada, cuyo tarado se efectúa en base a la corriente que circula, lo cual hace que este instrumento se lo pueda utilizar para medir corrientes o tensiones con los aditamentos necesarios para limitar la corriente al valor máximo que pueda soportar la bobina, con el agregado de resistencias en serie o en paralelo.

Instrumento utilizado como amperímetro

El instrumento utilizado como amperímetro se debe conectar en serie con la carga cuyo valor de corriente queremos determinar, tal como se muestra en la figura 6.2.

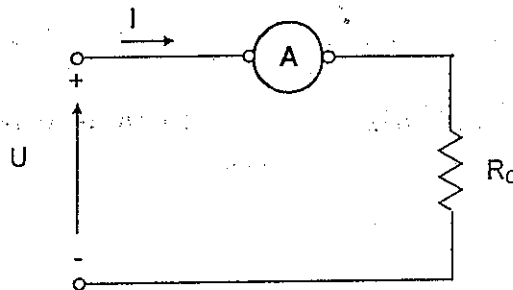


Figura 6.2 Conexión de un instrumento utilizado como amperímetro

Debido a la pequeña corriente que admite la bobina del instrumento, para poder usar este instrumento como amperímetro, debemos poder ampliar su alcance, lo cual se efectúa mediante el agregado de resistencia en paralelo (Shunt).

En la figura 6.3 observamos la forma de conexión.

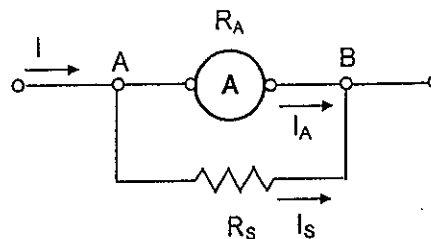


Figura 6.3 Conexión de una resistencia en derivación

Esta resistencia en paralelo deberá tener un valor, el cual surge del alcance que se desee obtener.

De la figura 6.3, la corriente que puede soportar el instrumento está indicado por I_A , siendo R_A la resistencia de la bobina.

Si queremos utilizar el mismo instrumento para poder efectuar mediciones de corriente cuyo valor máximo será "I", la resistencia shunt a colocar, surge del siguiente análisis:

La diferencia de potencial entre los bornes A y B está dada por:

$$U_{AB} = R_A \cdot I_A = R_S \cdot I_S$$

$$R_S = \frac{R_A \cdot I_A}{I_S} = \frac{R_A \cdot I_A}{I - I_A} = \frac{R_A}{\frac{I}{I_A} - 1}$$

Este valor de la resistencia shunt, es menor que la resistencia de la propia bobina, para poder derivar por la misma la diferencia de corrientes.

Con el agregado de la resistencia mencionada se puede realizar el tarado de la escala para este mayor rango de corriente.

instrumento usado como voltímetro

En este caso el instrumento se debe conectar en paralelo con la carga de acuerdo a lo indicado en la figura 6.4.

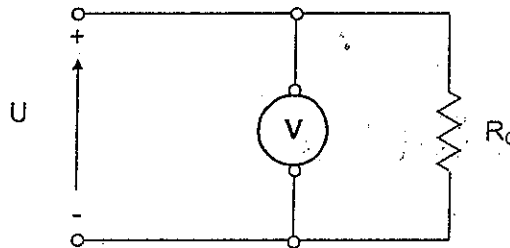


Figura 6.4 Conexión de un instrumento utilizado como voltímetro

Debido a que la corriente que circula por el instrumento depende de la resistencia de la bobina y de la tensión aplicada, para poder utilizar el instrumento como voltímetro deberemos agregar una resistencia en serie, de acuerdo a lo indicado en la figura 6.5

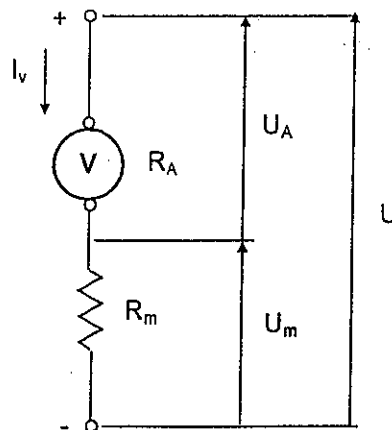


Figura 6.5 Conexión de una resistencia en serie

En el gráfico se cumple :

$$U = U_A + U_m = I_v \cdot R_A + I_v \cdot R_m$$

De lo que obtenemos:

$$R_m = \frac{U}{I_A} - R_A$$

En este caso el tarado de la escala se efectuará en volt.

6.2.2 Instrumentos de hierro móvil

En este tipo de instrumentos, la corriente a medir circula por una bobina fija, motivo por el cual la sección de los conductores que la conforman pueden tener mayor sección, que en el caso del instrumento de imán permanente.

El sistema móvil está conformado por un eje, sobre el cual se monta la aguja indicadora y el sistema de resortes antagónicos, tal lo visto en el instrumento anterior y además lleva una chapa de hierro dulce, que es la que provoca el movimiento de giro ante la presencia de un campo magnético producido por la corriente que circula por la bobina, al producir una imantación en la misma. En la figura 6.6, se muestra un esquema de funcionamiento de este tipo de instrumento.

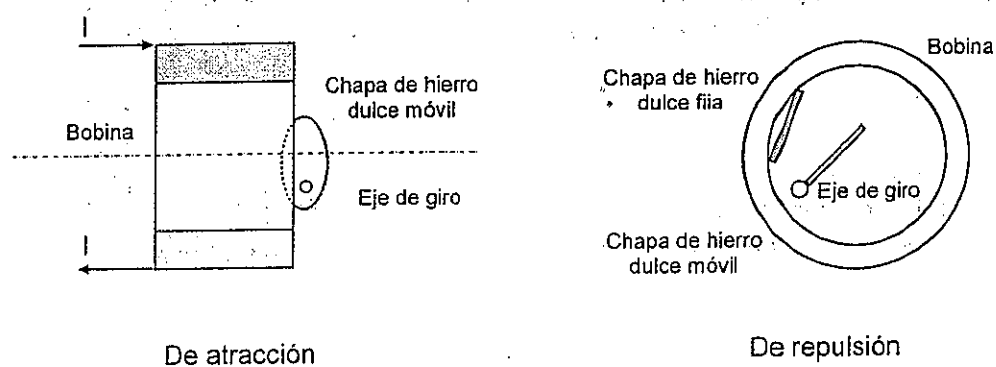


Figura 6.6 Instrumento de hierro móvil

Cuando el sistema comprende una bobina y una sola chapa de hierro dulce, el movimiento que se produce al imanarse la chapa es de atracción, en cambio en aquellos sistemas que tienen dos chapas, una fija a la bobina y otra móvil, la imanación de las dos chapas provoca un movimiento de repulsión.

Las fuerzas que se producen son proporcionales al cuadrado de la intensidad que circula por la bobina, en consecuencia, para cualquiera de los dos sentidos que pueda tener la circulación de la corriente, el esfuerzo experimentado por la lámina móvil es del mismo sentido, lo cual hace que este instrumento sea apto para corriente continua o alterna.

Instrumento utilizado como amperímetro

Este instrumento se puede utilizar como amperímetro para corrientes de 20 a 50 A, para valores superiores se utilizan con un transformador de medida auxiliar.

Instrumento utilizado como voltímetro

Se lo utiliza con el agregado de resistencia en serie al igual que el instrumento de imán permanente.

6.2.3 Instrumentos electrodinámicos

Los instrumentos electrodinámicos poseen dos bobinas, una fija y la otra giratoria, sobre ejes, semejante a los instrumentos de bobina móvil e imán permanente. Ambas bobinas pueden estar sometidas a la misma corriente (conectadas en serie) o a dos corrientes diferentes (conectadas en paralelo).

La bobina fija, que es externa al ser recorrida por una corriente crea en su interior un campo magnético que actúa sobre la corriente que circula por la bobina móvil que es interior, lo cual produce fuerzas sobre los lados de la misma y por lo tanto produce el giro correspondiente.

La bobina móvil está provista como hemos visto de los resortes antagonísticos y la aguja indicadora.

En la figura 6.7 vemos un esquema de este tipo de instrumento

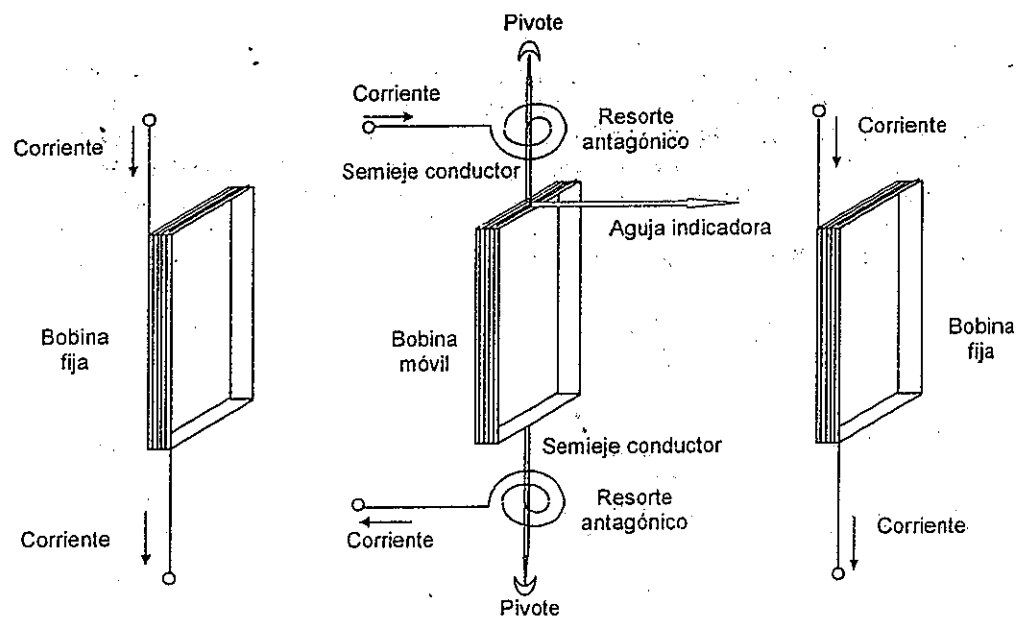


Figura 6.7 Instrumento electrodinámico

La bobina exterior o fija está dividida en dos partes, lo cual permite que las mismas se puedan conectar en serie o en paralelo (en este caso se duplica la corriente que puede ingresar a la parte fija del instrumento).

El ángulo de giro de la bobina móvil está dado por:

$$\theta_{CC} = K_{CC} I_{Fija} \cdot I_{Móvil} \quad (\text{en corriente continua})$$

$$\theta_{CA} = K_{CA} I_{Fija} \cdot I_{Móvil} \cdot \cos \beta \quad (\text{en corriente alterna, siendo } \beta \text{ el ángulo de desfasaje entre las corrientes})$$

Este instrumento al igual que el anterior se puede utilizar como amperímetro o como voltímetro, a cuyos efectos la bobina fija y la móvil se deben conectar en serie ya que la corriente es única (su costo es más elevado).

El principal uso de este instrumento es como vatímetro, para lo cual la bobina fija se utiliza para medir la corriente que pasa por la carga y la bobina móvil para medir la tensión sobre la carga.

Vatímetro electrodinámico

Este instrumento presenta cuatro terminales, de los cuales dos se conectan en serie con la carga y miden la corriente que pasa por la misma mediante la bobina fija de mayor capacidad y los otros dos se conectan en paralelo para medir la tensión, mediante el agregado de una resistencia en serie (R_m) a la bobina móvil, de acuerdo al esquema de la figura 6.8

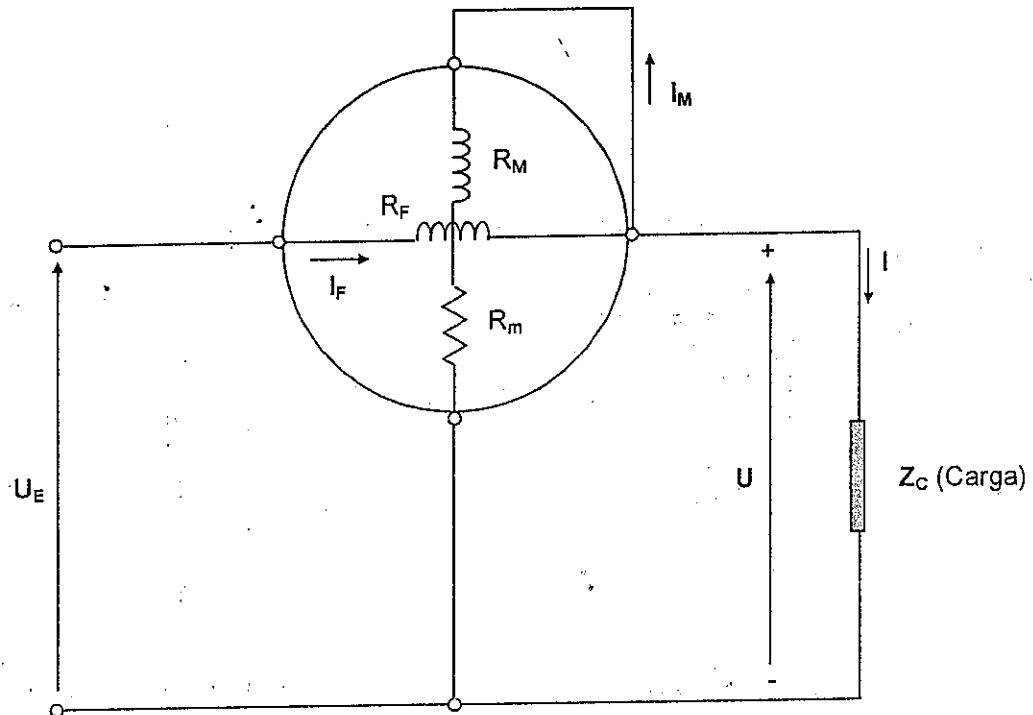


Figura 6.8 Esquema de conexión de un vatímetro electrodinámico

Con este tipo de conexión la corriente que circula por la bobina móvil, es proporcional a la tensión sobre la carga, en cambio la corriente que circula por la bobina móvil, es la suma de la corriente que pasa por la carga y la que se deriva por la bobina móvil.

Suponiendo que la carga es de carácter óhmico-inductiva, la corriente estará en atraso a la tensión en función del factor de potencia de la misma.

En cambio la corriente que pasa por la bobina móvil, debido al valor elevado de la resistencia adicional R_m , podemos considerar que está en fase con la tensión sobre la carga.

De acuerdo a esta situación el diagrama fasorial correspondiente es el de la figura 6.9.

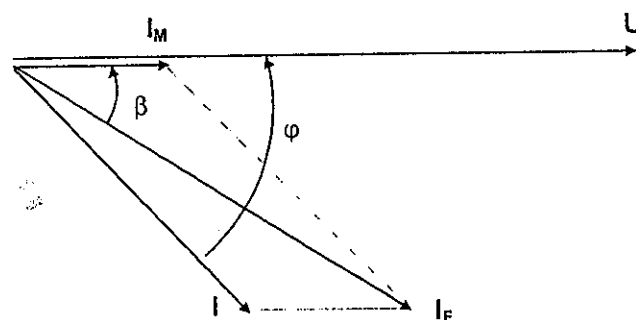


Figura 6.9 Diagrama fasorial

De acuerdo al diagrama fasorial se cumple:

$$I_F \cdot \cos \beta = I_M + I \cdot \cos \varphi$$

La corriente que pasa por la bobina móvil es:

$$I_M = \frac{U}{R_W} \quad \text{Donde } R_W = R_M + R_m$$

Habíamos visto que el ángulo de deflexión está dado por:

$$\theta_{CA} = K_{CA} I_F \cdot I_M \cdot \cos \beta \quad \text{Reemplazando}$$

$$\theta_{CA} = K_{CA} \cdot I_M \cdot (I_M + I \cos \varphi)$$

$$\theta_{CA} = K_{CA} (I_M^2 + I_M \cdot I \cos \varphi)$$

$$\theta_{CA} = K_{CA} \left(\frac{U^2}{R_W^2} + \frac{U}{R_W} \cdot I \cdot \cos \varphi \right)$$

$$\theta_{CA} = \frac{K_{CA}}{R_W} \left(\frac{U^2}{R_W} + U \cdot I \cdot \cos \varphi \right)$$

$$\theta_{CA} = K_W \left(\frac{U^2}{R_W} + U \cdot I \cdot \cos \varphi \right)$$

En esta expresión $U \cdot I \cdot \cos \varphi =$ Potencia activa consumida por la carga

$$\frac{U^2}{R_W} = \text{Potencia que se consume en las resistencias de la bobina móvil o voltimétrica } (R_M + R_m)$$

Por lo tanto en este tipo de conexión la indicación del instrumento es proporcional al consumo de la carga más el consumo de la bobina voltimétrica.

En el caso de que la resistencia del circuito voltimétrico sea muy grande, se puede despreciar dicho consumo.

Esta forma de conectar la bobina voltimétrica sobre la carga recibe también el nombre de conexión "atrás", en cambio si la misma se conecta sobre la fuente recibe el nombre de conexión "adelante", en cuyo caso la tensión que mide dicha bobina no es la de la carga, sino que hay que adicionarle la caída de tensión en la bobina amperométrica o fija, mientras que la corriente que mide esta última es la corriente que pasa por la carga.

En la figura 6.10 se muestran esquemáticamente ambos tipos de conexión.

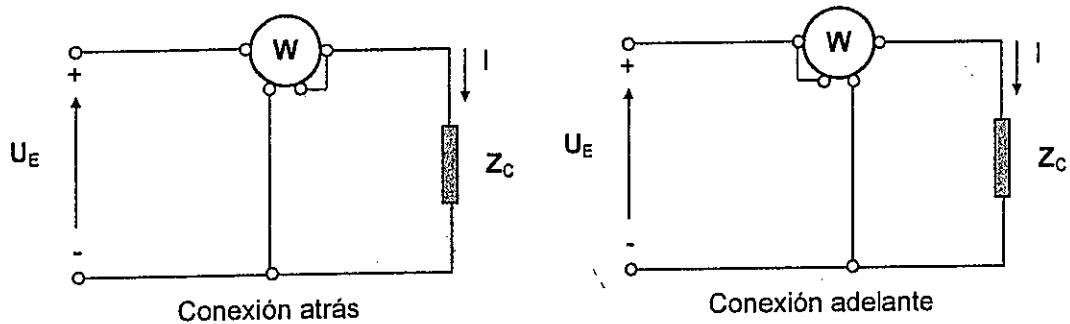


Figura 6.10 Formas de conexión de los vatímetros

6.3 Fundamentos de la teoría de errores

En la técnica de las mediciones eléctricas se puede aplicar la teoría de errores, desde el punto de vista matemático. Pero desde el punto de vista práctico lo fundamental alcanza para la solución de los casos comunes.

Partiendo de que ninguna medida es exacta, en el sentido absoluto de su palabra, toda medida está afectada por un error.

Definimos como error absoluto a la diferencia entre la cantidad que medimos "C" y la cantidad que consideramos verdadera "C".

$$e_a = C_m - C$$

Este error será en más o en menos, según cual sea mayor. En la técnica es conveniente expresar los errores en forma porcentual, en relación con la cantidad considerada verdadera o más probable, con lo cual el error relativo lo podemos expresar en forma porcentual.

$$e\% = \frac{C_m - C}{C} 100 = \frac{e_a}{C} 100$$

6.3.1 Clasificación de los errores

Los errores posibles a ser cometidos se pueden clasificar en:

Errores groseros

Son aquellos que se pueden producir por inexperiencia del observador o falta de atención. La magnitud de los mismos hace que sean fácilmente advertidos por simple observación y por lo tanto descartarlos. Para evitarlos es conveniente efectuar repetición en las medidas.

Errores sistemáticos

Estos errores son previsibles y tienen el mismo signo, lo cual lleva a que los mismos puedan calcularse y desafectarlos de la medición. Los mismos aparecen por:

Método: Depende de cómo se efectuó la medición, ya que los instrumentos a utilizar introducen modificaciones en las condiciones del circuito. Como ejemplo tomemos la medición del valor de una resistencia, por medio de un voltímetro y un amperímetro, los cuales los podemos conectar de dos formas distintas.

- a) Conexión corta: En la figura 6.11 se muestra este tipo de conexión, en la cual el voltímetro mide la tensión real sobre la resistencia, pero el amperímetro mide la suma de la corriente que pasa por la resistencia más la que se deriva por el voltímetro.

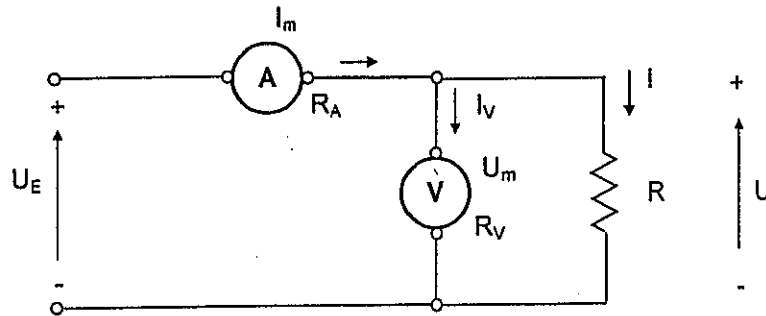


Figura 6.11 Conexión corta o atrás

El valor de la resistencia medida está dado por:

$$R_m = \frac{U_m}{I_m}$$

$$R = \frac{U}{I} = \frac{U_m}{I_m - I_v} = \frac{U_m}{I_m - \frac{U_m}{R_V}}$$

El error que se comete está dado por: $\Delta R = R_m - R$ el cual se puede desafectar.

- b) Conexión larga: En la figura 6.12 se muestra este tipo de conexión, en la cual el voltímetro mide la tensión sobre la resistencia más la caída de tensión en el amperímetro, pero el amperímetro mide la corriente que pasa por la resistencia.

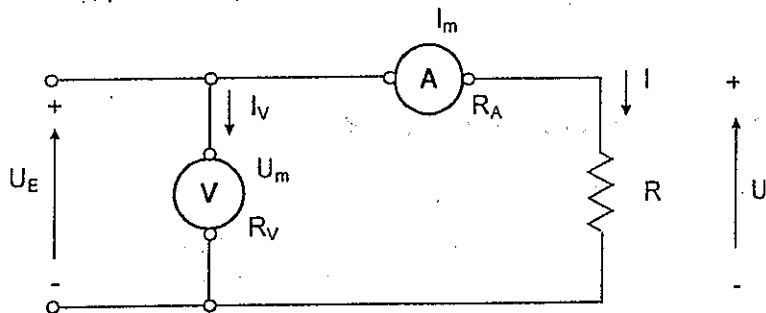


Figura 6.12 Conexión larga o adelante

El valor de la resistencia medida está dado por:

$$R_m = \frac{U_m}{I_m}$$

$$R = \frac{U}{I} = \frac{U_m - R_A \cdot I_m}{I_m} = \frac{U_m}{I_m} - R_A$$

Como la resistencia voltimétrica tiene valores muy grandes, la conexión corta es conveniente cuando la resistencia a medir es mucho más pequeña, y en este caso se puede desprestigiar el error, en cambio la conexión larga es conveniente cuando la resistencia a medir es muy grande con respecto a la del amperímetro.

En el caso de que realice la corrección cualquiera de los dos métodos es factible. También surge que habrá un valor de resistencia a medir que produce el mismo error con una conexión o la otra, la cual se puede determinar en forma analítica.

Instrumental: Este error se debe al trazado de la escala cuando se efectúa la misma por comparación con un instrumento patrón. A este error debemos agregarle el error de lectura del instrumento patrón, lo cual lleva a lo que se llama error de trazado.

Otro error que comete el instrumento es debido a los rozamientos que tiene el sistema de suspensión, lo cual hace que para la misma corriente la aguja indicadora no ocupe la misma posición.

Errores debidos al observador: Nacen del hecho de que cada observador tiene una forma particular de efectuar las lecturas, como interpolar en la mitad, tercera ó cuarta parte de una división, leer en exceso o en defecto, tomar valores pares o impares.

Errores debido a las condiciones donde se efectúa la medición: Son los que se provocan por condiciones de temperatura, humedad, presión atmosférica, presencia de campos magnéticos o eléctricos, etc.

Errores accidentales

Son errores casuales, fortuitos, inevitables producidos por la imperfección de nuestros sentidos y las perturbaciones del medio ambiente. No obedecen a una ley por lo tanto no se reproducen en forma igual en situaciones iguales. Los mismos son producidos por:

Paralaje: Son motivados por la falta de perpendicularidad entre el ojo del observador y la escala del instrumento, tal como se muestra en la figura 6.13.

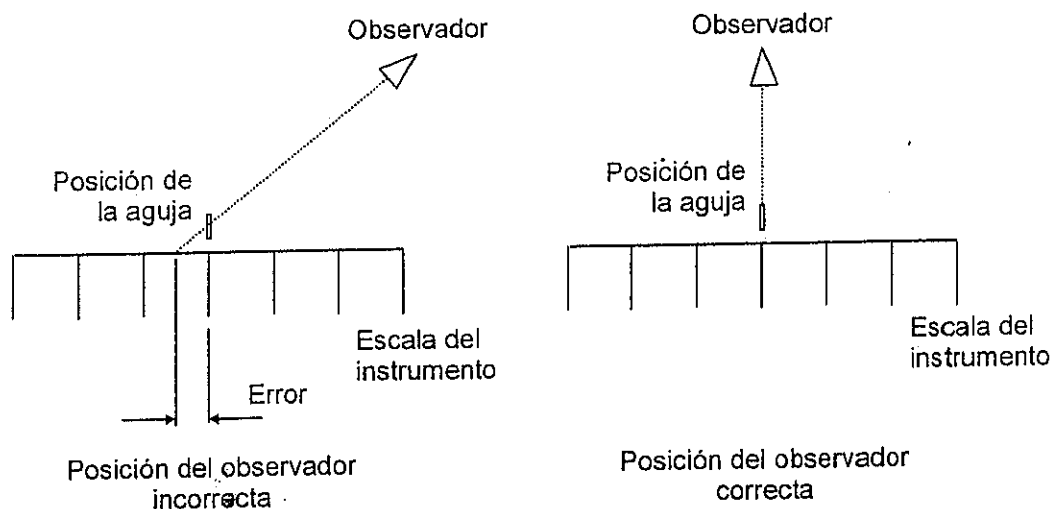


Figura 6.13 Lectura con error de paralaje

Para disminuir este tipo de error los instrumentos cuentan con un espejo, sobre la escala a los efectos de que el observador no vea el reflejo de la aguja, según se indica en la figura 6.14.

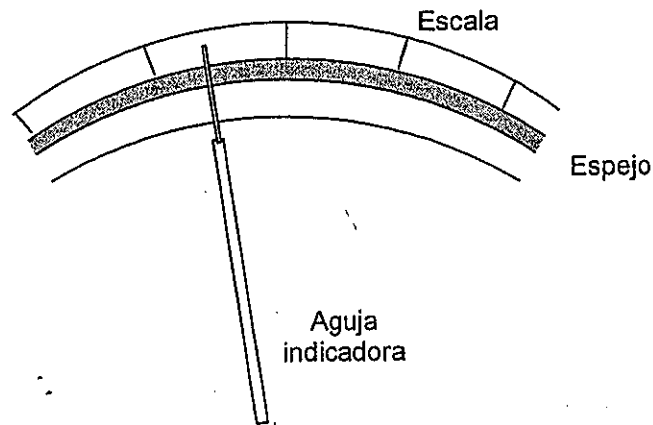


Figura 6.14 Escala con espejo para disminuir el efecto de paralaje.

Poder separador del ojo: El ojo humano no puede diferenciar dos puntos situados a una distancia tal que el ángulo sustentado por los mismos no supere un cierto valor que aproximadamente es de 2 minutos. El ojo para una distancia aproximada de 30 cm detecta una separación mínima de 0,1 mm.

Apreciación: Nace de la necesidad de interpolar la lectura cuando la aguja indicadora se detiene entre dos divisiones.

Estos errores que no se pueden acotar, se tienen en cuenta como si su valor fuera de 0,2 a 0,25 de la menor división de la escala del instrumento.

6.3.2 Error de clase

Es el error que tiene el instrumento que no es acotable y por lo tanto corregible. Para acotarlo se define como clase del instrumento y está dado por:

$$\beta\% = \frac{\text{Máximo error absoluto por calibración}}{\text{Máxima cantidad medible a fondo de escala}} \cdot 100$$

Es importante tener en cuenta que la clase de un instrumento, nos indica cual es el error absoluto máximo, el cual se mantiene en cualquier lugar de la escala. Lo que cambia es el error relativo, el cual aumenta a medida que la aguja se detiene en las primeras partes de la escala.

Tomemos un ejemplo:

Sea un voltímetro cuyo alcance máximo es de 100 V y tiene una clase igual a 1.

El error absoluto que se repite para cualquier indicación es:

$$e_a = 0,01 \cdot 100 = 1 \text{ V}$$

Esto nos indica que si la lectura es a fondo de escala (100 V) el error relativo que estamos cometiendo es del 1%, en cambio si la lectura fuera de 10 V, el error relativo para esa medición es del 10%.

Esto trae aparejado que en lo posible se utilicen instrumentos que nos permita efectuar lecturas en el último tercio de la escala del mismo.

6.4 Simbología para identificar los instrumentos

Por lo general los instrumentos traen sobre su frente una serie de símbolos que nos permite identificarlos y cuales son los límites de su uso:



Instrumento a bobina móvil e imán permanente



Instrumento de hierro móvil



Instrumento electrodinámico



Instrumento para ser usado en posición vertical



Instrumento para ser usado en posición horizontal



Tensión de ensayo de la caja del instrumento en KV(en este caso 2 KV)



Instrumento apto para corriente alterna



Instrumento apto para corriente continua



El número indica la clase del instrumento

PÉRDIDAS Y CALENTAMIENTO EN MÁQUINAS ELÉCTRICAS

7.1 Introducción

En todo proceso de transformación de la energía, se produce una diferencia entre la potencia que entrega el equipo para su utilización (Potencia útil), y la potencia que absorbe (Potencia absorbida). Esta diferencia se conoce con el nombre de "pérdidas". El flujo de energía se muestra en la figura 7.1.

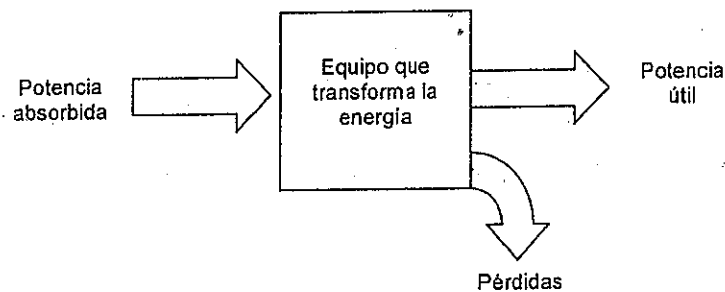


Figura 7.1 Flujo de energía

7.2 Pérdidas

Las mismas las podemos clasificar de acuerdo a su origen, de acuerdo al siguiente esquema:

Pérdidas eléctricas

Las máquinas eléctricas están formadas por circuitos eléctricos y o circuitos magnéticos. Los circuitos eléctricos se realizan mediante conductores de aluminio o cobre, los cuales presentan una resistencia eléctrica, la cual depende del material, su longitud y su sección de acuerdo a la siguiente expresión:

$$R = \rho \cdot L/S \quad [\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}]$$

Siendo: ρ : la resistividad cuyo valor a 20 °C es de 0,017 [$\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$] para el cobre y 0,0283 [$\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$] para el aluminio

L: la longitud del conductor [m]

S: la sección del conductor [mm^2]

La resistencia cuando los conductores están trenzados, es superior debido a que la longitud real de los hilos es mayor que la del cable.

El valor de la resistencia varía con la temperatura de acuerdo a la siguiente expresión:

$$R_t = R_{20} (1 + \alpha \Delta t)$$

Siendo: R_t : La resistencia a la temperatura de trabajo [Ω]

R_{20} : La resistencia a 20 °C [Ω]

α : Coeficiente de variación de la resistencia con la temperatura, cuyo valor es 0,004.

Δt : Diferencia de temperatura con respecto a 20 °C

Los valores analizados de resistencia corresponden a mediciones con corriente continua.

Si la medición se efectúa con corriente alterna, el valor es un poco superior, debido a lo que se conoce como efecto piel (Skin). La densidad de corriente se incrementa hacia la superficie del conductor, debido a que las líneas de inducción magnética en el interior del conductor, causan una fuerza electromotriz inducida, la cual hace circular una corriente que se opone a la causa que la origina.

Este aumento de la resistencia, depende de la frecuencia de trabajo, siendo su aumento despreciable para frecuencias industriales (50 Hertz), salvo en conductores de gran sección en las cuales dicho incremento puede ser importante. (Mayor de 500 mm^2).

Al circular corriente por los conductores que conforman los circuitos eléctricos de las máquinas, sobre la resistencia óhmica de los mismos se desarrolla potencia que se convierte en calor por efecto "Joule". Dado que estas potencias no se pueden aprovechar, se las considera como pérdidas que se denomina "pérdidas en el cobre" y cuyo valor se puede obtener como:

$$p_{Cu} = \sum R_i \cdot i_i^2$$

Tomando la sumatoria para tener en cuenta las pérdidas en todos los circuitos que compongan la máquina en cuestión.

Pérdidas mecánicas

Este tipo de pérdidas se produce en aquellas máquinas que tienen partes en movimiento, y se deben a:

Rozamientos en los cojinetes de apoyo del rotor

La parte en movimiento de las máquinas eléctricas reciben el nombre de rotor, y debido a la fricción entre el sistema en movimiento y la parte fija en el sistema de apoyo, se produce calor.

Rozamientos de las escobillas sobre el colector ó anillos

El pasaje de corriente desde una parte fija a una móvil en las máquinas eléctricas se obtiene a través de anillos rozantes ó escobillas sobre un colector, produciéndose calor debido a la fricción.

Rozamiento de las partes móviles

La fricción con el aire que rodea a las máquinas, de las partes que se encuentran en movimiento, produce también calor.

Potencia absorbida por el sistema de ventilación

Las máquinas cuentan con un sistema de paletas adosadas al eje a los efectos de extraer el calor de las mismas, la potencia que utilizan para impulsar el aire se la considera una pérdida.

El conjunto de pérdidas analizado es función de la velocidad de rotación, dependiendo en forma directa las 3 primeras y en forma cúbica las de ventilación, lo cual se puede expresar de la siguiente forma:

$$p_m = k_1 \omega + k_2 \omega^3$$

Pérdidas magnéticas

Estas pérdidas son las debidas a las corrientes parásitas o de Foucault, y las de histéresis, las cuales se analizaron en el estudio de circuitos magnéticos, y cuyos valores están dados por las siguientes expresiones:

$$p_F = K_F \cdot f^2 \cdot B_{\max}^2 \text{ [w/Kg]}$$

$$p_H = K_H \cdot f \cdot B_{\max}^2 \text{ [w/Kg]}$$

La suma de estas pérdidas se las llama pérdidas en el hierro o pérdidas en el núcleo, siendo las mismas proporcionales a la inducción máxima o también al flujo magnético máximo, para una máquina ya construida, ya que la frecuencia y las dimensiones geométricas están definidas.

Por lo tanto si la tensión y frecuencia de trabajo de la máquina en cuestión están determinadas, estas pérdidas son constantes, no dependiendo de la potencia que esté entregando la misma, ya que la relación entre la tensión aplicada a una máquina eléctrica y el flujo máximo está dado por la siguiente expresión:

$$U = 4,44 \cdot f \cdot N \cdot \Phi_{\max}$$

Donde:

- U : tensión aplicada [V]
- f : frecuencia de la red [Hz]
- N : número de espiras de la bobina que se alimenta
- Φ_{\max} : flujo magnético máximo [Wb]

El conjunto de pérdidas se obtiene de lo que se conoce como pérdidas específicas, las cuales se obtienen mediante un ensayo de un material magnético a una frecuencia de 50 Hz y con una inducción de 1 Tesla.

Las pérdidas con otro valor de inducción y frecuencia se pueden obtener en forma aproximada de la siguiente expresión:

$$p = p_0 \frac{f B_{\text{máx}}^2}{f_0 B_{0\text{máx}}^2}$$

Donde: p_0 : Pérdidas específicas a una frecuencia de 50 Hz y una inducción de 1 T [w/Kg]

f_0 : Frecuencia de 50 Hz

f : Frecuencia a la que se quieren determinar las pérdidas específicas

$B_{\text{máx}}^2$: Inducción a la que se quieren determinar las pérdidas específicas

$B_{0\text{máx}}^2$: Inducción de 1T

Pérdidas totales

El conjunto de las pérdidas analizadas son las pérdidas totales de las máquinas eléctricas, las cuales las podemos clasificar en pérdidas fijas ó constantes, las cuales no dependen de la potencia que esté entregando la máquina en cuestión y que son las pérdidas en el hierro y las mecánicas (ya que la velocidad de los equipos permanece prácticamente constante con el estado de carga de los mismos), y las pérdidas variables, como ser las pérdidas en el cobre, las cuales dependen de la carga que entregan en forma cuadrática con la misma.

$$P_{\text{totales}} = P_{\text{fijas}} + P_{\text{variables}} = (P_{\text{Fe}} + P_m) + P_{\text{Cu}}$$

Dado que las máquinas eléctricas trabajan con una tensión de alimentación fija (depende de la red de suministro eléctrico), la potencia que entregan las mismas es función de la corriente, o sea que:

$$S = 1,73 \cdot U \cdot I = k_1 \cdot I \quad [\text{VA}] \text{ Sistemas trifásicos}$$

$$S = U \cdot I = k_2 \cdot I \quad [\text{VA}] \text{ Sistemas monofásicos}$$

En la figura 7.2 se observa la gráfica en la que podemos ver la variación de las pérdidas en función de la "carga" o de la corriente.

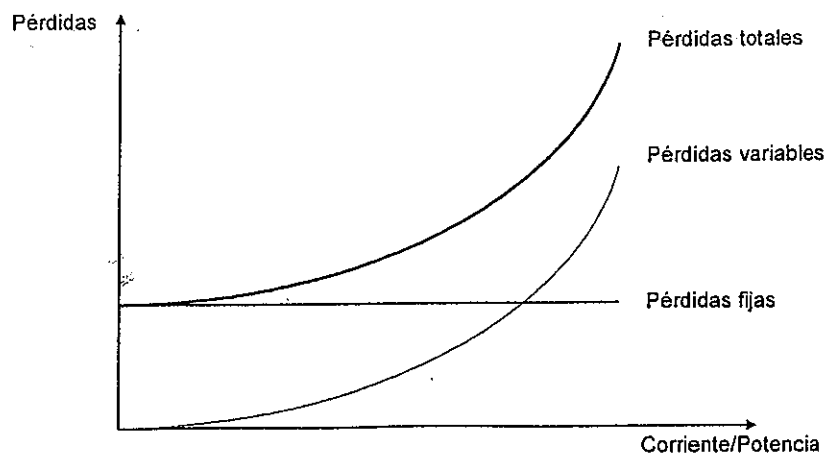


Figura 7.2 Variación de las pérdidas en función de la carga de la máquina

7.3 Rendimiento

Se define como rendimiento de un equipo a la relación entre la potencia (activa) que entrega (potencia útil) a la potencia (activa) que absorbe (potencia absorbida), que en forma porcentual está dada por la siguiente expresión:

$$\eta_{\%} = \frac{P_{\text{útil}}}{P_{\text{absorbida}}} 100$$

De aquí definiremos dos formas de indicar el rendimiento:

- Rendimiento medido: es aquel que se calcula por medio de la medición de la potencia activa entregada y la potencia activa absorbida, cuya expresión es la que vimos:

$$\eta_{\%} = \frac{P_{\text{entregada}}}{P_{\text{absorbida}}} 100$$

En este caso, si el rendimiento tiene un valor elevado, los errores cometidos por los instrumentos, pueden llegar a dar un resultado mayor a 100, si el error del instrumento que mide potencia entregada es en más y el que mide potencia absorbida es en menos

- Rendimiento calculado: es aquel cuyo cálculo se efectúa mediante la obtención de las pérdidas de la máquina y el mismo es más exacto, ya que el error cometido es en un solo sentido, siendo las expresiones utilizadas las siguientes:

$$\eta_{\%} = \frac{P_{\text{útil}}}{P_{\text{útil}} + \text{pérdidas}} 100$$

$$\eta_{\%} = \frac{P_{\text{absorbida}} - \text{pérdidas}}{P_{\text{absorbida}}} 100$$

Factor de carga

Se define el factor de carga de una máquina como la relación entre la potencia aparente que está entregando, a la potencia aparente nominal de la misma.

$$\text{Factor de carga} = f_c = \frac{S}{S_N} = \frac{U_N \cdot I}{U_N \cdot I_N} = \frac{I}{I_N}$$

Utilizando el factor de carga obtenemos:

$$S = S_N \cdot f_C$$

$$I = I_N \cdot f_C$$

$$P_N = S_N \cdot \cos \varphi$$

$$P = S_N \cdot f_C \cdot \cos \varphi$$

$$p_{CuN} = R \cdot I_N^2$$

$$p_{Cu} = R \cdot I^2$$

$$p_{Cu} = f_C^2 \cdot p_{CuN}$$

Luego el rendimiento nos queda expresado en función del factor de carga como:

$$\eta\% = \frac{S_N \cdot f_C \cdot \cos \varphi}{S_N \cdot f_C \cdot \cos \varphi + p_F + f_C^2 \cdot p_{CuN}} 100$$

La curva típica del rendimiento de una máquina en función de la carga o del factor de carga es la que se muestra en la figura 7.3

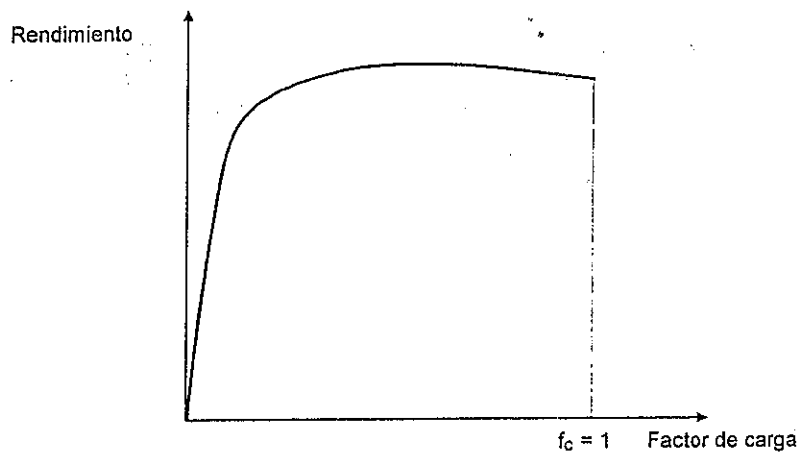


Figura 7.3 Curva del rendimiento de una máquina en función de la carga

Vemos que la curva crece, pasa por un valor máximo y luego decrece. El valor máximo se produce para un estado de carga que se puede obtener, derivando la expresión del rendimiento con respecto al factor de carga e igualando a cero.

Su valor se produce cuando las pérdidas fijas son iguales a las pérdidas variables, o sea:

$$p_F = f_C^2 \cdot p_{CuN} \quad \text{con lo cual el factor de carga está dado por:}$$

$$f_C = \sqrt{\frac{p_F}{p_{CuN}}}$$

TRANSFORMADORES

8.1 Introducción

El transformador es un dispositivo que permite modificar potencia eléctrica de corriente alterna con un determinado valor de tensión y corriente en otra potencia de casi el mismo valor pero, generalmente con distintos valores de tensión y corriente.

Es una máquina estática de bajas pérdidas y tiene un uso muy extendido en los sistemas eléctricos de transmisión y distribución de energía eléctrica.

Cuando se requiere transportar energía eléctrica, desde los centros de generación (Centrales eléctricas) a los centros de consumo, se eleva la tensión (desde unos 15 kV hasta 132, 220 o 500 kV) y se efectúa la transmisión mediante líneas aéreas o subterráneas con menor corriente, ya que la potencia en ambos lados del transformador es prácticamente igual, lo cual reduce las pérdidas de transmisión ($R I^2$).

En la etapa de distribución se reduce la tensión a los valores normales (380/220 V), mediante los transformadores adecuados.

8.2 Transformador monofásico

Básicamente está formado por un núcleo compuesto de láminas de hierro y dos bobinados, a los cuales denominaremos primario y secundario.

El bobinado primario con " N_1 " espiras es aquel por el cual ingresa la energía y el secundario con " N_2 " espiras es aquel por el cual se suministra dicha energía.

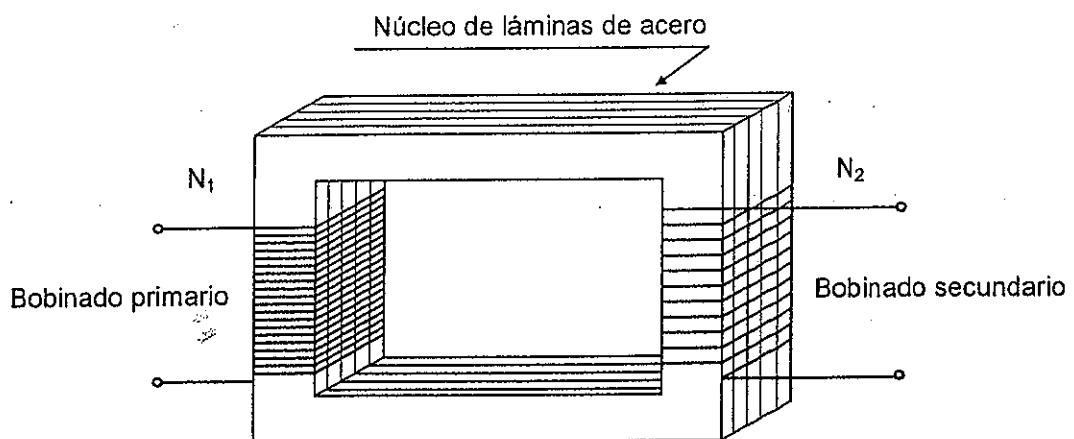


Figura 8.1 Esquema de un transformador monofásico del tipo de núcleo

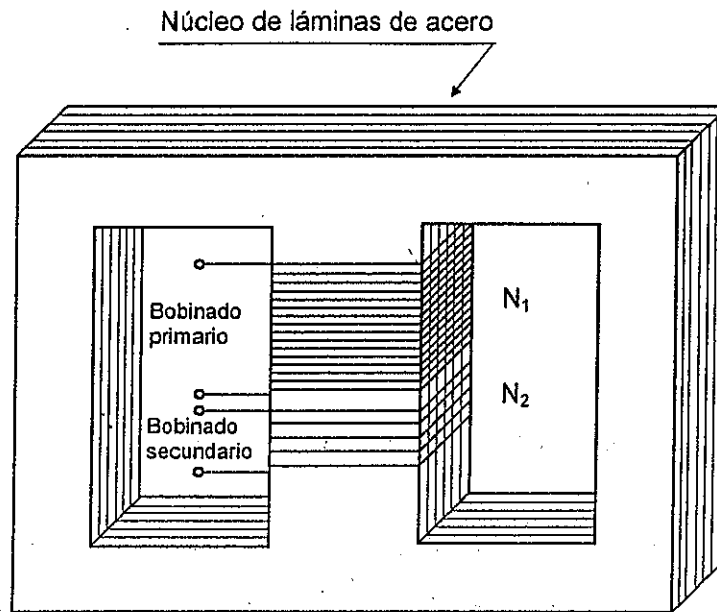


Figura 8.2 Esquema de un transformador monofásico del tipo acorazado

En la figura 8.1 podemos observar el esquema de un transformador, del tipo de núcleo y en la figura 8.2 un transformador del tipo acorazado, en el cual los dos bobinados se ubican en la rama central, logrando con este sistema reducir el flujo magnético disperso de ambos bobinados, colocando generalmente el bobinado de baja tensión en la parte interna y el de mayor tensión rodeando a este en la parte externa.

8.2.1 Transformador monofásico ideal

Para analizar un transformador, vamos a iniciar su estudio suponiendo que el mismo es ideal, por lo que debe presentar las siguientes características:

- Las bobinas primaria y secundaria no tienen resistencia óhmica.
- Todo el flujo magnético se encuentra en el núcleo de láminas de acero.
- El núcleo no tiene reluctancia.
- El núcleo no tiene pérdidas por corrientes parásitas ni por histéresis.

8.2.2 Transformador ideal en vacío

Si al transformador en estudio lo alimentamos desde su bobinado primario, por medio de una fuente de tensión alterna sinusoidal de la forma:

$$u_1 = U_{\text{máx.}} \text{ sen } \omega t$$

en el núcleo se originará un flujo magnético, en correspondencia con dicha tensión, de acuerdo a la siguiente expresión:

$$U_1 = 4,44 N_1 f \Phi_{\text{máx}}$$

Como en este análisis, en el secundario no se encuentra ninguna carga, por lo cual no habrá corriente y dado que la reluctancia del núcleo la consideramos de valor cero, por el bobinado primario no es necesario que circule corriente ó sea:

$$N_1 I_1 = \Phi \cdot \mathfrak{R} \quad \text{Fuerza magnetomotriz} = \text{Flujo} \times \text{reluctancia}$$

Este flujo magnético, también variable en el tiempo, dará lugar a que se induzcan fuerzas electromotrices en los bobinados, cuyos valores, serán de acuerdo a la ley de Faraday, a la polaridad asignada a dicha fuerzas electromotrices como positivas, y en función del sentido en que se realizan los bobinados las siguientes:

$$e_1 = N_1 \frac{d\Phi}{dt}$$

$$e_2 = N_2 \frac{d\Phi}{dt}$$

Estas fuerzas electromotrices deben tener un valor y una polaridad tal que se opongan a la causa que las originó. En la figura 8.3 Se pueden observar las convenciones utilizadas.

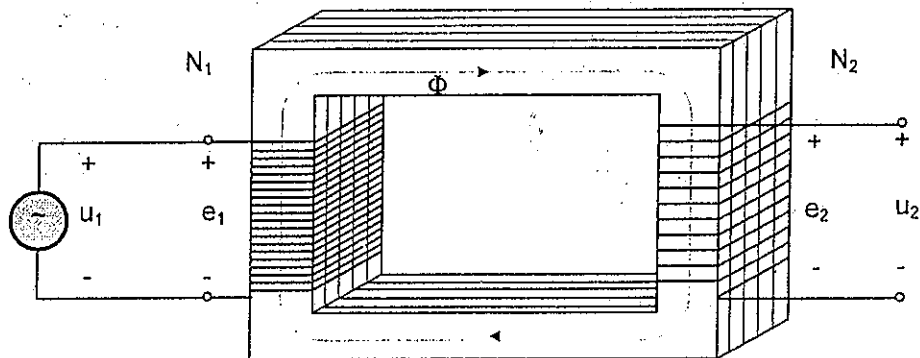


Figura 8.3 Esquema de polaridades adoptadas en un transformador monofásico

De acuerdo a la polaridad adoptada por "e1", si cortocircuitamos la misma, el sentido de la corriente que origina da lugar a un flujo magnético de sentido contrario al de la figura 8.2, tal como se observa en la figura 8.4.

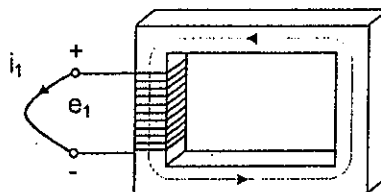


Figura 8.4 Flujo magnético originado por "e1"

En forma análoga, lo mismo sucede para la fuerza electromotriz inducida "e2", que se analiza en la figura 8.5.

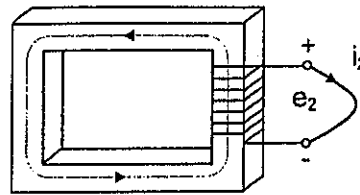


Figura 8.5 Flujo magnético originado por "e₂"

Dado que los bobinados los consideramos ideales, se cumple que:

$$u_1 = e_1 \qquad u_2 = e_2$$

lo cual es válido para los valores eficaces, o sea:

$$U_1 = E_1 \qquad U_2 = E_2$$

Si efectuamos la relación entre las fuerzas electromotrices inducidas se llega a lo siguiente:

$$\frac{u_1}{u_2} = \frac{e_1}{e_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = a$$

A estas relaciones la llamaremos **relación de transformación**, la cual puede adoptar los siguientes valores:

- $a > 1$: La tensión aplicada es superior a la tensión en el secundario, el tipo de transformador es reductor de tensión.
- $a < 1$: La tensión aplicada es inferior a la tensión en el secundario, el tipo de transformador es elevador de tensión.
- $a = 1$: Las dos tensiones son iguales, y se lo utiliza para aislar tensiones en sistemas de protección o medición.

8.2.3 Transformador ideal en carga

Si al transformador anterior le colocamos una carga en su secundario, aparecerá una corriente en el secundario y otra en el primario de acuerdo a la figura 8.6

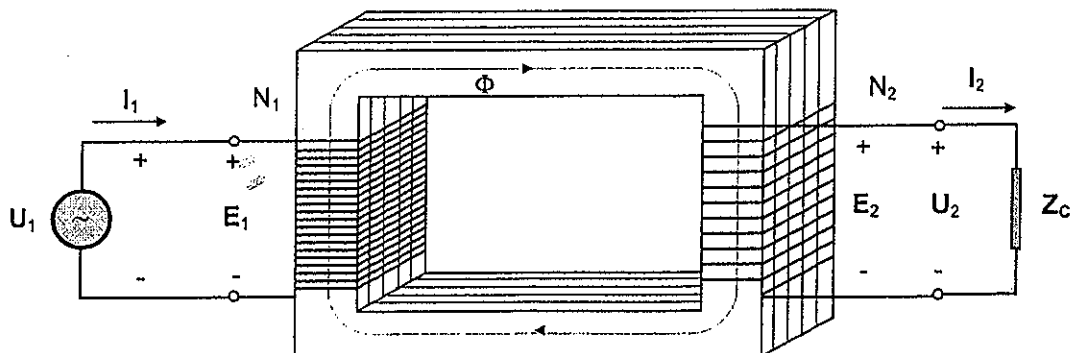


Figura 8.6 Esquema de un transformador monofásico con carga

Como analizamos un transformador ideal en el cual no hay pérdidas, la potencia que se consume en la carga, es la misma que suministra la fuente, por lo que se cumple:

$$P_1 = P_2 = U_1 I_1 \cos \varphi = U_2 I_2 \cos \varphi$$

$$S_1 = S_2 = U_1 I_1 = U_2 I_2 \quad \text{de la cual surge:}$$

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2} = a$$

Al mismo resultado podemos llegar, teniendo en cuenta las fuerzas magnetomotrices presentes en el circuito magnético.

Si recorremos el circuito magnético, en sentido horario, en el bobinado primario, tenemos una fuerza magnetomotriz cuyo valor es $N_1 I_1$ y en el bobinado secundario $N_2 I_2$ pero en sentido contrario, y dado que se considera el núcleo ideal se cumple:

$$N_1 I_1 - N_2 I_2 = 0 \quad \text{o sea que:}$$

$$N_1 I_1 = N_2 I_2 \quad \text{obtenemos:}$$

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2} = a$$

8.2.4 Impedancia reflejada

En la figura 8.6, la única impedancia es la de la carga, que se encuentra en el secundario. Si efectuamos el cociente entre la tensión primaria y la corriente primaria, obtenemos el valor de la impedancia que se "observa" desde el primario.

$$Z_{11} = \frac{U_1}{I_1} \quad \text{Ahora bien}$$

$$Z_C = \frac{U_2}{I_2}, \quad \text{Si reemplazamos a } U_1 = a \cdot U_2 \text{ e } I_1 = \frac{I_2}{a} \text{ nos queda :}$$

$$Z_{11} = \frac{a \cdot U_2}{\frac{I_2}{a}} = a^2 \frac{U_2}{I_2} = a^2 \cdot Z_C$$

O sea que la impedancia colocada en el secundario del transformador, vista desde el lado primario, aparece incrementado su valor por la relación de transformación al cuadrado.

Siguiendo el mismo criterio, una impedancia ubicada en el primario del transformador, se ve reflejada en el secundario dividiendo por su relación de transformación al cuadrado.

8.2.5 Transformador con bobinados reales y núcleo ideal

Analizando el transformador sin tener en cuenta las pérdidas en el núcleo y adoptando que su reluctancia sea nula, los bobinados presentan las siguientes características:

- Los mismos están contruidos con conductores que tienen resistencia óhmica, conforme a la sección necesaria, su longitud y al material utilizado (Cobre ó aluminio).
- Una pequeña parte del flujo que se origina en las bobinas, se cierra a través del aire y no en el núcleo magnético, según podemos visualizar en la figura 8. 7.

Ambos efectos producen una diferencia entre la tensión aplicada U_1 y la fuerza electromotriz inducida E_1 .

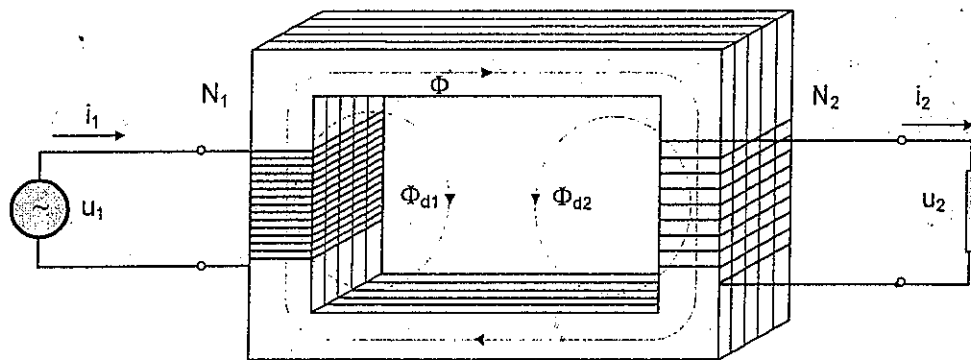


Figura 8.7 Esquema de un transformador monofásico con flujo de dispersión en sus bobinados

En la bobina del primario, el flujo en la misma es la suma del flujo magnético común del núcleo, más el de dispersión:

$$\Phi_1 = \Phi + \Phi_{d1}$$

En el bobinado secundario, es la diferencia:

$$\Phi_2 = \Phi - \Phi_{d2}$$

Por lo tanto, la tensión aplicada en el primario es igual a la caída de tensión en la resistencia del conductor mas la fuerza electromotriz inducida por el flujo variable:

$$u_1 = R_1 \cdot i_1 + N_1 \cdot \frac{d(\Phi + \Phi_{d1})}{dt} = R_1 \cdot i_1 + N_1 \frac{d\Phi}{dt} + N_1 \frac{d\Phi_{d1}}{dt} \quad (1)$$

Siendo: $N_1 \frac{d\Phi}{dt} = e_1$ la tensión inducida por el flujo magnético mutuo en la bobina del primario

y: $N_1 \frac{d\Phi_{d1}}{dt} = e_{d1}$ la tensión inducida por el flujo magnético disperso en la bobina del primario, a cual la podemos escribir de la siguiente forma :

$$N_1 \frac{d\Phi_{d1}}{dt} = N_1 \cdot L_1 \frac{di_1}{dt}$$

Siendo: L_1 es la inductancia de dispersión de la bobina primaria

En forma compleja: $E_{d1} = j \omega L_1 I_1 = j X_1 I_1$, y de la misma manera la ecuación (1) nos queda:

$$U_1 = R_1 I_1 + j X_1 I_1 + E_1$$

En forma análoga en el secundario:

$$N_2 \frac{d(\Phi - \Phi_{d2})}{dt} = R_2 \cdot i_2 + u_2$$

$$N_2 \frac{d\Phi}{dt} - N_2 \frac{d\Phi_{d2}}{dt} = R_2 \cdot i_2 + u_2$$

$$e_2 = N_2 \frac{d\Phi}{dt} \qquad e_{d2} = N_2 \frac{d\Phi_{d2}}{dt} = N_2 \cdot L_2 \frac{di_2}{dt}$$

Con lo cual nos queda en forma compleja:

$$E_2 = R_2 I_2 + j X_2 I_2 + U_2$$

8.2.6 Transformador con núcleo real

Aún cuando el circuito secundario este abierto, se requiere una corriente en el primario para producir el flujo magnético en el núcleo.

Esta corriente tiene dos componentes a saber:

- La corriente de magnetización, necesaria para producir el flujo en el núcleo (I_m). Como hemos visto el valor del flujo magnético depende de la tensión aplicada (despreciando las caídas de tensión en la resistencia del bobinado primario y de los efectos del flujo disperso), luego la relación entre el flujo magnético y la corriente de magnetización, está dada a través de la curva de imanación del material (la cual no es lineal, ya que la misma presenta saturación), por lo tanto, la corriente que se obtiene no es senoidal, conteniendo armónicas especialmente de tercer orden. La componente fundamental de esta corriente atrasa 90° a la tensión aplicada, ya que el flujo que origina dicha tensión atrasa 90° a la misma ($e = N d\Phi/dt$).

- La corriente de pérdidas en el núcleo, requerida por la potencia de pérdidas por histéresis y por corrientes parásitas (I_p). Esta corriente también es deformada, debido al lazo de histéresis, estando su fundamental en fase con la tensión aplicada.

La suma de ambas corrientes, es la corriente de vacío o de excitación:

$$I_{10} = I_p + I_m \quad \text{siendo esta la corriente que circula en el bobinado primario con el secundario en vacío.}$$

Si ahora sumamos las fuerzas magnetomotrices involucradas en el circuito magnético nos queda:

$$N_1 I_{10} = \Phi \mathcal{R} \quad (I_2 = 0)$$

En forma análoga, si se coloca una carga en el secundario, se originan en ambos bobinados corrientes, con lo cual la suma de fuerzas magnetomotrices será:

$$N_1 I_1 - N_2 I_2 = \Phi \mathcal{R} = N_1 I_{10} \quad (\text{El flujo se mantiene constante ya que } U_1 \text{ es constante).}$$

$$N_1 I_1 = N_2 I_2 + N_1 I_{10} \quad \text{dividiendo por } N_1$$

$$I_1 = \frac{N_2}{N_1} I_2 + I_{10}$$

$$I_1 = \frac{I_2}{a} + I_{10}$$

$$I_1 = I_{21} + I_{10}$$

Llamando a $I_{21} = I_2/a$ la corriente I_2 del secundario reflejada en el primario

8.2.7 Circuito equivalente del transformador real

En el apartado anterior vimos que con el transformador en vacío, por el bobinado primario circulaba una corriente, que descomponíamos en una I_p que estaba en fase con la tensión (en este caso la fuerza electromotriz E_1) que representa las pérdidas en el núcleo. Como estas pérdidas, para una frecuencia fija como se utiliza en las redes de suministro eléctrico, son función del flujo magnético elevado al cuadrado ($k \Phi_{\text{máx}}^2$), y siendo el mismo proporcional a la fuerza electromotriz inducida E_1 , podemos colocar en un circuito equivalente una resistencia que llamaremos R_p , que represente las mencionadas pérdidas, y que debe cumplir:

$$\text{Pérdidas en el hierro} = \frac{E_1^2}{R_c}$$

La otra componente I_m , está atrasada en 90° a E_1 y debe ser proporcional al flujo magnético o sea a esta fuerza electromotriz, lo cual nos lleva a representarla por una reactancia inductiva X_m tal que cumpla:

$$I_m = \frac{E_1}{jX_m}$$

Hemos analizado las partes reales de los bobinados, y reemplazamos las mismas por resistencias y reactancias concentradas que representan a los mismos, de forma tal que teniendo en cuenta lo hasta aquí analizado podemos reemplazar el transformador real por uno ideal con el agregado por separado de sus partes reales, de acuerdo a lo que muestra en la figura 8.8.

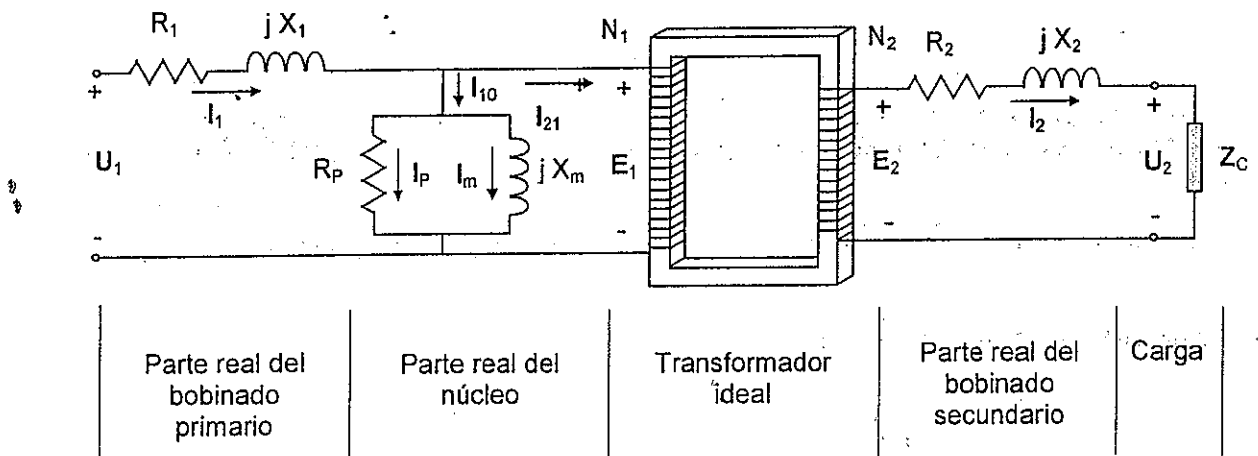


Figura 8.8 Esquema de un transformador monofásico con separación de sus partes reales

Del esquema de la figura 8.8, recorriendo el circuito primario y secundario obtenemos:

$$U_1 = E_1 + R_1 I_1 + j X_1 I_1$$

$$E_2 = U_2 + R_2 I_2 + j X_2 I_2$$

De las relaciones obtenidas para el transformador ideal, en el cual se cumple que

$$E_1 = a E_2 \quad \text{y} \quad I_{21} = I_2/a \quad \implies \quad a I_{21} = I_2 \quad \text{reemplazando obtenemos:}$$

$$a E_2 = a U_2 + a R_2 I_2 + j a X_2 I_2$$

$$U_1 = a E_2 + R_1 I_1 + j X_1 I_1$$

$$U_1 = a U_2 + a R_2 I_2 + j a X_2 I_2 + R_1 I_1 + j X_1 I_1$$

$$U_1 = a U_2 + a^2 R_2 I_{21} + j a^2 X_2 I_{21} + R_1 I_1 + j X_1 I_1$$

Esta ecuación involucra el bobinado primario y secundario, con lo cual incluyendo la rama en paralelo que contempla el núcleo, podemos dibujar un circuito eléctrico equivalente, que responde a la misma.

Debemos acotar que este circuito es una simplificación aproximada, ya que estamos contemplando ecuaciones del transformador ideal para su cálculo, pero facilita el estudio sin cometer grandes errores. La figura 8.9 muestra el circuito en cuestión.

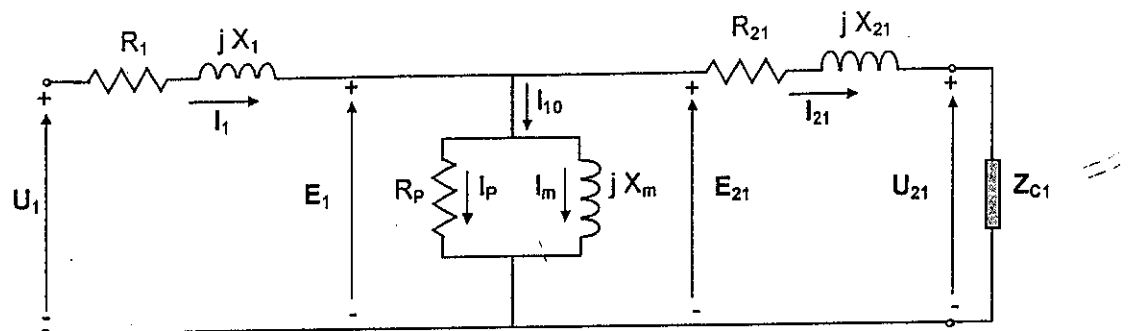


Figura 8.9 Circuito equivalente de un transformador referido al primario

Donde llamaremos:

- U_1 la tensión del primario
- E_1 la fuerza electromotriz inducida en el bobinado primario
- $U_{21} = a U_2$ representa la tensión secundaria referida a primario
- $E_{21} = a E_2$ la fuerza electromotriz inducida en el bobinado secundario referida al primario
- I_1 la corriente del primario
- I_{10} la corriente del primario en vacío del transformador
- I_p la componente de pérdidas
- I_m la componente de magnetización
- $I_{21} = I_2/a$ la corriente del secundario referida al primario
- R_1 la resistencia del bobinado primario
- X_1 la reactancia de dispersión del bobinado primario
- $R_{21} = a^2 R_2$ la resistencia secundaria referida al primario
- $X_{21} = a^2 X_2$ la reactancia de dispersión del secundario referida al primario
- $Z_{c1} = a^2 Z_c$ la impedancia de carga del secundario referida al primario

El diagrama fasorial correspondiente a este circuito es el de la figura 8.10

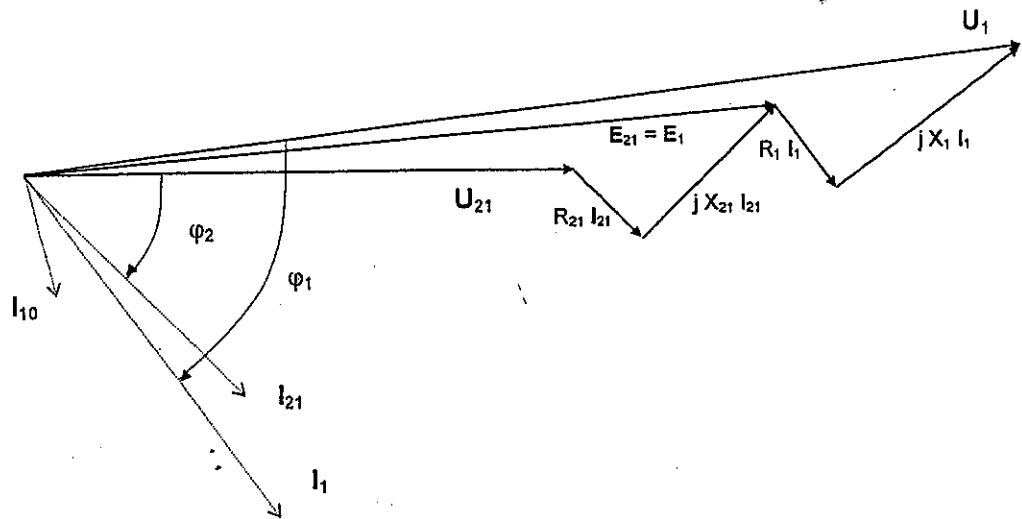


Figura 8.10 Diagrama fasorial de un transformador referido al primario

Se debe mencionar que las caídas de tensión en las resistencias y reactancias de dispersión están dibujadas con un valor muy grande a los efectos de poder visualizarlas en el dibujo, ya que las mismas son muy pequeñas con respecto a las tensiones U_{21} y U_1 .

En forma análoga el circuito, puede referirse al secundario con lo cual el circuito nos queda como se muestra en la figura 8.11

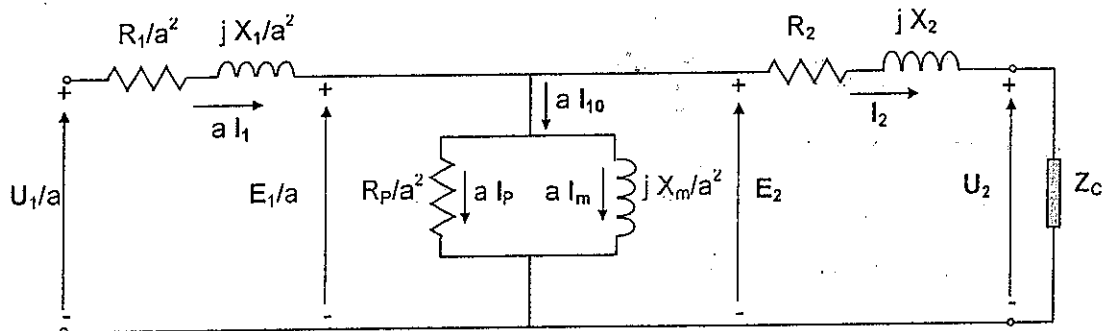


Figura 8.11 Circuito equivalente de un transformador referido al secundario

En forma semejante llamaremos:

- $U_{12} = U_1/a$ la tensión del primario referida al secundario
- $E_{12} = E_1/a$ la fuerza electromotriz inducida en el bobinado primario referida al secundario
- U_2 representa la tensión secundaria
- E_2 la fuerza electromotriz inducida en el bobinado secundario referida al primario
- $I_{12} = a I_1$ la corriente del primario referida al secundario
- $I_{102} = a I_{10}$ la corriente del primario en vacío del transformador referida al secundario
- $I_{p2} = a I_p$ la componente de pérdidas referida al secundario
- $I_{m2} = a I_m$ la componente de magnetización referida al secundario

I_2	la corriente del secundario
$R_{12} = R_1/a^2$	la resistencia del bobinado primario referida al secundario
$X_{12} = X_1/a^2$	la reactancia de dispersión del bobinado primario referida al secundario
R_2	la resistencia secundaria
X_2	la reactancia de dispersión del secundario
Z_c	la impedancia de carga del secundario

8.2.8 Circuito equivalente aproximado

Los valores de la resistencia del bobinado primario, y la reactancia de dispersión son valores pequeños comparados con los de la rama de excitación que representan al núcleo, por lo tanto, para poder simplificar los cálculos del circuito se coloca la rama en paralelo adelante, lo cual no trae aparejado un mayor error. O sea que el circuito nos queda como en la figura 8.12.

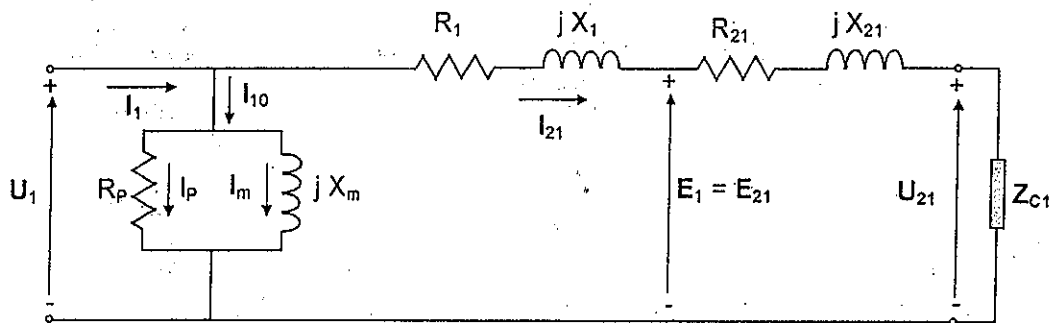


Figura 8.12 Circuito equivalente aproximado de un transformador

Cuyo diagrama fasorial es el de la figura 8.12.

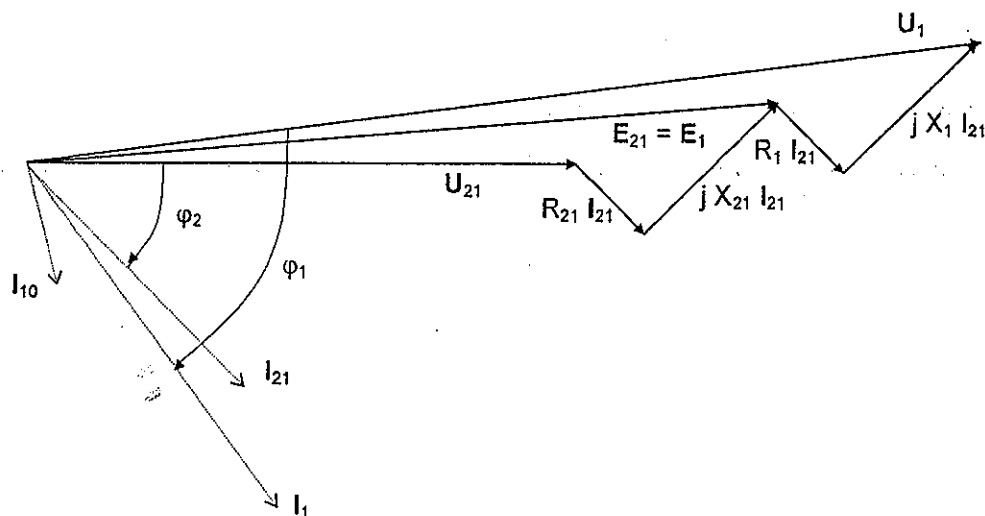


Figura 8.13 Diagrama fasorial de un transformador de acuerdo al circuito equivalente aproximado

8.2.9 Circuito equivalente reducido

Para ciertos tipos de cálculo, como ser el cálculo de caídas de tensión, no se tiene en cuenta la rama de excitación; con lo cual el circuito nos queda según se observa en la figura 8.14. y su diagrama fasorial el de la figura 8.15.

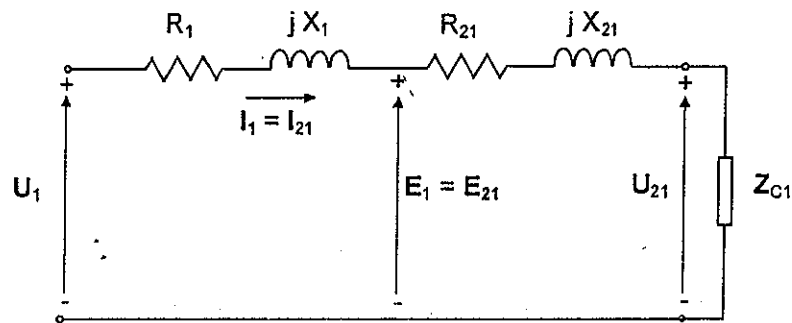


Figura 8.14 Circuito equivalente reducido de un transformador

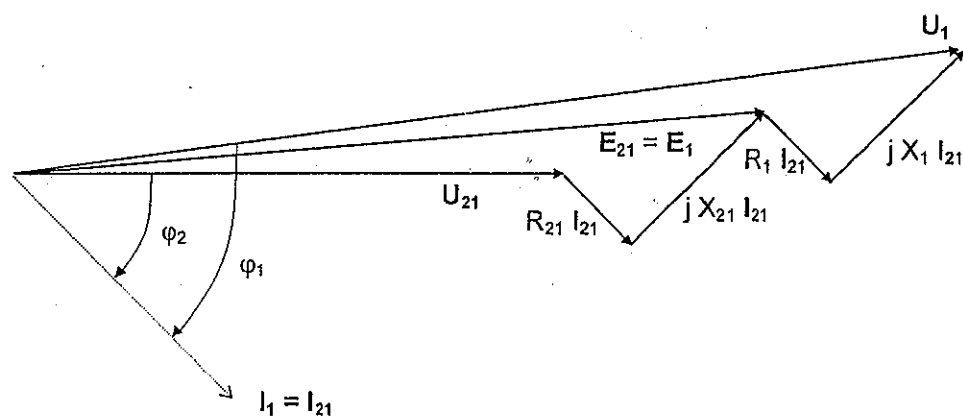


Figura 8.15 Diagrama fasorial de un transformador de acuerdo al circuito equivalente reducido

8.2.9 Regulación

Debido a la caída de tensión en las resistencias de los bobinados y en las reactancias de dispersión, la tensión del secundario del transformador, varía con la carga del mismo, aunque la tensión del primario se mantenga constante. Esta variación de la tensión es proporcional a la corriente que circula, debiendo ser lo más pequeña posible.

Su valor está dado por la diferencia entre la tensión secundaria en vacío en que $U_{210} = U_1$ y la tensión secundaria con carga y con un determinado factor de potencia de la misma. O sea:

$$\Delta U = U_{210} - U_{21} = U_1 - U_{21}$$

Definimos como regulación a la variación porcentual de la tensión, la cual se expresa por:

$$r_{\%} = \frac{U_{20} - U_2}{U_2} \cdot 10$$

Si trabajamos con valores del primario:

$$r_{\%} = \frac{U_{210} - U_{21}}{U_{21}} 100$$

En las figuras 8.16 y 8.17 se observan los valores en caso de vacío y carga del transformador de acuerdo a sus circuitos equivalentes reducidos y en los cuales se han agrupado las resistencias y reactancias de dispersión:

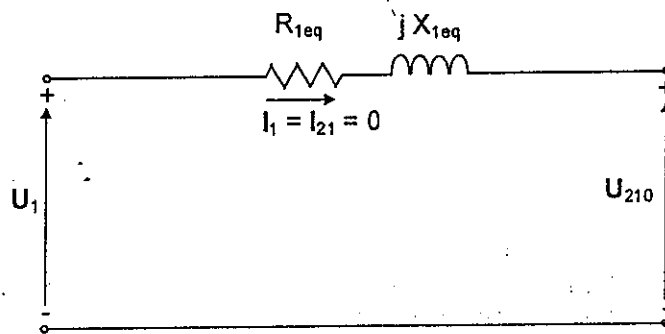


Figura 8.16 Circuito equivalente reducido de un transformador en vacío

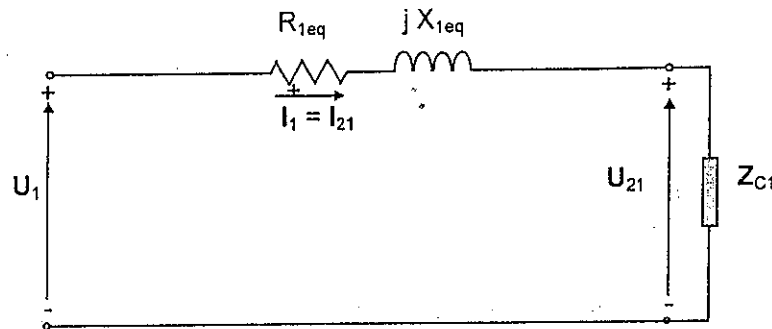


Figura 8.17 Circuito equivalente reducido de un transformador en carga

La tensión en el primario es:

$$U_1 = U_{21} + R_{1eq} I_1 + j X_{1eq} I_1$$

Siendo el diagrama fasorial el de la figura 8.18:

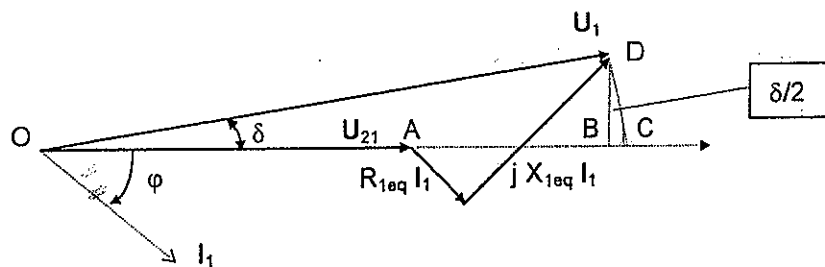


Figura 8.18 Diagrama fasorial de un transformador con carga de acuerdo al circuito equivalente reducido

$$OD = OC = U_1$$

La caída de tensión será:

$$\Delta U = AB + BC$$

$$AB = R_{1eq} I_1 \cos \varphi + X_{1eq} I_1 \sin \varphi$$

El triángulo ODC es isósceles, ya que $OD = OC = U_1$ por lo tanto:

$$DC = 2 U_1 \sin \delta/2$$

$$BC = DC \sin \delta/2$$

$$BC = 2 U_1 \sin^2 \delta/2 \quad \text{Luego:}$$

$$\Delta U = I_1 (R_{1eq} \cos \varphi + X_{1eq} \sin \varphi) + 2 U_1 \sin^2 \delta/2$$

Dado que el ángulo entre la tensión de alimentación y la tensión sobre la carga es pequeño, en la práctica se desprecia el segundo término, o sea:

$$2 U_1 \sin^2 \delta/2 \cong 0 \quad \text{con lo cual nos queda la siguiente expresión:}$$

$$\Delta U = I_1 (R_{1eq} \cos \varphi + X_{1eq} \sin \varphi)$$

Si graficamos la variación de la tensión en el secundario del transformador en función de la carga del mismo, vemos que a medida que el factor de potencia de la carga se hace más inductivo la regulación empeora (Mayor caída de tensión). En cambio si el factor de potencia fuera capacitivo, podría incluso mejorar la tensión secundaria, tal como se muestra en la figura 8.19.

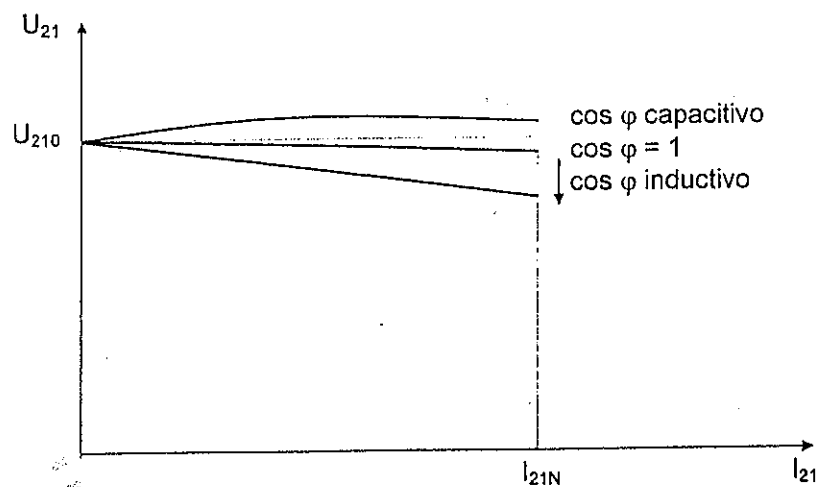


Figura 8.19 Variación de la tensión con la carga

Debemos tener en cuenta que las cargas presentan características inductivas, el caso de características capacitivas se presenta en aquellos casos en que un transformador de media o alta tensión tenga poca carga y los cables alimentadores sean subterráneos y presenten efectos capacitivos.

8.2.11 Rendimiento

En un transformador, tenemos dos tipos de pérdidas, las del hierro o fijas y las del cobre variables con la carga (corriente). De acuerdo a ellas el rendimiento en función del factor de carga está dado por la siguiente expresión:

$$\eta_{\%} = \frac{S_N \cdot f_C \cdot \cos \varphi}{S_N \cdot f_C \cdot \cos \varphi + p_{Fe} + f_C^2 \cdot p_{CuN}} \cdot 100$$

Las curvas típicas de rendimiento en función de la carga o del factor de carga son las que se muestran en la figura 8.20.

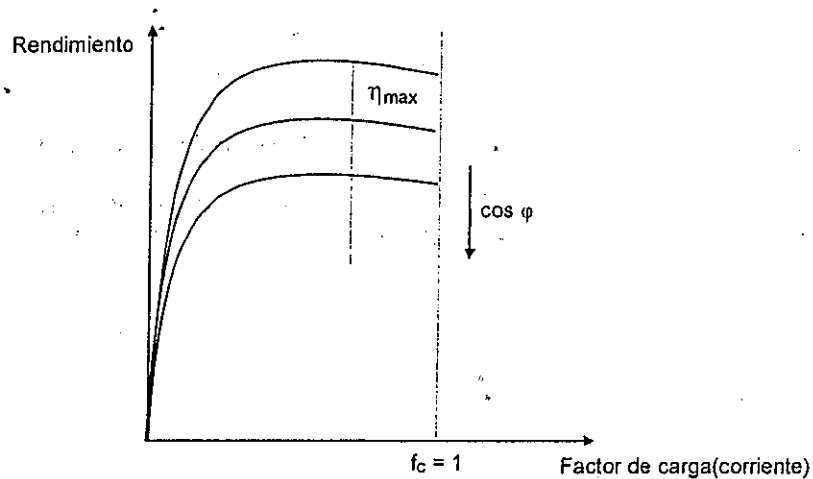


Figura 8.20 Curva del rendimiento de una máquina en función de la carga

Vemos que la curva crece, pasa por un valor máximo y luego decrece. El valor máximo se produce para un estado de carga que se puede obtener, derivando la expresión del rendimiento con respecto al factor de carga e igualando a cero.

Su valor se produce cuando las pérdidas fijas (en el hierro) son iguales a las pérdidas variables (en el cobre), o sea:

$$p_{Fe} = f_C^2 \cdot p_{CuN} \quad \text{con lo cual el factor de carga está dado por:}$$

$$f_{C\eta\text{máx}} = \sqrt{\frac{p_{Fe}}{p_{CuN}}}$$

8.2.12 Determinación de los parámetros del circuito equivalente

Para poder determinar los parámetros del circuito equivalente se efectúan los siguientes ensayos:

Ensayo en vacío

El mismo consiste en alimentar el primario del transformador, con la tensión nominal y dejando el secundario a circuito abierto, en esta situación el flujo magnético en el núcleo es el nominal y por lo tanto las pérdidas en el mismo son las nominales.

Además al circular la corriente por el primario, en el mismo vamos a tener pérdidas en el cobre, aunque estas se pueden despreciar frente a las del hierro, debido a que la corriente de vacío es del orden del 5 % de la corriente nominal (o de plena carga), y como las pérdidas en el cobre son proporcionales al cuadrado de la corriente, en este caso, siendo la corriente 20 veces más chica, las pérdidas en el cobre serán 400 veces menores que las nominales.

En esta situación el circuito equivalente en este ensayo se reduce a la rama de excitación, como lo muestra la figura 8.21.

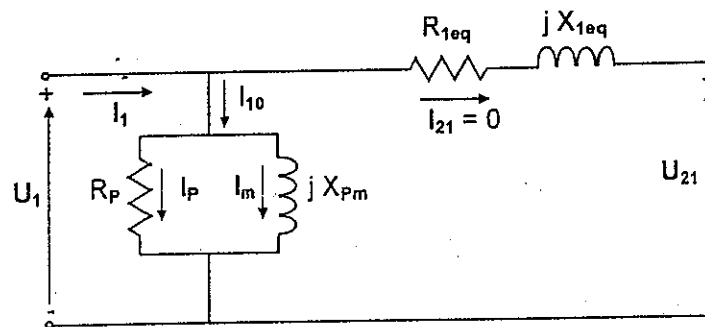


Figura 8.21 Circuito equivalente en vacío de un transformador

El circuito de ensayo es el de la figura 8.22.

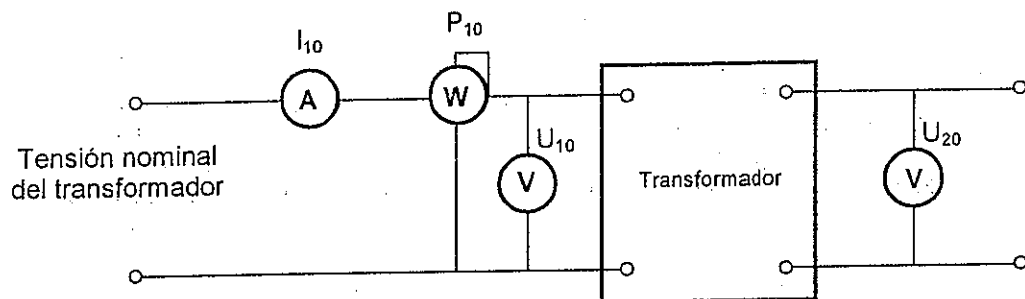


Figura 8.22 Circuito de ensayo en vacío

La indicación del vatímetro corresponde a las pérdidas en el hierro del núcleo, que en el circuito equivalente están representadas por la resistencia R_p , por lo cual se cumple:

$$P_{Fe} = P_{10} = \frac{U_{10}^2}{R_p} \Rightarrow R_p = \frac{U_{10}^2}{P_{10}}$$

$$S_{10} = U_{10} I_{10} \quad \text{Potencia aparente}$$

$$Q_{10} = \sqrt{S_{10}^2 - P_{10}^2} \quad \text{Potencia reactiva}$$

$$Q_{10} = \frac{U_{10}^2}{X_m} \Rightarrow X_m = \frac{U_{10}^2}{Q_{10}}$$

$$\cos \varphi = \frac{P_{10}}{U_{10} \cdot I_{10}}$$

$$I_p = I_{10} \cos \varphi$$

$$I_m = I_{10} \operatorname{sen} \varphi$$

$$a = \frac{U_{10}}{U_{20}}$$

El diagrama fasorial de este ensayo es el de la figura 8.23

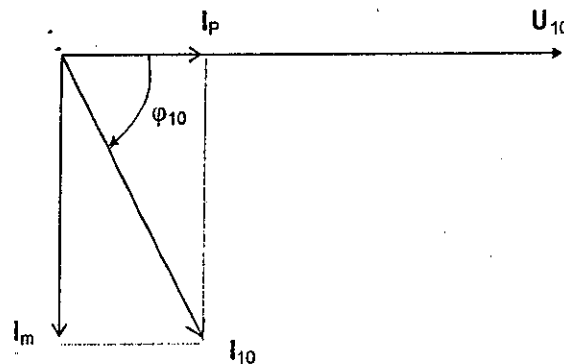


Figura 8.23 Diagrama fasorial del transformador en vacío

Este ensayo se puede realizar alimentando el transformador tanto del primario, como del secundario, con las tensiones nominales correspondientes al lado en cuestión, ya que en ambos casos el flujo que se tiene en el núcleo es el mismo, con lo cual el valor de las pérdidas en el hierro es el mismo, salvo que los parámetros del circuito equivalente que se obtienen, estarán referidos al lado del cual se efectuó el ensayo.

El flujo magnético en el núcleo está determinado por la tensión de alimentación o sea:

$$\Phi(\text{alimentando desde el primario}) = \frac{U_1}{4,44 \cdot f \cdot N_1}$$

$$\Phi(\text{alimentando desde el secundario}) = \frac{U_2}{4,44 \cdot f \cdot N_2}$$

Relacionando:

$$\frac{\Phi(\text{alimentando desde el primario})}{\Phi(\text{alimentando desde el secundario})} = \frac{\frac{U_1}{4,44 \cdot f \cdot N_1}}{\frac{U_2}{4,44 \cdot f \cdot N_2}}$$

$$\frac{\Phi(\text{alimentando desde el primario})}{\Phi(\text{alimentando desde el secundario})} = \frac{U_1}{U_2 \frac{N_1}{N_2}} = \frac{U_1}{U_2 \cdot a} = \frac{U_1}{U_1} = 1$$

Ensayo en cortocircuito

Consiste en cortocircuitar el secundario del transformador y alimentar el primario mediante una tensión reducida, cuyo valor es tal que la corriente que circule sea la nominal del transformador.

Debido a que el valor de la tensión que se debe aplicar es del orden del 5 % de la tensión nominal, en la rama de excitación tendremos una corriente, que será unas veinte veces menor que la corriente de vacío con la tensión nominal.

Como a su vez la corriente de vacío a plena tensión es del orden del 5% de la corriente nominal, la corriente en este ensayo será de aproximadamente 400 veces más pequeña que la nominal, con lo cual podemos despreciar la misma y retirar del circuito equivalente la rama en paralelo. Por lo tanto el circuito nos queda según se muestra en la figura 8.24.

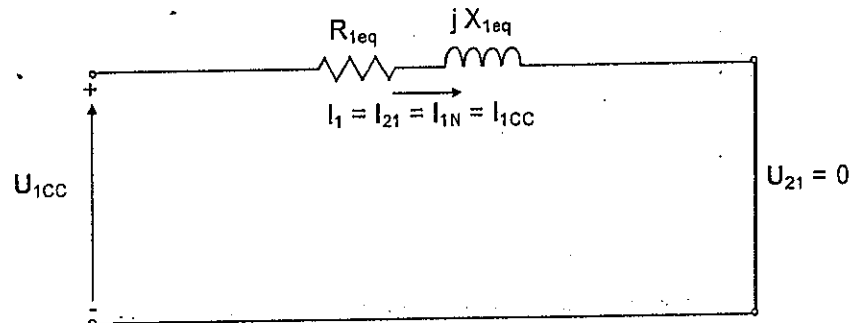


Figura 8.24 Circuito equivalente en cortocircuito de un transformador.

El circuito de ensayo es el de la figura 8.25.

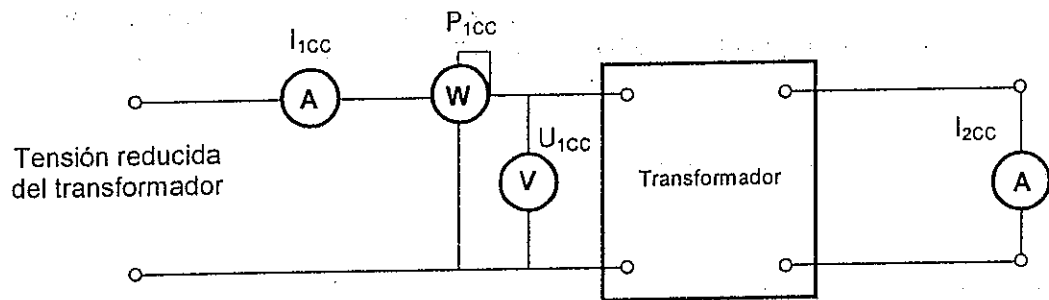


Figura 8.25 Circuito de ensayo en cortocircuito

En este ensayo se determinan las pérdidas en el cobre del transformador ya que de acuerdo al circuito equivalente, el elemento que consume potencia activa es la resistencia equivalente de los bobinados.

Ya que la corriente que se hace circular es la nominal, las pérdidas obtenidas son las nominales y se cumple:

$$P_{CuN} = R_{1eq} I_{1N}^2$$

$$P_{1CC} = R_{1eq} \cdot I_{1CC}^2$$

$$R_{1eq} = \frac{P_{1CC}}{I_{1CC}^2}$$

$$Z_{1eq} = \frac{U_{1CC}}{I_{1CC}} \quad \text{luego:} \quad X_{1eq} = \sqrt{Z_{1eq}^2 - R_{1eq}^2}$$

Se puede adoptar aproximadamente que: $R_1 = R_{21} = R_{1eq}/2$ y $X_1 = X_{21} = X_{1eq}/2$

El diagrama fasorial para este estado es el de la figura 8.26.

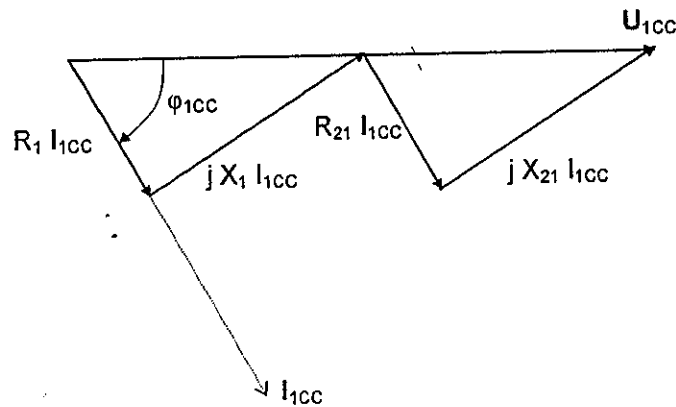


Figura 8.26 Diagrama fasorial del transformador en cortocircuito

8.2.13 Transformadores en paralelo

Cuando el suministro de potencia se incrementa y el transformador utilizado no tiene la suficiente, se lo debe cambiar por uno mayor o bien colocar otro en "paralelo".

Sea una red de suministro eléctrico con una tensión U_1 , que alimenta el primario de los transformadores, y otra red que alimentará una serie de cargas con una tensión U_2 , según se indica en el esquema de la figura 8.27.

En la situación de la figura los dos transformadores (A y B) están conectados en paralelo pero no suministran potencia a carga alguna. Por lo tanto si hacemos un recorrido cerrado como el indicado, la suma de las tensiones debe ser igual a cero.

Se pueden dar dos situaciones de acuerdo a la polaridad instantánea que tengamos en los secundarios de los transformadores.

De acuerdo a la polaridad indicada en la figura 8.27, al efectuar el recorrido indicado se cumple:

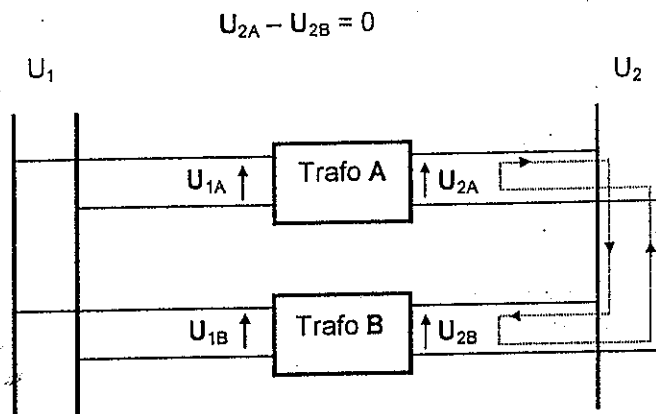


Figura 8.27 Paralelo de transformadores "conexión correcta"

En el caso de tener la polaridad como se indica en la figura 8.28 la suma de las tensiones es distinta de cero, por lo cual se ha realizado un cortocircuito en el secundario de los transformadores, lo cual dará lugar a que se puedan dañar.