

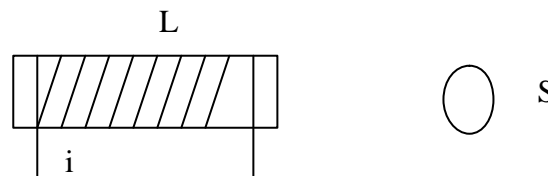
VISUALIZACIÓN DEL CICLO DE HISTÉRESIS DETERMINACIÓN DE PERDIDAS POR HISTÉRESIS

GENERALIDADES:

Cualquier elemento eléctrico construido con núcleo magnético estará influido en su balance energético por las pérdidas en el hierro. Estas son debidas a la histéresis magnética y a las corrientes de Foucault. Se puede determinar una cifra de pérdidas o pérdidas específicas para cada tipo de material magnético, es decir, la potencia activa gastada en generar dichas pérdidas por kilogramo de material. Como ambas pérdidas dependen de la frecuencia y de la inducción, habrá que decir a que valores de estos parámetros se ha ensayado la chapa para dar los vatios por kilogramo (W / Kg) de material que tiene de pérdidas. Este ensayo se realiza con el aparato de Epstein, con este método se pueden hallar no solo los (W / Kg) de pérdidas a una inducción y frecuencia determinada, sino las pérdidas por histéresis y por Foucault por separado.

En esta práctica se utiliza el osciloscopio para visualizar el ciclo de histéresis y determinar las pérdidas por histéresis del material a ensayar.

En máquinas eléctricas tales como transformadores y motores, se presentan piezas de material magnético ubicadas en campos magnéticos de sentido variable, es decir, la excitación magnética H aumenta desde cero hasta su valor máximo en un sentido, luego se anula y aumenta hasta el mismo valor máxima pero en sentido contrario, repitiéndose hasta que la maquina se detenga. La densidad de flujo B en el interior del hierro también cambia de sentido pero describiendo una curva cerrada en el plano B - H denominada **Ciclo de Histéresis**. Consideremos una bobina de longitud L y sección transversal S posee un arrollamiento de N espiras y circula por el mismo la corriente i . El núcleo de la bobina es de material ferromagnético.



El valor de la excitación magnética esta dado por $H = \frac{N \cdot i}{L}$

Supongamos que en un tiempo dt la corriente que circula por la bobina se incrementa de i a $(i+di)$, esto origina el incremento dH de la excitación magnética, incremento dB de la densidad de flujo y un incremento $d\Phi = A \cdot dB$ del flujo.

Debido al incremento del flujo se origina en la bobina una fuerza electromotriz inducida, cuyo valor es:

$$e = -N \frac{d\Phi}{dt}$$

$$p = e \cdot i$$

$$dw = P \cdot dt$$

$$W = \int dW$$

$$W = S \cdot L \int H \cdot dB$$

Este desarrollo vincula: potencia, energía instantánea y la energía total suministrada en un ciclo. El símbolo \oint (integral cerrada) significa que la integral se realiza en el plano B-H a lo largo del ciclo de histéresis. La integral corresponde al área del ciclo y SL es el volumen de la bobina.

Entonces las pérdidas por histéresis serán la energía perdida en un ciclo por el número de veces que este se repite en un segundo, es decir por frecuencia, ya que la potencia perdida es igual a la energía perdida un segundo.

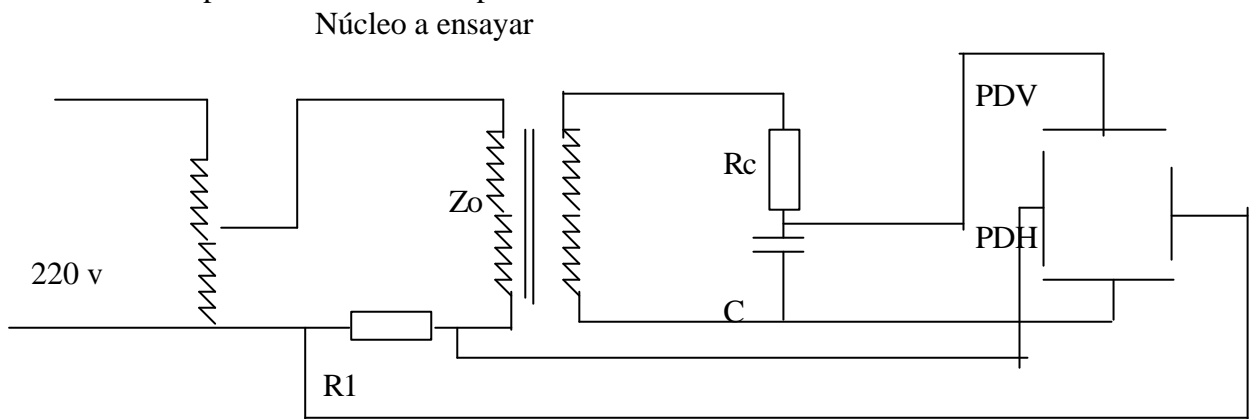
Como vemos las pérdidas por histéresis son proporcionales al área de ciclo, por ejemplo, el núcleo de un transformador, es deseable que el ciclo de histéresis del material sea estrecho, a fin de reducir estas pérdidas.

Con el método del osciloscopio solo se puede hallar las pérdidas *por histéresis*, y no es suficiente dato para definir la calidad de una chapa magnética. Por ello siempre necesitaremos recurrir a un ensayo más completo como el del aparato de Epstein.

Debido a que el osciloscopio es de naturaleza voltimétrica, se toman tensiones proporcionales a B y a H en una muestra del material a ensayar y con ellas se excitan ambos canales, de esta manera obtenemos en la pantalla el ciclo de histéresis que sirve de base para determinar las pérdidas.

Resolución del ciclo de histéresis :

Vamos a analizar en detalle el circuito eléctrico de la figura. Que deberemos armar para obtener en la pantalla del osciloscopio el ciclo:



Obtención de la excitación magnética H

El transformador trabaja en vacío puesto que la carga del secundario consume muy poca corriente. Por ello diremos que la corriente que circula por el primario es la corriente de vacío y la denominaremos I_0 .

Tomado una tensión que sea proporcional a I_0 con el objeto de poder aplicarla al osciloscopio conservando lo más fielmente posible la forma de onda. Con esto vamos a obtener en la pantalla la magnitud excitación H puesto que I_0 es proporcional a ella. Para lograrlo colocamos en el circuito del primario del transformador una resistencia R_1 que proporcionara una caída de tensión U_1 con la que alimentaremos el canal horizontal del osciloscopio. El valor de R_1 lo elegimos teniendo en cuenta que la autoinductancia del bobinado primario debe manejar o imponer la forma de onda de corriente. Como sabemos la bobina por tener un núcleo magnético no es un elemento lineal, por tanto no cumple estrictamente la ley de Ohm. Es decir que el valor de impedancia que presenta una bobina con núcleo de hierro depende de la tensión aplicada a sus bornes. Si fuera con núcleo de aire la autoinducción es constante

cualquiera sea el valor de tensión. En este caso a incrementos iguales de tensión corresponden incrementos proporcionales de corriente, no ocurre así cuando la bobina es con núcleo de hierro.

Si la resistencia R_1 es muy pequeña (10) la forma de onda en el osciloscopio es fiel a la onda de corriente I_0 del primario. pero para poder verla debemos aumentar mucho la ganancia horizontal del instrumento es decir que pierde sensibilidad. Si la resistencia R_1 es muy grande tenemos buena sensibilidad pero la forma de onda no es fiel a I_0 y sería senoidal puesto que R_1 maneja el valor de I_0 y no la autoinductancia.

La forma de onda de I_0 es alterna no senoidal dependiendo su deformación del estado de excitación del núcleo.

Como solución se tomará un valor de compromiso para R_1 , basándose en una relación empírica aproximada:

$$\frac{Z_B}{R} = 20$$

El Valor de Z_B , es decir, impedancia del bobinado primario lo podremos medir para la tensión nominal del transformador.

Vamos a definir la sensibilidad horizontal S_H y vertical S_V del osciloscopio:

$$S_H = \frac{U_H}{X} \left[\frac{\text{Volt}}{\text{mm}} \right] \quad (1)$$

$$S_V = \frac{U_V}{Y} \left[\frac{\text{Volt}}{\text{mm}} \right] \quad (2)$$

Recordemos que en general por definición la sensibilidad es:

$$S = \frac{\text{Consecuencia}}{\text{Causa}} \left[\frac{\text{mm}}{\text{Volt}} \right] \quad S = \frac{\text{Causa}}{\text{Consecuencia}} \left[\frac{\text{Volt}}{\text{mm}} \right]$$

En rigor la definición (A) es la correcta pero se suele utilizar por error impuesto por la costumbre la expresión (B).

$$U_H = S_H \cdot x \quad (3)$$

U_H : tensión aplicada a las placas horizontales.

S_H : sensibilidad horizontal.

x : elongación horizontal

$$U_V = S_V \cdot y \quad (4)$$

U_V : tensión aplicada a las placas verticales

S_V : sensibilidad vertical

y : elongación vertical

$$U_H = U_1 \quad (5)$$

Pues es la entrada al canal horizontal proporcionada por R_1 . Resistencia que es un transductor pues toma una corriente y entrega una tensión de referencia.

$$U_H = I_0 \cdot R_1 \quad (7)$$

Pero I_0 esta vinculado con la excitación H

$$H = \frac{N_1 I_0}{L} \quad (7)$$

$$I_0 = \frac{H \cdot L}{N_1} \quad (8)$$

donde

N_1 : número de espiras del primario
 L : longitud del circuito magnético
 Vinculando las expresiones 3,6,y8

$$U_H = I_0 \cdot R_1 = \frac{H \cdot L}{N_1} R_1 = S_H \cdot x$$

$$H = \frac{S_H \cdot N_1}{L \cdot R_1} \cdot x \left[\frac{A \cdot v}{m} \right]$$

$$H = K_H \cdot x$$

Se debe relevar el ciclo de histéresis por puntos para hallar los valores de H.

Obtención de la inducción magnética B

Deseamos obtener en el eje de ordenadas la magnitud de la inducción B. Debemos encontrar elementos eléctricos que nos den señales representativas de este parámetro magnético. Vamos a tomar, un circuito RC alimentado por el secundaria del transformador a ensayar :

$U_c = U_v$

por definición $i = \frac{dQ}{dt} \left[\frac{\text{Coul}}{s} \right] \Rightarrow Q = \int i \cdot dt$ (10)

en el capacitor la capacidad esta dada por $C_2 = \frac{Q}{U_c} \Rightarrow U_c = \frac{Q}{C_2}$ (11)

Vinculando las expresiones 10 y 11

$$U_c = \frac{1}{C_2} \int i_2 dt = U_v \quad (12)$$

La corriente es:

$$I_2 = \frac{E_2}{R_2 - j \frac{1}{\omega C_2}} \quad (13) \quad \text{Siendo E la fem inducida en el secundario del transformador.}$$

Si $R_2 \gg \frac{1}{\omega C_2}$ lo que implica que la corriente es controlada por R_2 . Se puede despreciar X_2

$$i_2 = \frac{E_2}{R_2}$$

Con esto la tensión en el secundario estará en fase con la corriente y reemplazando en 12

$$U_v = \frac{1}{R_2 C_2} \int e_2 dt \quad (14)$$

Considerando que:

$$B = \frac{f}{S_N} \quad (15)$$

$$e_2 = -N_2 \frac{df}{dt} \Rightarrow f = \frac{1}{N_2} \int e_2 \cdot dt$$

Reemplazando:

$$B = -\frac{1}{N_2 \cdot S_N} \int e_2 dt \quad (16)$$

$$\int e_2 \cdot dt = -B N_2 S_N$$

$$\int e_2 \cdot dt = U_V R_2 C_2$$

de (16)
$$B = -\frac{U_V R_2 C_2}{N_2 S_N}$$

$$B = -\frac{S_V R_2 C_2}{N_2 S_N} \cdot y \left[\frac{Wb}{m^2} \right] = -K_y \cdot y$$

La última expresión sale de reemplazar por la expresión (4)

El conjunto $R_2 C_2$ es un circuito integrador, puesto que el valor de R_2 no es cualquiera sino un valor elevado respecto de la reactancia capacitiva para que la tensión del capacitor resulte ser la integral de la fem secundaria como lo demuestra en la expresión (14). Esta integral de la fem a su vez es proporcional a la inducción, del circuito magnético como se observa en la expresión (16) y esto, nos permite vincular un parámetro eléctrico, como la tensión del capacitor, a un parámetro magnético como es la inducción. Es decir que tomando tensión a bornes del capacitor y aplicandola a las placas verticales tendremos la representación de la inducción.

El valor de R_2 se determina empíricamente utilizando la siguiente relación:

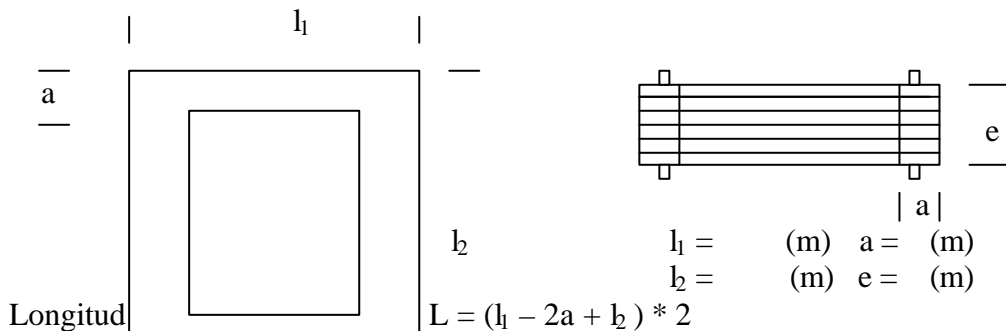
$$R_2 \gg |X_c|$$

$$R_{2\min} \cong 10 |X_c|$$

$$R_{2\max} \cong 20 |X_{cc}|$$

Desarrollo:

Magnitudes características del núcleo:



Sección del núcleo $S_N = a * e * f_a \text{ (m}^2\text{)}$

f_a : factor de apilado = 0,9

Características del bobinado: $N_1 = 750 \text{ n}^\circ$ de espiras primarias $N_2 = 1350 \text{ n}^\circ$ de espiras secundarias

$U_n = 165 \text{ V}$

Valores para los que se fijó el ciclo:

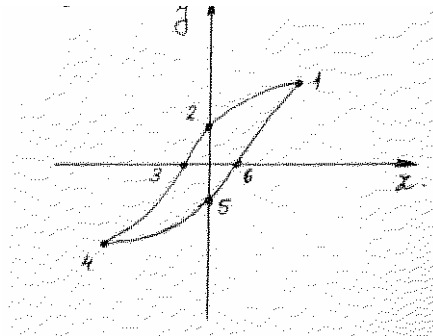
R_1 R_2 C_2 i_1 U_1 S_x S_y

Relevamiento del ciclo:

Puntos	X	Y

Area del Ciclo: 10.4 (m₂)

Graficar el ciclo



Valores a determinar:

a- Constantes

$$K_H = \frac{S_H \cdot N_1}{L \cdot R_1} \cdot 10^3 \left[\frac{A \cdot v}{m^2} \right]$$

$$K_V = \frac{S_V \cdot R_2 \cdot C_2}{N_2 \cdot S_n} \cdot 10^3 \left[\frac{Wb}{m} \right]$$

b- Excitación máxima y eficaz

$$H_{\max} = K_X \cdot X_{\max} \left[\frac{Av}{m} \right]$$

$$H_{ef} = \frac{H_{\max}}{\sqrt{2}}$$

c- Inducción máxima y eficaz

$$B_{\max} = K_y \cdot Y_{\max} \left[\frac{Wb}{m^2} \right]$$

$$B_{ef} = \frac{B_{\max}}{\sqrt{2}}$$

d- Trabajo realizado en un ciclo:

$$\text{Esc. Sup. del ciclo} = \text{Esc. H} \cdot \text{Esc. B} \left[\frac{A \cdot v}{m^2} \cdot \frac{Wb}{m^2} = \frac{\text{Joule}}{m^2} \right]$$

$$T_c = \text{esc.sup} \cdot \text{areaciclo} \left[\frac{\text{Joule}}{\text{m}^5} \cdot \text{m}^2 = \frac{\text{Joule}}{\text{m}^3} \right]$$

e- Trabajo realizado por segundo en el núcleo

$$T_s = T_c * \text{vol.nucleo} * \text{frec} \left[\frac{\text{Joule}}{\text{m}^3} \cdot \text{m}^3 \cdot \frac{1}{\text{s}} = \text{W} \right]$$

f- Pérdidas específicas por histéresis

$$P_{\text{esp}} = \frac{T_s}{P} \left[\frac{\text{W}}{\text{Kg}} \right]$$

Frecuencia de ensayo: