

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL

FACULTAD REGIONAL MENDOZA

DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA

CÁTEDRA DE TECNOLOGÍA ELECTRÓNICA

INDUCTORES CON NÚCLEO DE HIERRO

PROFESOR TITULAR:

ING. ADOLFO F. GONZÁLEZ

PROFESOR ADJUNTO:

ING. RICARDO M. CESARI

AYUDANTE TRABAJOS PRÁCTICOS:

ING. RUBÉN O. VICIOLI

2009

ÍNDICE

GENERALIDADES _____	3
INDUCTORES CON LAMINACIONES DE HIERRO _____	3
CÁLCULO DE LA CORRIENTE MAGNETIZANTE EN CIRCUITOS MAGNÉTICOS SIN ENTREHIERROS ARTIFICIAL _____	5
INDUCTORES CON NÚCLEO DE HIERRO CON "ENTREHIERRO ARTIFICIAL" _____	6
Verificación del diseño de un inductor con núcleo de hierro y entrehierro _____	9
INDUCTORES CON CORRIENTE CONTINUA Y ALTERNA SUPERPUESTA _____	12
Consideraciones generales _____	12
MÉTODOS DE DISEÑO ÓPTIMO DE INDUCTORES CON NÚCLEO DE HIERRO; PARA C.C. y C.A. SUPERPUESTOS. _____	13
Método de Hanna _____	13
Curvas M _____	16
BIBLIOGRAFÍA _____	20

GENERALIDADES

Cuando se supone que el flujo magnético en el núcleo varía senoidalmente, lo cual corresponde con bastante aproximación a la casi totalidad de las aplicaciones prácticas, la relación entre el flujo y la tensión inducida es la bien conocida ecuación 1:

$$E_{ef} = 4,44 \cdot f \cdot N \cdot \Phi \quad (E: \text{volts}; \Phi = \text{Weber}) \quad \text{Ec. 1}$$

Si Φ se expresa en Maxwell:

$$E = 4,44 \cdot f \cdot N \cdot \Phi \cdot 10^{-8} \text{ Volts} \quad \text{Ec. 1b}$$

El valor del flujo determinado de (Ec. 1b) es independiente de las dimensiones y calidad del núcleo, (mientras la resistencia del bobinado sea tal, que la caída de tensión que sobre ella se desarrolle, sea despreciable frente al valor de la tensión aplicada).

Las dimensiones y calidad del núcleo intervienen, eso sí, en la determinación del valor de la corriente de excitación requerida para mantener el flujo magnético necesario. Si se supone el flujo senoidal, la corriente de excitación, en general no es senoidal, pero en la técnica se trata como si lo fuese. Las armónicas de la corriente de excitación no contribuyen para nada en la potencia absorbida por el inductor, pero ellas aumentan el valor eficaz de dicha corriente. Por esta razón la aproximación de suponerla senoidal, está ampliamente justificada con excepción de algunos problemas específicos.

De esta manera, la corriente de excitación tiene dos componentes: I_m (corriente magnetizante), en fase con el flujo y en cuadratura con la tensión aplicada; I_p (corriente de pérdidas) en fase con dicha tensión (ver Fig.1).

El diagrama vectorial es el siguiente:

$$I_{\phi} = \sqrt{I_p^2 + I_m^2}; \quad \cos \theta = \frac{P_p}{E \cdot I_{\phi}} \quad \text{Ec. 2}$$

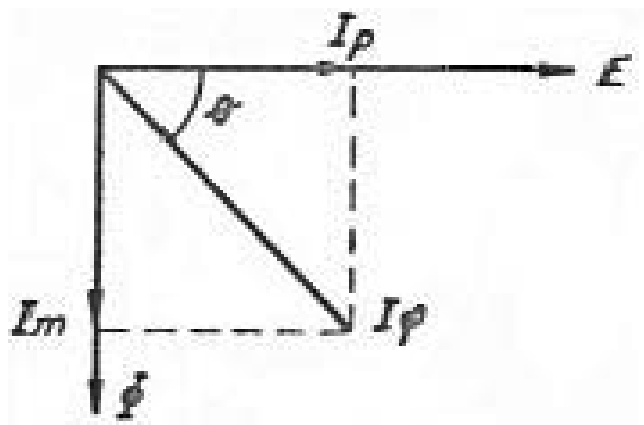


Figura 1.

INDUCTORES CON LAMINACIONES DE HIERRO

Generalmente se utilizan para inductores y transformadores, laminaciones normales según se indicó en el capítulo anterior, y que son del tipo rectangular, siendo las más comunes para telecomunicaciones las del tipo U - I y E - I-

Con estas laminaciones hay 2 tipos fundamentales de ensamblaje: a) junta al tope; b) apilado alternado.

a) Este tipo de apilado se usa fundamentalmente en inductores que requieren un entre hierro "la"; su disposición es la que se indica en la Fig.2a.

b) En este caso las laminaciones E e I se van colocando en forma alternativa, (Fig. 2 b) y se emplea cuando no se desea la existencia de entrehierro o cuando, dado que es imposible su eliminación total, reducirlo al mínimo.

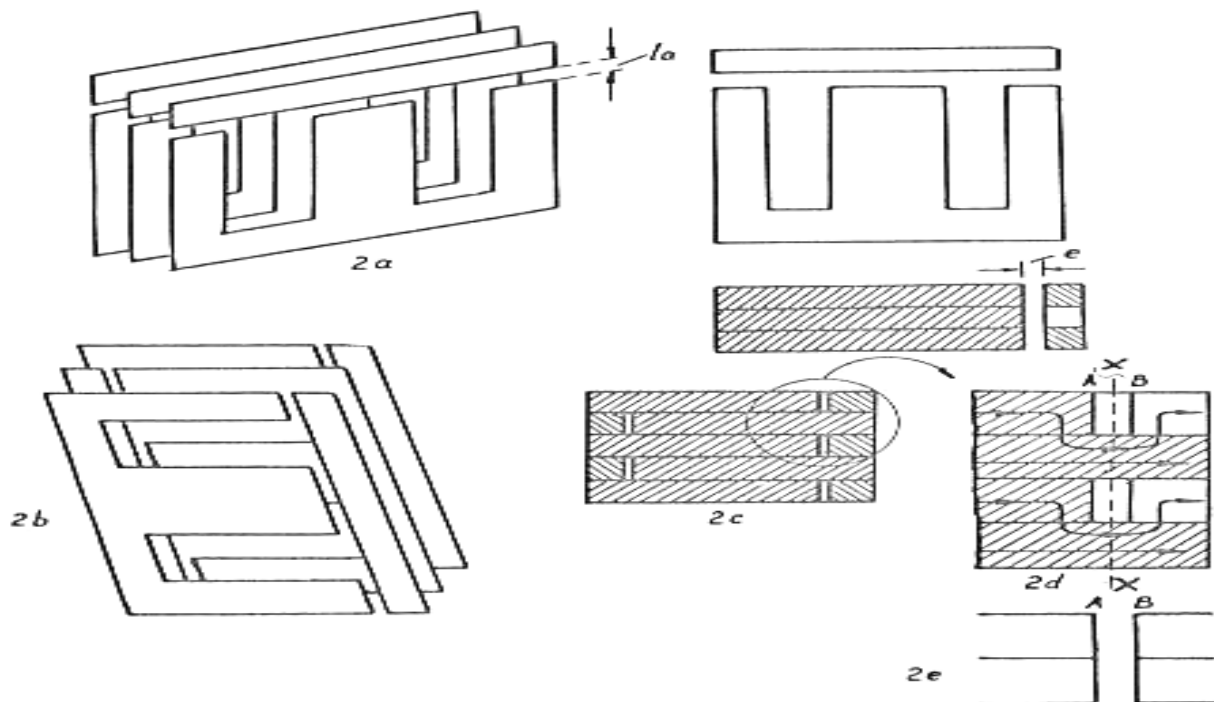


Figura 2.

Cuando las laminaciones E-I son apilados en forma de juntas alternadas como se ve en 2b Y 2C, en las juntas entre dichas laminaciones siempre se produce, por razones constructivas, un entrehierro imprevisible como se ve, por lo que en la sección X-X de Fig. 2d, el flujo total circula por una sección que es solamente la mitad de la sección total dado que sólo la mitad del número de laminaciones son presentes sobre esta pequeña longitud del circuito magnético.

Por lo tanto, cuando el flujo en el resto del circuito magnético alcanza la mitad del valor de saturación, el flujo en la zona A-B (Fig. 2d) provoca la saturación del hierro en esta región.

Cuando esto ocurre, la reluctancia entre A y B se hace comparable con la de un entrehierro completo (circuito magnético en aire) (Fig. 2e) por lo que las características magnéticas del circuito Fe-aire son las que se observan en la Fig. 3b. curva b).

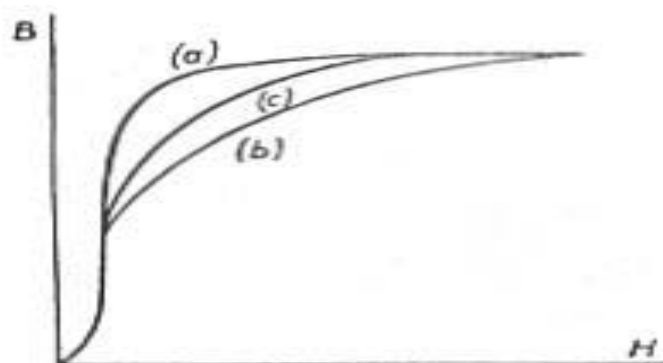


Figura 3.

Si dicho entrehierro se reduce presionando aún más las laminaciones, la pendiente de la característica se transformará en la curva (c) (Fig. 3).

En la práctica, por supuesto, nunca se podrá obtener la característica (a) Fig. 3, que es la curva de magnetización del Fe solamente y de sección uniforme.

Cabe aclarar que el caso que estamos considerando es el de emplear laminaciones con juntas alternadas con el objeto de eliminar al máximo el entrehierro indeseable, y obtener de este modo una inductancia dada en la forma más económica (peso mínimo).

Todo esto se aplica en el diseño de inductores de c.a. solamente, mientras que, como veremos más adelante, el planteo es completamente distinto para inductores sobre los que circula superpuesta a la alterna, una corriente continua.

Cabe hacer notar, como hecho fundamental en los circuitos magnéticos, que las ecuaciones la / b no sufren ninguna alteración si el circuito magnético contiene entrehierro, siempre que la resistencia omhica del bobinado sea despreciable. De lo que antecede se desprende que el flujo Φ o en otras palabras la inducción B no dependen del entrehierro: El único efecto del entrehierro es aumentar la corriente de magnetización que toma la bobina, y por ende variar su valor de L. La figura 4, tomada del libro "Transformer Engineering" de L.F. Blume, nos da la relación densidad de flujo a fuerza magnetomotriz (N 1) necesaria para forzar a dicha inducción a través de una junta de laminaciones apiladas en forma alternada. Otra forma de considerar el efecto del entrehierro "indeseable" consiste en considerar en el diseño su magnitud, según se indica a continuación y que depende del tipo de apilado de las chapas. Para laminaciones de 0,35 mm de espesor en los tamaños de núcleo corrientes el valor mencionado como promedio puede tomarse:

Laminaciones de 0,35 mm con
nucleado alternado

Entrehierro equivalente en(total)
con nucleado cuidadoso

Apilados de 1 en 1
" " 4 " 4
" " 8 " 8
" " 12 " 12
" directo justo al tope

0,0125mm
0,025mm
0,05mm
0,075mm
0,125mm

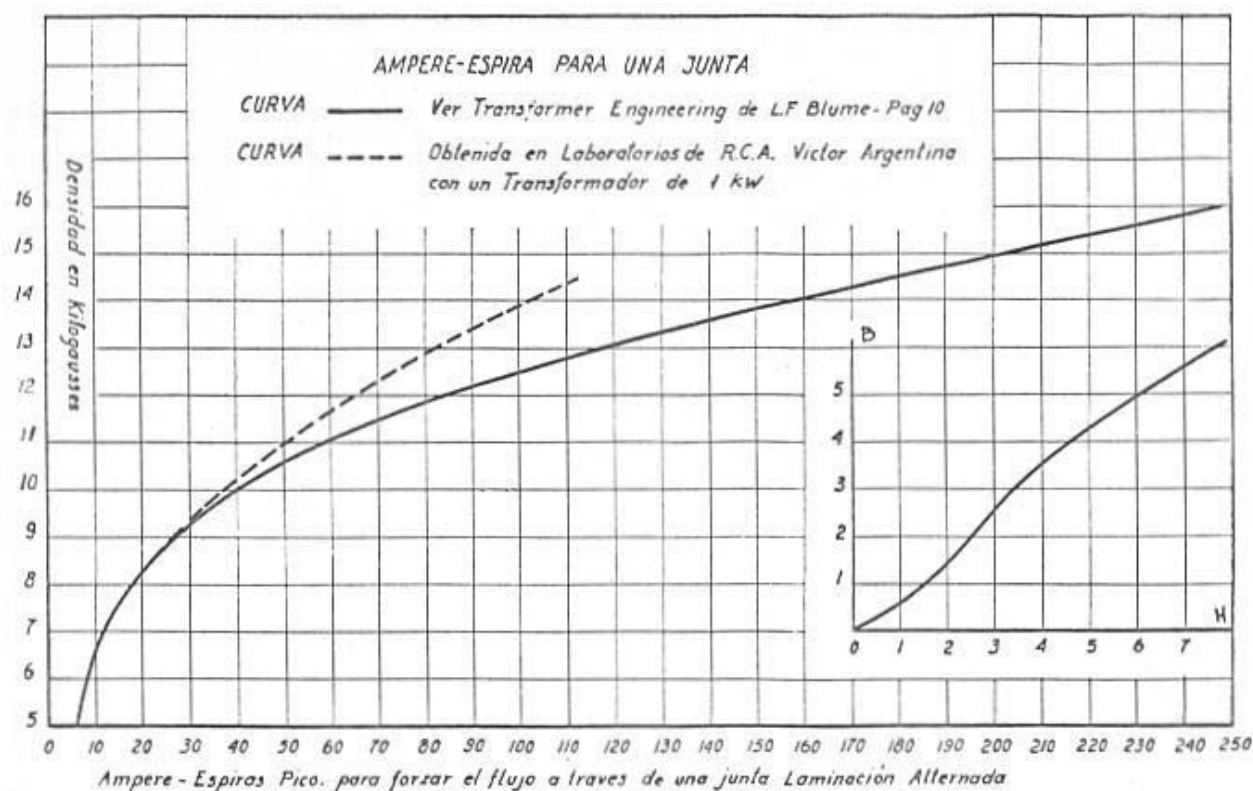


Figura 4.

CÁLCULO DE LA CORRIENTE MAGNETIZANTE EN CIRCUITOS MAGNÉTICOS SIN ENTREHIERROS ARTIFICIAL

La corriente de magnetización se calcula de las curvas $B = f(H)$ del material del núcleo y de la curva "Ampere-espiras" necesarios para forzar el flujo a través de una junta.

La corriente de magnetización se calcula de los amperes espiras necesarios para obtener una dada inducción. Los amperes espiras totales para cada densidad B son la suma de los necesarios para el hierro y para el aire (Fig.5).

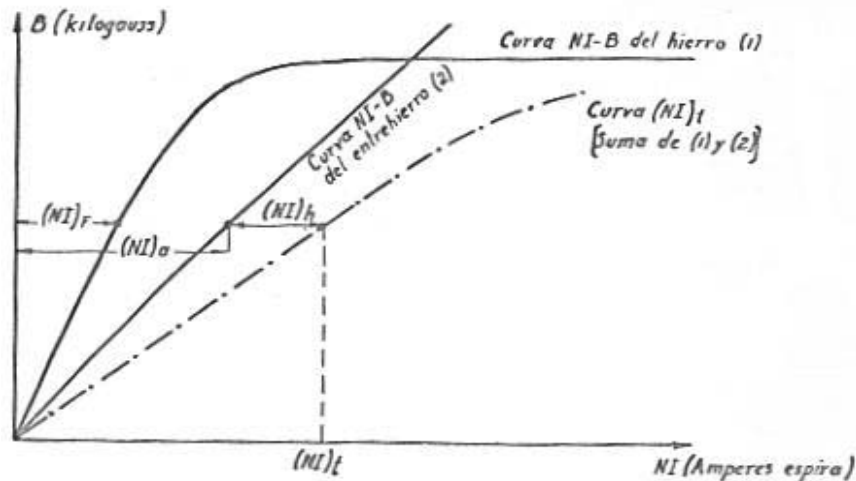


Figura 5.

De la curva del hierro $B = f(H)$ y dado $(I_f + I_a) \approx I_f$, pasaremos a la correspondiente: $B = f(N \cdot I_f)$ sabiendo que:

$$N(\text{Oersted}) = 1,25 \cdot \frac{N \cdot I}{l_f} [\text{Amperes} \cdot \text{Espiras}] \quad \text{Ec. 3}$$

Resultando de inmediato que para forzar el flujo a través de l_f será necesario: $(NI)_f = 0,796 l_f(\text{cm}) \times H$ (Oersted).

Por otra parte, los amperes-espiras $(NI)_a$ necesario para establecer el flujo $B.S = \Phi$ en el entrehierro se obtienen de la Fig. 4 para cada junta, en función de B . El valor así obtenido se multiplica por el número de juntas. Que en general son 2 o 4 (número de juntas en serie en el circuito magnético).

De esta manera conocemos $(NI)_t$, por lo que la corriente magnetizante resulta ser:

$$I_m(\text{pico}) = \frac{N^\circ \text{ juntas} \cdot (N \cdot I)_a + (NI)_f}{N} \quad \text{Ec. 4}$$

y dado que

$$\omega \cdot L = \frac{E}{I_m} \Rightarrow L = \frac{E}{\omega \cdot I_m}; (E: \text{volts pico})$$

Concluimos que este es el método de verificación de diseño, cuando ya disponemos de los siguientes datos:

N : nº de espiras.

EA: tensión alterna aplicada.

f : frecuencia de Ea.

S_f : sección del hierro.

l_p : long. del circuito magnético en el hierro.

l_o : entrehierro, o en su lugar $(NI)_a = t(B)$ de una junta.

Es obvio que en tal caso B (inducción) se deduce de las ecuaciones 1.

INDUCTORES CON NÚCLEO DE HIERRO CON "ENTREHIERRO ARTIFICIAL"

Consideremos el caso más general que corresponde al núcleo de hierro formado por chapas, con una parte del circuito magnético, a través del aire en una longitud " l_a " (fig.7). Este espacio se deja expreso para conseguir por ejemplo mayor linealidad de L en función de la tensión alterna aplicada, y evitar la saturación magnética del material.

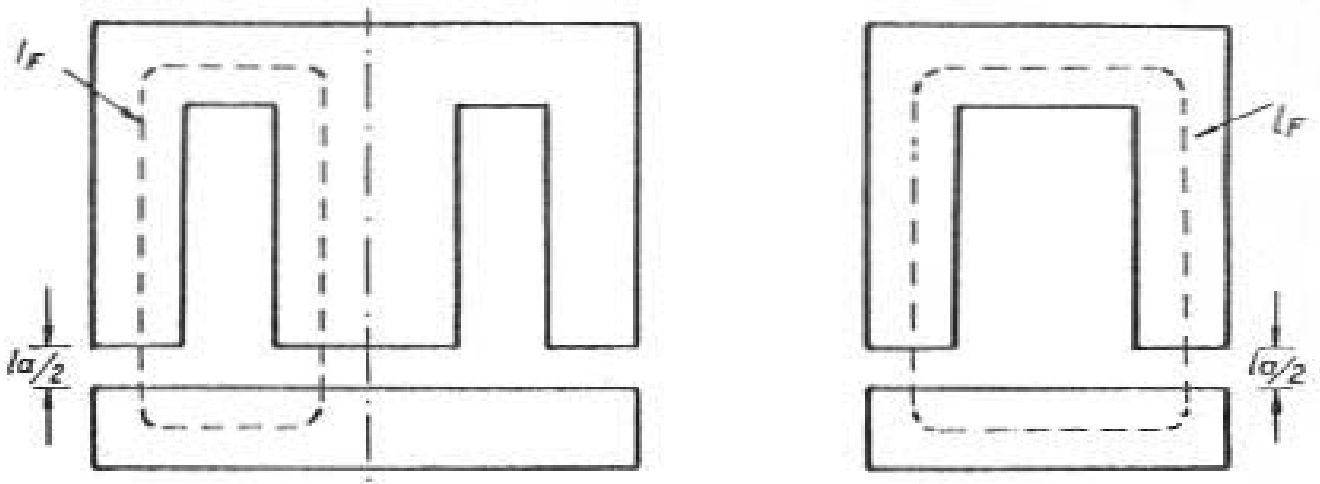


Figura 7.

Sabemos que
$$L = N \cdot \frac{\Phi}{I} \cdot 10^{-8}$$

Pero Φ (Maxwell) = $\frac{0,4 \cdot \pi \cdot N \cdot I}{\Re}$ donde I está dado en Amperes pico

y
$$\Re = \Re_f + \Re_a = \frac{lf - la}{\mu_\Delta \cdot S_F \cdot f_F} + \frac{la}{S_F} \quad \text{Ec. 5}$$

donde la y lf : cm; S_F : cm²; μ_Δ = permeabilidad incremental; f_F (factor de apilamiento) = $\frac{S_F(\text{bruto})}{S_F(\text{neto})}$ siempre mayor que 1, dado que la sección bruta del hierro incluye imperfecciones del apilado así como el espesor de la aislación entre chapas (óxidos y / o papeles aislantes), y \Re reluctancia del circuito magnético.

Dado que generalmente $la \ll lf \Rightarrow lf - la \approx lf \Rightarrow$

$$\Re = \frac{lf}{S_F \cdot f_F} \cdot \left(\frac{1}{\mu_\Delta} + \frac{la}{lf} \cdot f_F \right) \Rightarrow \Phi = \frac{0,4 \cdot \pi \cdot N \cdot I}{\frac{lf}{S_F \cdot f_F} \cdot \left(\frac{1}{\mu_\Delta} + \frac{la}{lf} \cdot f_F \right)} \quad \text{Ec. 7}$$

Aquí despreciamos la dispersión y suponemos que las líneas de flujo son paralelas, lo que se justifica, pues la dispersión resulta pequeña en la mayoría de los casos. Lo segundo no es lícito cuando el entrehierro " la " es grande, el que puede tenerse en cuenta de 2 maneras:

1) Suponiendo una sección de entrehierro equivalente " S_a " que siempre es mayor que S_F y tal que:

$$S_a = (a + la) \cdot (b + la) \quad \text{Ec. 8}$$

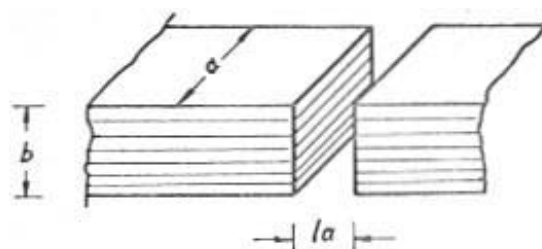


Figura 6.

2) Suponiendo un la' de entrehierro equivalente. Esto es lo que más se adopta por obtenerse una fórmula de L mas útil.

En los casos en que el entrehierro no sea pequeño, comparativamente el campo se ensancha como resultado de la curvatura de las líneas de campo en sus extremos y la sección transversal media en el aire por lo tanto aumentará. La resistencia o reluctancia magnética y también los Amperes espiras requeridos serán menores que los supuestamente considerados. Una concesión puede tomarse por esto, suponiendo la sección en el entrehierro igual a la dada en el hierro ($S_a = S_F$) pero al mismo considerando un entrehierro efectivo la' menor que el realmente indicado.

El entrehierro apropiado como función del entrehierro real ejecutado en un núcleo de sección cuadrada constituido por laminaciones E e I, se tiene en la figura 8

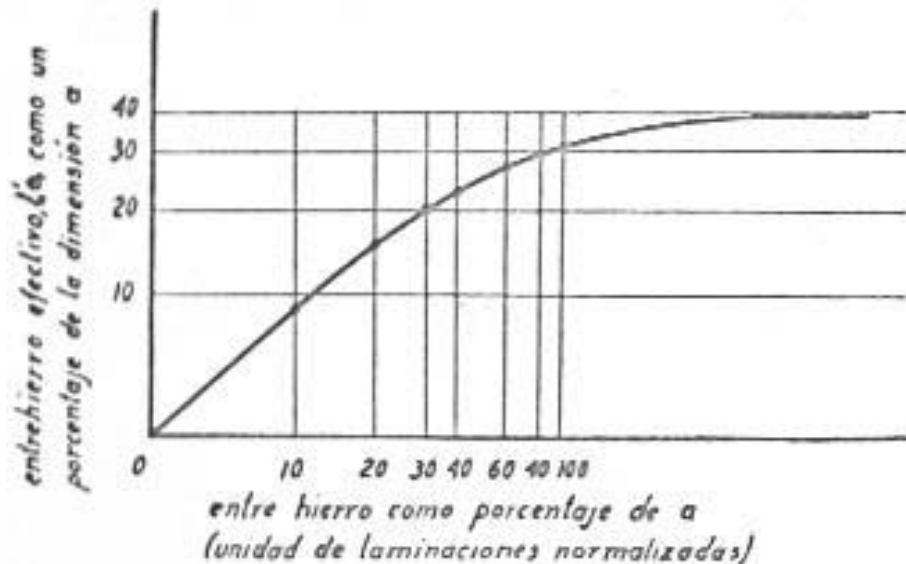


Figura 8.

La curva fue tomada de mediciones realizadas en un choke de entrehierro variable. Ello alcanza un valor límite cuando la totalidad del campo magnetizante pasa de la rama central de la E a los extremos estando alimentados las I.

Por otro lado, la exactitud en el valor la no es muy importante, por la inconsistencia de los datos de los materiales magnéticos.

Por lo tanto y salvo casos muy especiales, nos conformamos con una exactitud de L del orden del 10%, por lo que resulta práctico despreciar las correcciones en muchos casos.

Por consiguiente, reemplazando el valor de Φ del 7..

$$L(\text{Henry}) = \frac{0,4 \cdot \pi \cdot N^2 \cdot S_F \cdot f_F}{lf \cdot \left(\frac{1}{\mu_\Delta} + \frac{la}{lf} \right)} \cdot 10^{-8} \quad \text{Ec. 9}$$

Poniendo:

$$\mu_{ef}(\text{efectivo}) = \frac{\mu_\Delta}{1 + \left(\frac{la}{lf} \right) \cdot \mu_\Delta \cdot f_F}$$

$$\text{o} \quad \frac{1}{\mu_\Delta} + \frac{lf}{la} f_F = \frac{1}{\mu_{ef}}, \text{ resulta}$$

$$L = \frac{0,4 \cdot \pi \cdot N^2 \cdot \mu_{ef} \cdot S_F \cdot f_F}{r_F} \cdot 10^{-8} \quad \text{Ec.10}$$

donde μ_{ef} : permeabilidad efectiva del circuito, en el que entran las características del material magnético y la longitud del circuito magnético total (en hierro y aire).

Para la mayoría de los casos:

$$\frac{1}{\mu_{\Delta}} + \frac{la}{lf} f_F \approx \frac{1}{\mu_{\Delta}} + \frac{la}{lf} \quad \text{Ec. 11}$$

La formula 10 se puede transformar en

$$L = \frac{0,4 \cdot \pi \cdot N^2 \cdot S_F \cdot f_F}{le} \cdot 10^{-8} \quad \text{Ec. 12}$$

, donde

$$le = \frac{lf}{\mu_{\Delta}} + la \cdot f_F$$

Además la 12 tiene en cuenta dos casos particulares:

a) cuando el entrehierro "la" es cero:

$$L = \frac{0,4 \cdot \pi \cdot N^2 \cdot S_F \cdot f_F}{lf} \cdot \mu_{\Delta} \cdot 10^{-8} \quad \text{Ec. 13}$$

b) Si el entrehierro es apreciablemente grande, será

$$\frac{la}{lf \cdot f_F} \gg \frac{1}{\mu_{\Delta}} \Rightarrow L = \frac{0,4 \cdot \pi \cdot N^2 \cdot S_F}{la} \quad \text{Ec. 14}$$

La introducción de un entrehierro expreso, en reactores que trabaja con corriente alterna solamente, raramente se aplica, salvo en el caso como veremos mas adelante, cuando se impone mejorar la linealidad del componente, es decir, hacer menos dependiente, la inductancia de las variaciones de tensión alterna aplicada.

Verificación del diseño de un inductor con núcleo de hierro y entrehierro

Para el caso de verificar el diseño de un reactor del que conocemos E_a (tensión aplicada); ω ; lf ; S_F ; f_F ; N y la , el método es un procedimiento gráfico analítico basado en el siguiente análisis:

Ante todo consideramos como primera aproximación que en la región del entrehierro, la densidad de flujo B está distribuida uniformemente, por lo que en dicho espacio

$$H \left(\frac{Av}{cm} \right) = \frac{1}{0,4 \cdot \pi} \cdot B(\text{gauss}) = 0,796 \cdot B(\text{gauss}) \quad \text{Ec. 15}$$

Además, el flujo total: $\Phi = B \cdot S_F \Rightarrow$ la fuerza magnetomotriz total del circuito será:

$$(NI)_t = F_t = H_a \cdot la + H_f \cdot lf = H_t \cdot (lf + la) \approx H_t \cdot lf \approx H_o \cdot lf \quad \text{Ec. 16}$$

Dado que consideramos despreciable los efectos de borde, se cumplirá $\Phi_a = \Phi_f$, (17) es decir el flujo en el hierro (Φ_f) es igual al flujo que atraviesa el entrehierro, considerando además:

$$S_a = S_f = S$$

Una solución gráfica que satisfaga las ecuaciones 16 y 17 se obtendrá, superponiendo al gráfico de:

$$\Phi_F = f(F_F), \text{ la representación } \Phi_a = f(F_a)$$

El origen de coordenados para la característica del entrehierro es ubicado en el punto a lo largo del eje de abscisas correspondiente a la representación del hierro, que representa al total de la fuerza magnetomotriz aplicada F_t .

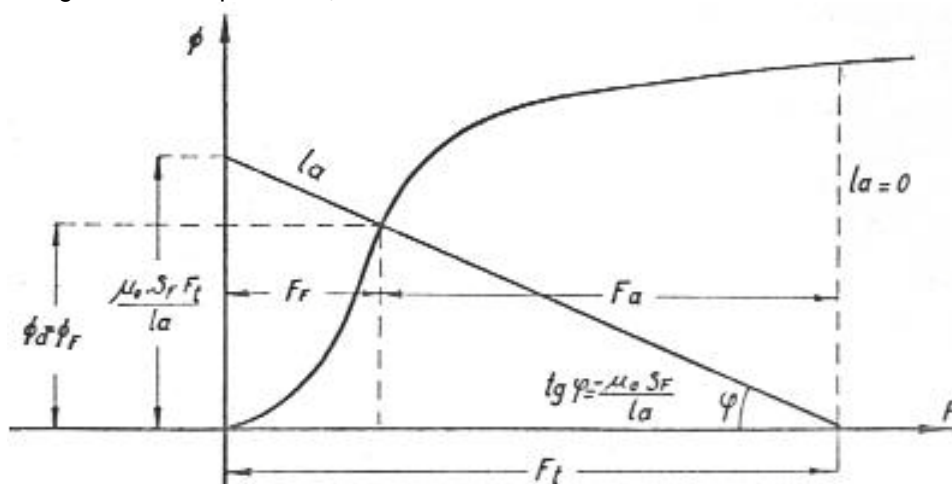


Figura 9.

Las coordenadas correspondientes al punto de intersección nos darán respectivamente el flujo total Φ_t y la caída de potencial magnético F_F en el hierro. La construcción de la solución grafica esta ilustrada en la figura 9.

En dicha figura, la relación entre Φ_F y F_F se obtienen de la curva normal de magnetización del material magnético empleado.

La curva de magnetización del entrehierro se obtiene del calculo de lo reluctancia en dicho entrehierro.

$$\mathfrak{R}_a = \frac{la}{\mu_o \cdot S} \quad \text{Ec. 18}$$

donde μ_o es un constante, "la" es la longitud del entrehierro y S es la sección.

La relación entre Φ_a y F_a será:

$$\Phi_a = \Phi_F = \frac{F_a}{\mathfrak{R}_a} = \frac{\mu_o \cdot S}{la} \cdot F_a \quad \text{Ec. 19}$$

El trazado de la línea de magnetización para el entrehierro en la fig. 9 se determina rápidamente partiendo que ella interceptará al eje Φ en:

$$\Phi = \frac{\mu_o \cdot S}{la} \cdot F_t \quad \text{Ec. 20}$$

Dicho valor es el del flujo correspondiente que resultaría si toda la fuerza magnetomotriz F_t se aplicara a dicho entrehierro.

La pendiente de la recta es el negativo de la permeancia (inversa de la reluctancia) del entrehierro equivalente. La intersección de ambas líneas (entrehierro y característica magnética del hierro) es la solución deseada del sistema de ecuaciones 16 y 17, dado que este punto es el único que satisface a dichas ecuaciones simultáneamente.

Dado que es más conveniente el uso de las curvas $B = f(H)$, transformaremos los gráficos de la figura 9 en la 10, multiplicando el eje de ordenadas por $1/S_F$ y el eje de abscisas por $1/l_F$; la curva de Φ_F en función de F_F se transforma en B_F como función de H_F . Los valores de B_a Y H_A no se dan directamente sino que para calcular sus respectivos magnitudes al origen se hará:

$$B_a = B_F \cdot \frac{S_F}{S_a} \quad \text{Ec. 21}$$

$$y \quad H_a = \frac{F_t}{la} - \frac{H_F \cdot I_F}{la} \quad \text{Ec. 22}$$

La línea de entrehierro intercepta el punto B_F y H_F en:

$$H_F = \frac{F_F}{lf} \quad \text{Ec. 23} \quad y \quad B_F = \frac{\mu_o \cdot S_a}{S_F} \cdot \frac{F_t}{la} \quad \text{Ec. 24}$$

La figura 10 nos representa la construcción modificada

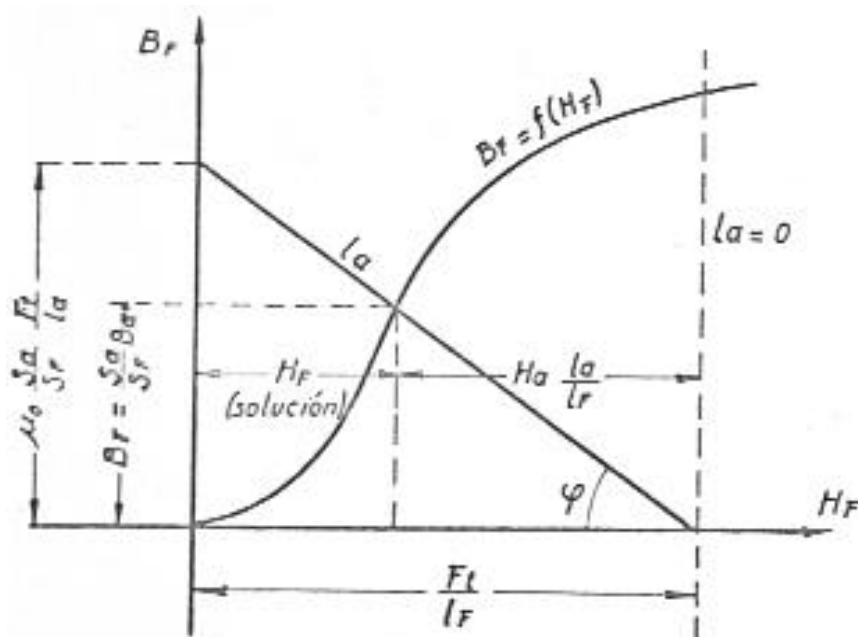


Figura 10.

$\mu_o = 1$ (permeabilidad relativa del aire) y $S_a = S_F$. . de 21 y 22

$$B_a = H_a \frac{lf}{la} \Rightarrow \frac{B_a}{H_a} = \frac{lf}{la}$$

Esta expresión también nos permite trozar la recta del entrehierro cuando se utiliza la curva $B_F = f(H_F)$ o partir del origen

$$\text{De:} \quad F_t = (N \cdot I)_t = H_F \cdot lf + H_a \cdot la \Rightarrow$$

$$I = \frac{H_F \cdot lf + H_a \cdot la}{N} \quad \text{(corriente magnetizante)} \quad \text{Ec. 26}$$

$$L = \frac{N \cdot \Phi}{l} = \frac{N^2 \cdot B_F \cdot S_F}{H_F \cdot lf + la \cdot H_a} \quad \text{Ec. 27}$$

INDUCTORES CON CORRIENTE CONTINUA Y ALTERNA SUPERPUESTA

Consideraciones generales

Estos, reactores se utilizan para eliminar el "ripple" en fuentes de alimentación de c.c. de modo que en general circula corriente continua por su bobinado. El entrehierro la tamaño del núcleo y número de espiras depende de tres factores relacionados entre si:

- Inductancia deseada.
- Corriente continua en el bobinado.
- Tensión alterna aplicada.

El número de espiras N , la corriente continua I_o y el entrehierro " la " determinan el flujo continuo, mientras que N , la tensión alterna aplicada E_a y la sección del núcleo S determinan el flujo alterno.

Si $\Phi_o + \Phi_{alt.}$ excede la saturación, se observa disminución de la inductancia y no linealidad de la misma.

En general $I_f \gg I_a$ pero esta dos componentes no se suman directamente pues sus correspondientes permeabilidades son diferentes. En el entrehierro vale la unidad, mientras que en el núcleo su valor depende del grado de magnetización del hierro.

La longitud efectiva de las líneas de flujo será: $la + l_f/\mu$, siendo μ la permeabilidad para Φ_o (flujo continuo).

Para un valor de I_o y E_a , se observa para un inductor dado (N fijo), L es máximo para un cierto valor de " la " denominado "entrehierro óptimo", y disminuye sensiblemente para " la " mayores o menores que dicho óptimo.

La explicación es simple: L variara según la ecuación 10:

$$L = \frac{0,4 \cdot \pi \cdot N^2 \cdot S \cdot f_F}{l_f} \cdot \mu_{ef} \cdot 10^{-8}, \text{ conjuntamente con } \mu_{ef}, \text{ y dado que } \frac{1}{\mu_{ef}} = \frac{1}{\mu_{\Delta}} + \frac{la}{l_f} \cdot f_F,$$

observamos que $1/\mu_{ef}$ depende de la/l_f término que aumenta con " la " produciendo una disminución de μ_{ef} y $1/\mu_{\Delta} \cdot l_f$.

Si partimos de $la=0$, la intensidad de campo continuo será: $H_o = 0,4 \cdot \pi \cdot N \cdot I_o / l_f$.

La introducción de un entrehierro " la ", disminuirá el H_o en el hierro (H_4), tanto más cuanto mayor sea " la "; ya que la fuerza magnetomotriz total debe repartirse según:

$$H_t (l_f + la) = H_F \cdot l_f + H_a \cdot la \approx H_o \cdot l_f \quad \text{Ec. 28}$$

Esto significa que μ_{Δ} , tendrá valores cada vez mayores, ya que el punto de funcionamiento magnético del hierro se desplazará cada vez más hacia $H_F = 0$, al aumentar " la ". Si el aumento de μ_{Δ} es mayor que la disminución provocada por el otro sumando la / l_f , μ_{ef} y por consiguiente L aumentarán.

Al principio, una pequeña variación de " la " producirá grandes aumentos de μ_{Δ} , aumentando L , pero llegará un momento en el que para conseguir ulteriores aumentos de μ_{Δ} ; el incremento de " la " deberá ser tal que su influencia en el término la / l_f es determinante y la disminuye. Otra forma de ver la necesidad de introducir un entrehierro dado en un inductor para c.c. y c.a. superpuesta, de manera de hacer máximo a L es la siguiente; según fig. 11 :

Supongamos dado el reactor. Si el núcleo magnético no tiene juntas ni entrehierro, la I_o circulante establece el campo H_o y el punto de trabajo es el 1 con una inducción B_o .

Si se superpone la tensión alterna E_a o sea una inducción ΔB , se origina un ΔH definido por el μ_e , en ese punto 1. El valor de la inductancia sería pues:

$$L_i = k \cdot \frac{\Delta B}{\Delta H} = k \cdot \mu_{ei}$$

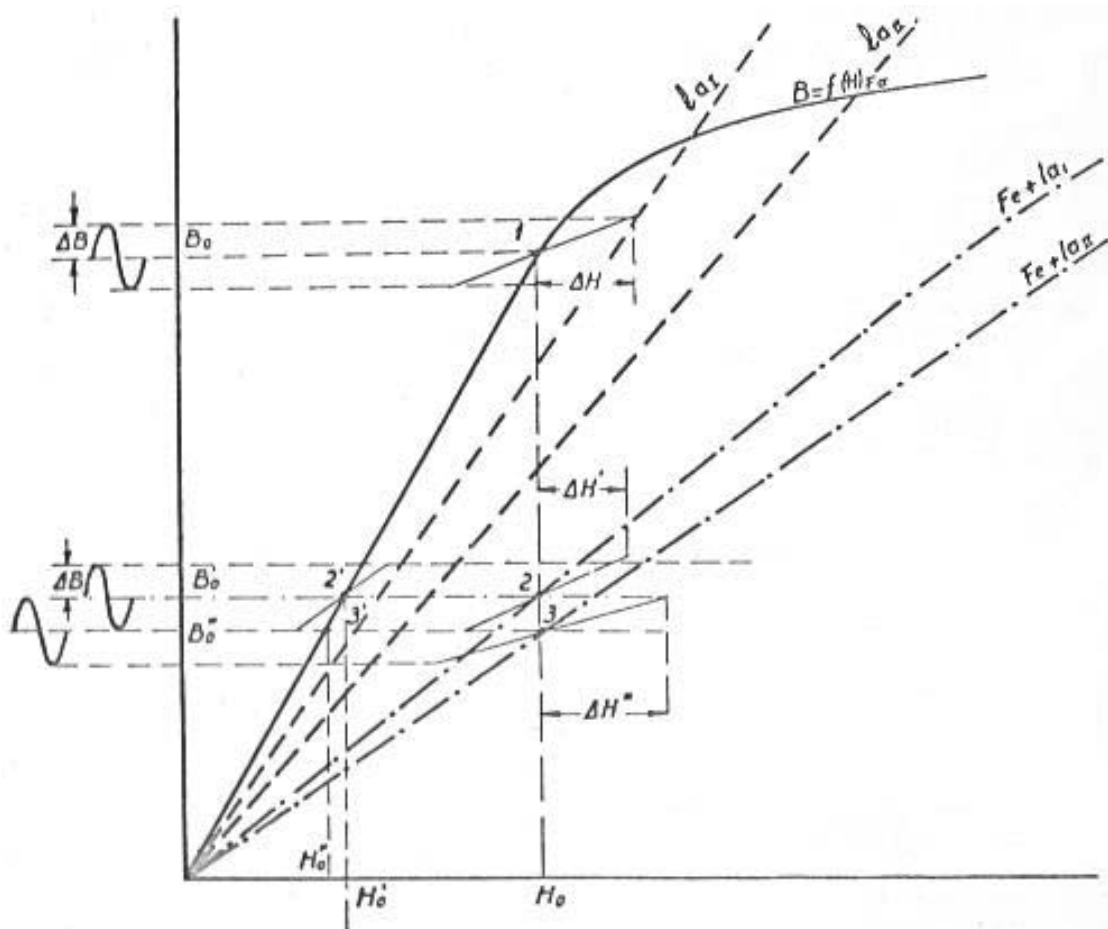


Figura 11.

Supongamos ahora la existencia de un entrehierro " l_a " por lo tanto la curva del sistema magnético total es la del (Fe + aire). 1

Como el campo H_0 no ha variado (por no variar I_0 y ser $l_f + l_a \approx l_f$, se establece en dicho circuito una inducción B'_0 que es menor que B_0 por el efecto desmagnetizante del entrehierro. En el hierro existe por lo tanto un campo $H'_0 < H_0$.

Si se aplica ahora la E_a o sea ΔB , se obtiene el lazo menor de histéresis en torno al punto 2' para el hierro y el lazo menor en torno a 2 para el sistema total, del que se deduce $\Delta H' < \Delta H$, o sea:

$$L_2 = k \cdot \frac{\Delta B}{\Delta H} L_1 \quad \text{Con un entrehierro mayor de long. } l_{a1} > l_{a2}$$

MÉTODOS DE DISEÑO ÓPTIMO DE INDUCTORES CON NÚCLEO DE HIERRO; PARA C.C. y C.A. SUPERPUESTOS.

Método de Hanna

Para el diseño de estos inductores, elegida una laminación, el problema se plantea en calcular el entrehierro y el número de espiras para determinar la inductancia requerida. Dada la complejidad de la dependencia entre las distintas variables que intervienen en la formula (29), el procedo es laborioso.

Existen algunos métodos simplificados para el proyecto; uno de ellos es debido a R. C. Hanna, simple y directo.

Supongamos un núcleo de dimensiones conocidas sobre el cual se ha arrollado una bobinado N espiras. La corriente continua es I_0 y el entrehierro " l_a ".

Considerando $\Delta B_a = 0$ evidentemente los datos ω y E_a no interesan, pues si $\Delta B_a = 0$ equivale a suponer $E_{alt} = 0$ [ΔB : inducción alterna].

Sabemos que:

$$L = \frac{0,4.\pi.N^2.10^{-8}}{\frac{l_f}{\mu_\Delta.S_F} + \frac{la}{S.f_F}} = \frac{1,256.N^2.S_F.10^{-8}}{l_f} \cdot \frac{1}{\left(\frac{1}{\mu_\Delta} + \frac{la}{l_f}.f_F\right)}$$

Ec. 29

Por lo tanto $L = K. \mu_e$

La inducción continua que se establece en el núcleo puede determinarse de NI_o con auxilio de la curva normal de magnetización, o de la relación:

$$\Phi_o = \frac{0,4.N.I_o.S}{\frac{l_f}{\mu} + la} = B_o.S_{fe}$$

Ec. 30

donde μ es la permeabilidad normal y B_o = inducción continua.

Por lo tanto:

$$B_o = \frac{0,4.\pi.N.I_o}{\frac{l_f}{\mu} + la}$$

Ec. 31 (I_o = corriente continua)

$$N = \frac{B_o \cdot \left(\frac{l_f}{\mu} + la\right)}{0,4.\pi.I_o}$$

Ec. 32 y reemplazando en (29)

$$L = \frac{B_o^2.S_F.l_f \cdot \left(\frac{1}{\mu} + \frac{la}{l_f}f_F\right)}{0,4.\pi.I_o^2 \cdot \left(\frac{1}{\mu_\Delta} + \frac{la}{l_f}f_F\right)} \cdot 10^{-8}, \text{ pero } S_F.l_f = V_F \Rightarrow$$

$$\frac{L.I_o^2}{V_F} = B_o^2 \cdot \frac{1}{0,4.\pi} \cdot \frac{\left(\frac{1}{\mu} + \frac{la}{l_f}f_F\right)}{\left(\frac{1}{\mu_\Delta} + \frac{la}{l_f}f_F\right)} \cdot 10^{-8}$$

Ec. 33

y de (32)

$$\frac{N.I_o}{l_f} = \frac{B_o \cdot \left(\frac{1}{\mu} + \frac{la}{l_f}\right)}{0,4.\pi.10^{-8}}$$

Ec. 34

Fijando un valor de la / l_f , para cada valor de B_o pueden calcularse los primeros miembros de 33 y 34, partiendo de las curvas de permeabilidad normal e incremental del material.

Representando $(N.I_o) / l_f$ en abscisas y $(L.I_o^2) / V_F$ en ordenadas para cada valor de la / l_f , se obtiene:

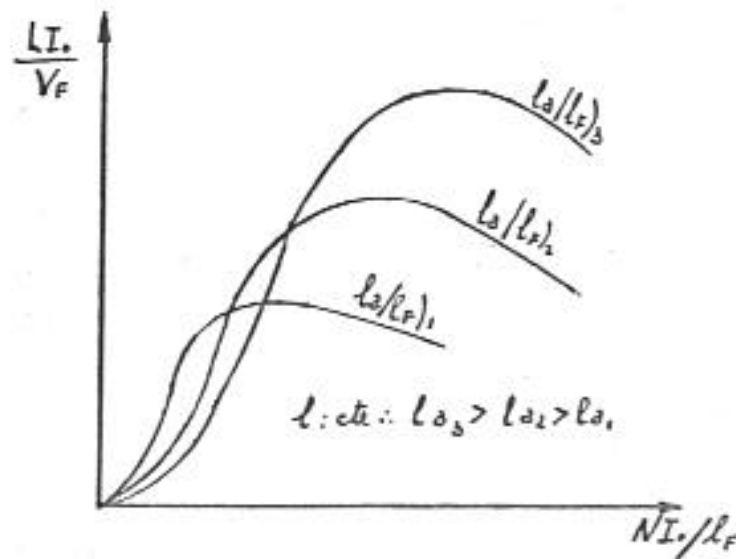


Figura 12.

Es natural que independientemente de N , l_o / l_F debe elegirse de manera de nacer L máximo, por lo que interesan los puntos marcados (x) pues a la derecha de los mismos pequeños incrementos de L requieren grandes aumentos de $N I_o / l_F$ (figura 12)

Por lo tanto estos puntos determinan una nueva curva (envolvente) o lo largo de la cual pueden marcarse los valores de l_o / l_F óptimos. (Figura 13).

Curvas típicas pueden observarse entre otros, en el Manual de Terman.

De esta forma, el diseño se reduce a, elegida una laminación y altura de apilado y partiendo de los datos L e l_o , determinar $L I_o / l_F$ interceptando con este valor o la curva l_o / l_F , se obtiene $N I_o / l_F$, calculando N pues se conocen ya l_o y l_F .

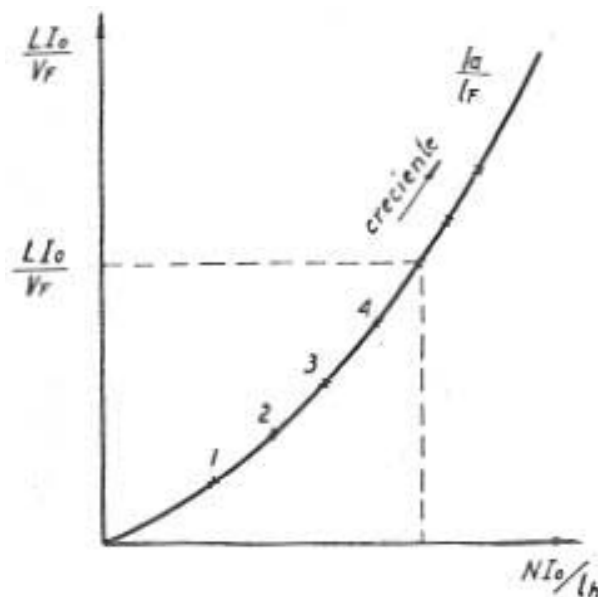


Figura 13.

De la relación l_o / l_F determinada en la curva, y siendo conocida l_F determinaremos el valor del entrehierro " l_o " óptimo. Además adoptando una densidad de corriente y calculando la corriente eficaz total que será:

$$i_{ef} = \sqrt{I_o^2 + I_a^2}$$

Fijaremos una sección del conductor y con N determinaremos si ef devanado cabe en la ventana. Hecha esta verificación, se puede proyectar ya la bobina, carrete, espiras por capas, número de capas, etc. (en forma similar a lo indicado en el capítulo de transformadores).

Como se ha dicho, todo esto se ha supuesto para B alterno (ΔB) igual a cero, pero no siempre se cumple esta condición. Si se tiene un reactor y se mide el mismo en función de la tensión alterna aplicada a él (ΔE), se tendrá una curva como la dibujada (Fig. 14)

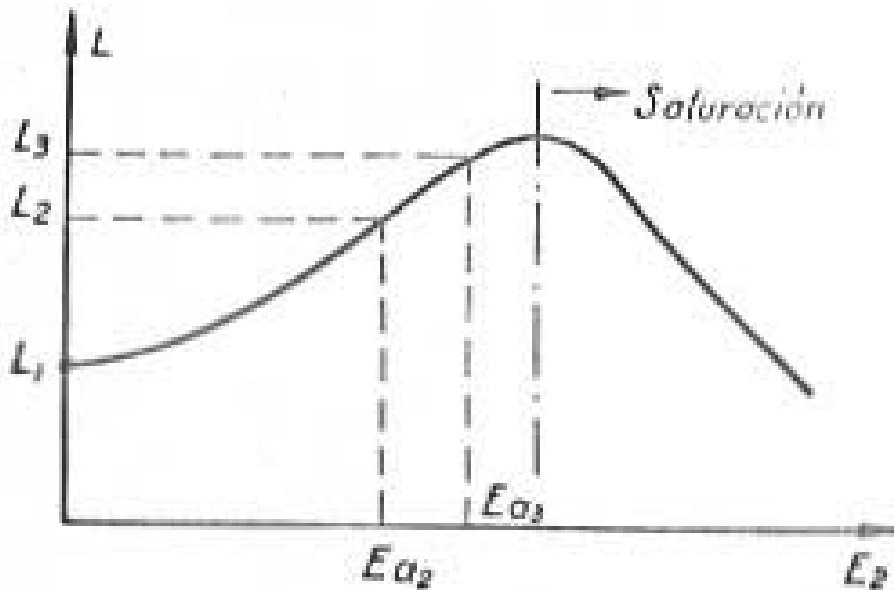


Figura 14

Con este método de diseño ($E_{alt} = 0$) E_{aH} el L obtenido será siempre mínimo.

En estas condiciones, siempre se estará en buenas condiciones, salvo en lo que respecta a la economía. Si se trata de determinar un valor de L con ΔE_2 e.e. el valor que en realidad se obtiene, no es L_1 sino L_2 valor muy superior.

Para verificar si un inductor presenta efectos de saturación, debe procederse a medir su inductancia, con los valores correctos de tensión alterna y con corriente continua.

Si incrementamos la tensión alterna levemente hasta ΔE_3 (figura 14), y observamos un aumento en la inductancia hasta el valor L_3 , podemos estar seguros que no existe saturación.

Las condiciones que significan la aplicación de este método se cumple en casi todas las aplicaciones.

En general en receptores y amplificadores que trabajan a bajo nivel, la tensión alterna E es pequeña.

Curvas M

Se han desarrollado otros métodos entre ellos, las curvas M desarrolladas por el Ing* Mac. Laurin que, permiten resolver el diseño de inductores para cualquier condición de trabajo: ($\Delta E, I_0$).

La fórmula que de la inductancia en función de los parámetros geométricos con entrehierro es:

$$L = \frac{1,256 \cdot N^2 \cdot S_F}{\left(\frac{1}{\mu_\Delta} + \frac{la}{lf} \right)} 10^{-8}$$

$$\mu_e = \text{permeabilidad efectiva:} \quad \frac{1}{\mu_e} = \frac{1}{\mu_\Delta} + \frac{la}{lf}$$

Multiplicando ambos miembros por l_0^2 y numerador y denominador por I_F , y poniendo $V_F = I_F \cdot S_F$ queda:

$$\frac{L.I_o^2}{V_F} = \frac{1,256.10^{-8}}{\left(\frac{1}{\mu_\Delta} + \frac{la}{lf}\right)} = \frac{N^2.I_o^2}{I_F^2}$$

Ec. 36

llamando $\frac{L.I_o}{V_F} = K$ y $\frac{N.I_o}{I_F} = F$ queda:

$$K = \text{cons tan } te. \mu_e . F^2$$

es decir K es función de μ_e y F^2

Dando valores a F y hallando los valores de μ_e máximos se puede representar K. Si se fija un ΔB_1 y un H_t se pueden determinar los valores de μ_e máx.

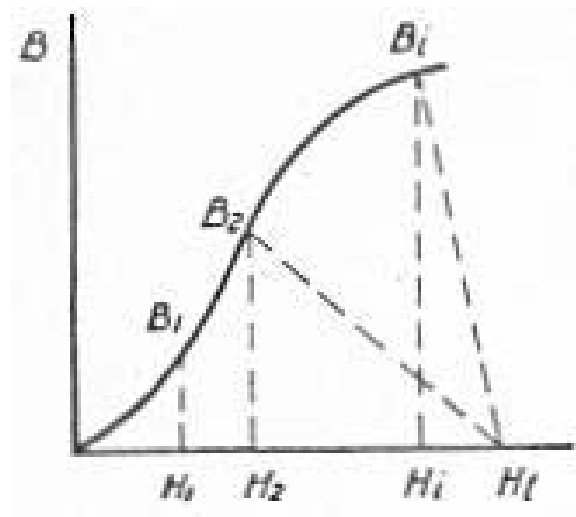


Figura 15.

dado: ΔB_1 , H_{t1} .

H_F = campo en el hierro.

B_F = inducción en el hierro.

H_{t1} = campo total.

con H_1 , H_2 , H_i y ΔB . de lo Fig. 16 se determina μ_Δ , y a su vez se puede determinar μ_e

$$\frac{1}{\mu_e} = \frac{1}{\mu_\Delta} + \frac{la}{lf}$$

$$\frac{la}{lf} = \frac{H_{t1} - H_i}{B_i}$$

Ec. 38

Dando distintos valores a B_i , para H_{t1} fijo, determinamos $B = f(\mu_e)$, figura 17.

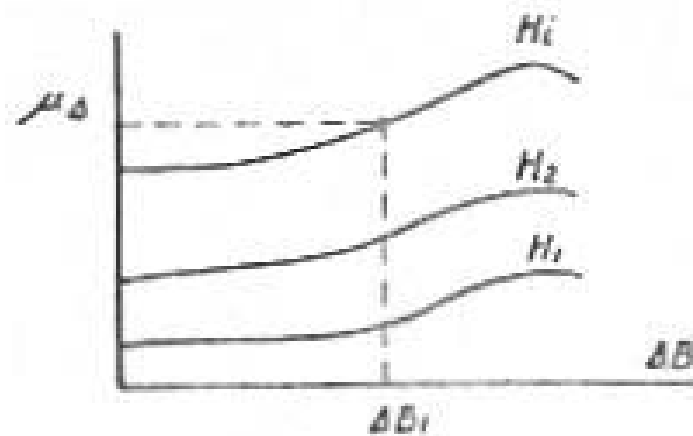


Figura 16.

Tomando otros valores de H_{t2} ; H_{t1} y el mismo ΔB_1 se repite el cálculo anterior y que se representa en la Fig. 18, obteniéndose los valores de H_t en que μ_e es Máximo, que a su vez se indica en la curva de la Fig. 19.

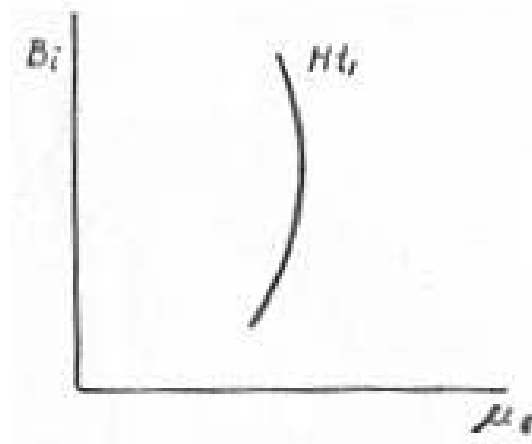


Figura 17.

En los puntos a,b,c, se puede determinar $\frac{I_a}{I_f} = \frac{H_{ti} - H_i}{B_i}$ y representarlas en la curva de la Fig. 20.

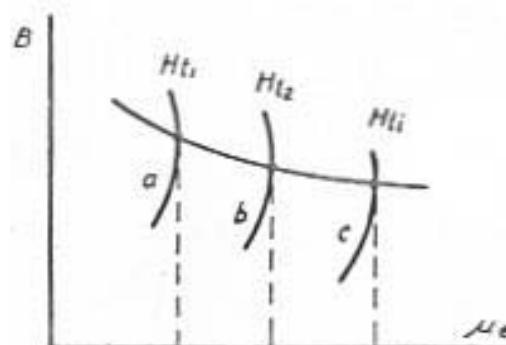


Figura 18.

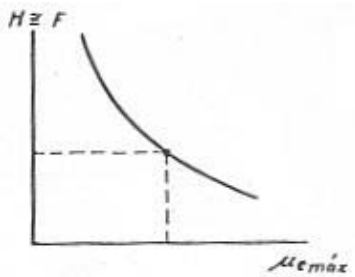


Figura 19.

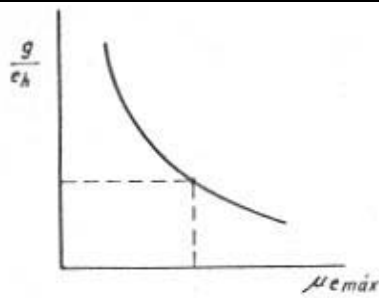


Figura 20.

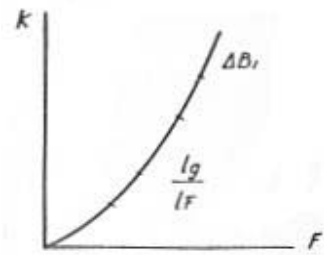


Figura 21.

Copiando la fórmula anterior

$$K = \text{constante} \cdot \mu_{e \text{ máx}} \cdot F^2$$

Y poniendo con bastante aproximación $N_{io} = Ht \approx F$, para cada valor de F se obtiene μ_e , calculando K que se representa en la Fig.21; en la curva de la Fig. 21 además se acotaran los distintos valores de l_g / l_f .

Tomando otros valores de $\Delta B = \Delta B_2$, $\Delta B = \Delta B_i \dots$ se podrá repetir todo lo anterior y representarla gráficamente.

BIBLIOGRAFÍA

- MAGNETIC MATERIALS AND THEIR APPLICATIONS-Carl Heck-Ed. Butterword.
- SOFTFERRITES, PROPERTIES AND APLICCATIONS-E. Snelling -Ed.ILIFFE.
- Datos de laminaciones de la fábrica ALAMTEC