

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL

FACULTAD REGIONAL MENDOZA

DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA

CÁTEDRA DE TECNOLOGÍA ELECTRÓNICA

INDUCTORES CON NÚCLEO DE AIRE

PROFESOR TITULAR:

ING. ADOLFO F. GONZÁLEZ

PROFESOR ADJUNTO:

ING. RICARDO M. CESARI

AYUDANTE TRABAJOS PRÁCTICOS:

ING. RUBÉN O. VICIOLI

2009

ÍNDICE

INDUCTORES CON NÚCLEO DE AIRE DE UNA SOLA CAPA (Solenoides)	3
Ventajas del solenoide	3
Aplicaciones	4
Cálculo de la Inductancia de un solenoide	4
Ejemplo:	5
Introducción del parámetro J	6
Capacitancia Distribuida (C_d)	7
Cálculo de Q de un solenoide	7
Proyecto de Solenoides	8
RANGO APROXIMADO DE UTILIZACIÓN DE LOS DIFERENTES INDUCTORES	11
INDUCTORES MULTICAPA	12
Formas de bobinados	12
Verificación de inductores multicapa	16
Proyecto de inductores multicapa	16
Desarrollo:	17
Verificación del Q:	18
Verificación de Δt :	19
Calculo de la capacidad distribuida:	19
Consideraciones constructivas	20
BIBLIOGRAFÍA	21

INDUCTORES CON NÚCLEO DE AIRE DE UNA SOLA CAPA (Solenoides)

Es una configuración, bastante generalizada en los circuitos electrónicos, se caracterizan por la constancia del valor de su inductancia, el rango de utilización aproximado es de 1,5 a 200 MHz.

Se trata en general de bobinas de ejes rectos, construido con alambre macizo, o en algunos casos con caño de cobre plateado, bobinados en el aire, (auto soportados), o sobre formas de material aislante, (porcelanas, cerámicas, etc.) las que pueden tener aristas para disminuir los puntos de contacto, o también estar fileteadas para asegurar la estabilidad mecánica de las espiras, (en algunos casos especiales las espiras se obtienen depositando directamente sobre la forma fileteada el material conductor). Estos inductores de una capa pueden considerarse como bobinas toroidales de eje rectificado y que debido a esta rectificación y por no ser de longitud infinita, hay que introducir un factor k (Nagaoka), menor que la unidad, que depende de las dimensiones geométricas de la bobina, y que se acostumbra a expresarlo en forma gráfica, en Función de la relación D/l

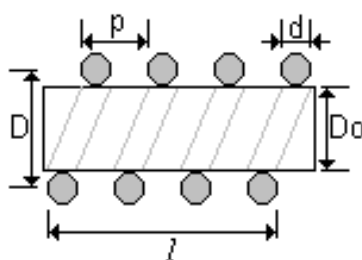


Figura 1

D = diámetro del inductor

D_0 = diámetro de la forma

d = diámetro del conductor

p = paso.

$N = N^0$ total de espiras

l = longitud del inductor

Aún con espiras juntas no se cumple $p = d$ debido al espesor del esmalte u otro tipo de aislante que se utilice para el conductor, $p = 1,05d$, p puede variar hasta 3 ó 4 d .

Ventajas del solenoide

Su Inductancia L se puede calcular con buena aproximación. La capacidad parásita (C_d) es mínima dado que un extremo está separado del otro y la separación entre espiras puede hacerse grande. Además el efecto de proximidad es muy bajo, de modo que se pueden obtener Q elevados y utilizarlos en altas frecuencias.

Los auto soportados tienen menos pérdidas, debido a que no existe el soporte aislante (forma).

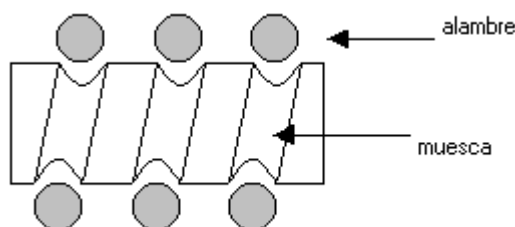


Figura 2

El ranurado es para mantener constante las dimensiones físicas.

Aplicaciones

En aquellos casos en que el nivel de corriente y potencia es elevado; por que el solenoide tiene su L independiente de la corriente, ya que no hay elementos alinéales en el circuito. Esto no impide que para bajas potencias se lo encuentre con conductor de hilos múltiples.

Cálculo de la Inductancia de un solenoide

Cuando l es grande comparada con el D , es lo que se llama lámina conductora, pero de sección rectangular, espesor y separación entre espiras prácticamente despreciable.

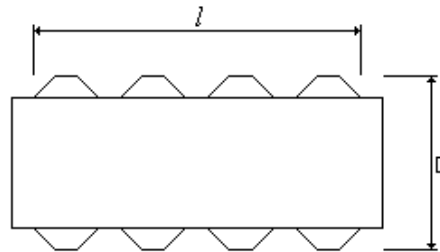


Figura 3

$$L = N \cdot \frac{\Phi}{I}$$

$$\Phi = B \cdot A$$

$$B = \mu \cdot H$$

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

$$\Phi = \mu \cdot \frac{N \cdot I}{l} \cdot A$$

$$L = \mu \cdot \frac{N^2 \cdot A}{l}$$

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

Para el vacío en el sistema MKS:

$$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \left(\frac{\text{Hy}}{\text{m}} \right) = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-9} \left(\frac{\text{Hy}}{\text{cm}} \right) = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-3} \left(\frac{\mu\text{Hy}}{\text{cm}} \right)$$

En donde:

$$A = \pi \cdot \frac{D^2}{4} = \pi \cdot R^2$$

$$L = \frac{D^2 \cdot \pi^2 \cdot N^2}{l} \cdot 10^{-3} = 4 \cdot \frac{R^2 \cdot \pi^2 \cdot N^2}{l} \cdot 10^{-3}$$

L en μHy ; D y l en cm

Expresión que vale para el toroide y para el caso de un $l \gg D$ y espiras chatas.

Cuando se considera un solenoide real, donde la longitud no es grande comparada con D , aparece un "efecto de borde" y el campo magnético deja de ser perfectamente paralelo y

homogéneo en el interior del inductor, de tal modo, que las espiras exteriores, no tienen una concatenación perfecta con las interiores.

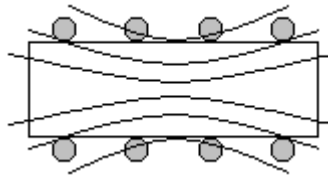


Figura 4

NAGAOKA hizo el cálculo, para ver en que forma se altera la inductancia L por el efecto de borde por no tener forma ideal, **un factor K llamado factor de Nagaoka**.

Retomando la expresión:

$$L = 4 \cdot \frac{R^2 \cdot \pi^2 \cdot N^2}{l} \cdot 10^{-3} [\mu\text{Hy}] = 4 \cdot \frac{\pi \cdot N^2 \cdot A}{l} \cdot 10^{-3} [\mu\text{Hy}]$$

Para toroide y solenoide ideal.

Dado que la mayoría de los casos prácticos l y D son comparables, el campo en el interior de la bobina no es uniforme, lo que da como conclusión que la inductancia del solenoide, será una función de l / R por lo que la fórmula de L deberá ser multiplicada por un factor de corrección cuyo valor es:

$$k = \frac{1}{1 + 0,9 \left(\frac{R}{l} \right) - 2 \times 10^{-2} \left(\frac{R}{l} \right)^2}$$

Hasta aquí es suponiendo el bobinado a espiras juntas, formando una hoja de corriente. Cuando las espiras se hallan espaciadas debe aplicarse otro factor de corrección:

$$\left[1 - \frac{l(A+B)}{\pi \cdot R \cdot N \cdot k} \right]$$

donde:

$$A = 2,3 \cdot \text{Log} 1,73 \frac{d}{p}$$

$$B = 0,336 \cdot \left(1 - \frac{2,5}{N} + \frac{3,8}{N^2} \right)$$

por lo que la fórmula final será:

$$L = k \frac{4R^2 \cdot \pi^2 \cdot N^2}{l} \cdot 10^{-3} \left[1 - \frac{l(A+B)}{\pi \cdot R \cdot N \cdot k} \right]$$

siendo k el factor de NAGAOKA.

Cuando $l \gg 0,33D$, k se expresa con un error menor al 1 % con la fórmula:

$$k = \frac{1}{1 + 0,45 \frac{D}{l}}$$

Ejemplo:

Se desea verificar la Inductancia de un solenoide con $N = 10$ espiras de alambre redondeo sólido, con una $R = 1$ cm, $p = 0,3$ cm, y $d = 0,1$ cm.

La constante de Nagaoka:

$$k = \frac{1}{1 + 0,9(1/3) - 0,02(1/3)^2} = 0,768$$

$$L = \frac{4 \cdot \pi^2}{3} \cdot 0,768 \times 10^{-3} = 1,01 \mu\text{Hy}$$

Luego se obtiene la corrección por:

$$A = 2,3 \cdot \log 1,73 (d / p) = 2,3 \cdot \log 1,73 / 3 = 0,48$$

$$B = 0,336 \cdot (1 - 0,25 + 0,038) = 0,226$$

el factor de corrección será:

$$1 + \frac{3 \times 0,228}{0,768 \cdot \pi \cdot R \cdot N} \cong 1,035$$

en este caso la corrección es de solo 3,5% y podemos despreciarla.

Introducción del parámetro J

Para obtener las expresiones de la gráfica (J) y (K) se parte de la expresión:

$$L = \frac{\pi^2 \cdot D^2 \cdot N^2}{l} \cdot k \cdot 10^{-3} \quad (1)$$

tomando $A = \pi \cdot R^2$

$$L = \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot R^2 \cdot N^2}{l} \cdot k \cdot 10^{-3} \quad (2)$$

reemplazando $4 \cdot \pi^2 \cdot 10^{-3} = 0,03848$

nos queda la llamada fórmula de Nagaoka

$$L = 0,03948 \cdot \frac{R^2 \cdot N^2}{l} \cdot k [\mu\text{Hy}; \text{cm}] \quad (3)$$

otra forma de escribirla:

$$L = \left(\frac{4 \cdot \pi^2 \cdot R}{l} \cdot k \right) R \cdot N^2 \cdot 10^{-3}$$

$$J = \left(\frac{4 \cdot \pi^2 \cdot R}{l} \cdot k \right)$$

$$L = N^2 \cdot R \cdot J \cdot 10^{-3} [\mu\text{Hy} \cdot \text{cm}] \quad (4)$$

Al factor J se lo tabula o gráfica en $f(l / D)$

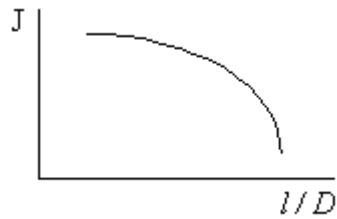


Figura 5

En caso de bobinas no muy cortas $l > 0,8 R$ puede utilizarse con un error menor del 1% la siguiente expresión de J:

$$J \cdot 10^{-3} = \frac{R}{23.R + 25.l}$$

que llevada a la fórmula (4), da la formula de **WHEELER**.

$$L = \frac{R^2 \cdot N^2}{23.R + 25.l} \quad (5)$$

La (4) y (5) son útiles para la verificación, pero no adecuadas para el proyecto, para eso modificamos la (1) multiplicando y dividiendo por l y por D .

$$L = \frac{k \cdot \pi^2 \cdot N^2 \cdot D^2}{l} 10^{-3} = \left(k \cdot \pi^2 \frac{l}{D} \right) \frac{N^2 \cdot D^3}{l^2} \cdot 10^{-3}$$

Llamando K a la cantidad entre () y N_s la relación espiras por cm, se obtiene la expresión:

$$L = D^3 \cdot N_s^2 \cdot K \cdot 10^{-3} \quad [\mu\text{Hy; cm}] \quad (6)$$

Que es la fórmula para proyecto.

Este nuevo factor K también se tabula o gráfica f (l/D)

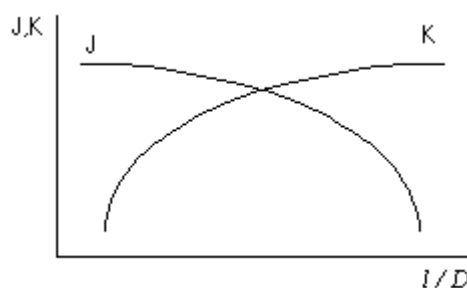


Figura 6

Capacitancia Distribuida (C_d)

Para la mayoría de los usos prácticos, se resume a interpretar como un capacitor en paralelo entre sus extremos y se evalúa por medio de ábacos.

El valor del capacitor equivalente depende fundamentalmente de la relación y de p/d . Para solenoide de l/D aproximadamente igual a 1, $C_d = D/2$ (pf) D en cm.

Cálculo de Q de un solenoide

Se verá en el proyecto, pero se anticipa que es función de la forma geométrica del inductor.

Proyecto de Solenoides

Datos:

- 1- Valor de la inductancia deseada L .
- 2- Corriente circulante I .
- 3- frecuencia f de trabajo.
- 4- el Q esperado.
- 5- Sobre elevación de temperatura Δt .

Desarrollo:

1^o - Adopción de una densidad de corriente J , normalmente se puede tomar 4 A / mm^2 , y esto debe ratificarse o rectificarse en función de la sobre elevación de temperatura.

2^o - Sección del conductor

$$S_c = \frac{I_{ef}}{J} = \frac{\sqrt{I_{cc}^2 + I_{rf}^2}}{J}$$

3^o - Determinación del diámetro del conductor d , para ello se tiene en cuenta el efecto pelicular, que es la causante en alta frecuencia de una redistribución no homogénea de I , la que se concentra en la zona de máximo campo magnético.

Para facilitar el cálculo se supone una cáscara homogénea de espesor ε :

$$\varepsilon_{cu} = \frac{6.62}{\sqrt{f[\text{Hz}]}} \quad [\text{cm}] \quad \text{factor de penetración del cobre}$$

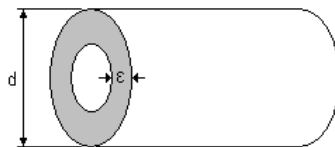


Figura 7

$$S_c = \frac{\pi \cdot D^2}{4} - \frac{\pi}{4} \cdot (d - 2 \cdot \varepsilon)^2 = \pi \cdot d \cdot \varepsilon - \pi \cdot \varepsilon^2 = \pi \cdot \varepsilon \cdot (d - \varepsilon)$$

$$\text{pero si } d \gg \varepsilon \text{ la } S_c = \pi \varepsilon d \quad \text{por lo tanto } d = \frac{S_c}{\pi \cdot \varepsilon}$$

4^o - Determinación de N_s (N / l ; espiras / cm)

Para esto es necesario fijar la separación entre espiras. Es interesante tener en cuenta cuando dos ó más conductores adyacentes circula corriente, ya que se produce una redistribución de esa corriente, afectada por los flujos magnéticos producidos por el conductor y los adyacentes, ("efecto de proximidad"). La corriente se concentra en la zona sombreado de la figura siguiente:

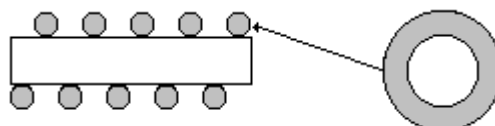


Figura 8

Ya hemos visto que, el efecto de proximidad aumenta la resistencia real de un conductor y provoca una disminución del Q.

$$Q = \frac{\omega \cdot L}{R}$$

Aumentando el paso p entre espiras, disminuye este efecto, por otro lado disminuye L. Si se aproximan aumenta L y en consecuencia R también aumenta.

Según Butterworth, para el $Q_{\text{máx}}$ la separación óptima entre espiras es:

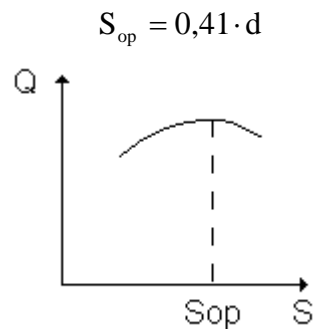


Figura 9

Y ante la imposibilidad de tomar ese valor, adoptar una separación mayor, como se ve en la gráfica el descenso de Q a la derecha lo hace más suavemente.

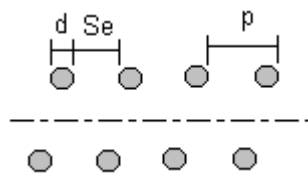


Figura 10

Sumando d y S_e , entre espiras se obtiene p

$$N = \frac{l}{S_e + d} = \frac{l}{p} \Rightarrow N_s = \frac{N}{l} = \frac{1}{p} = \frac{1}{S_e + d}$$

5º - Adopción del valor de D.

Para esto se tiene en cuenta el espacio disponible, la experiencia da como conveniente.

$$1 < \frac{l}{d} < 2$$

dentro de estos valores D conviene lo más grande posible, porque la L aumenta.

6º - Cálculo de K

$$K = \frac{L \cdot 10^3}{N_s^2 \cdot D^3}$$

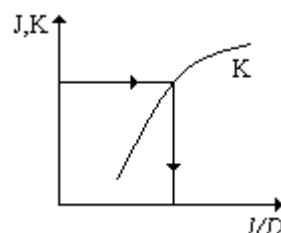


Figura 11

7º - Del gráfico obtener l / D y como consecuencia determinar l .

8º - Obtención de N .

$$N = N_s \cdot l$$

9º - Determinación de la sobre elevación de temperatura Δt .

Para ello hay que conocer la R en Radiofrecuencia, el concepto común no es válido.

$$R = \frac{\omega \cdot L}{Q}$$

El Q necesario para obtener R se expresa en función de la forma y dimensiones geométricas del solenoide.

Pero evidentemente el calculado difiere del valor Medido por el Q-metro, El calculado tiene en cuenta los efectos pelicular y proximidad. El que mide el Q-metro, contempla el resto de las pérdidas, (irradiación y si tiene soporte la dieléctrica), que disipan potencia por pero no provocan calentamiento.

El Q en función de D y l en cm.

$$Q = 8,550 \cdot \frac{D \cdot l}{102 \cdot l + 45 \cdot D} \cdot \sqrt{f(\text{Mhz})}$$

llamando Q_m (Factor de forma) al Q para una frecuencia de 1 MHz.

$$Q_m = 8,550 \cdot \frac{D \cdot l}{102 \cdot l + 45 \cdot D}$$

se tiene:

$$Q = 0,5 \cdot Q_m \cdot \sqrt{f(\text{Mhz})}$$

Q tiene varias expresiones diferentes, pero siempre en función de la geometría del solenoide.

$$Q = \frac{1080 \cdot D \cdot p \cdot \sqrt{f}}{D + 20 \cdot p}$$

f [MHz]

p [mm]

D [cm] para $f \leq f_0/10$

f_0 = frecuencia de resonancia

Fórmula de Callendar para cálculo de Q siempre que f sea mayor que 3 MHz.

$$Q = \frac{\sqrt{f}}{\frac{13,8}{D} + \frac{5,4}{l}}$$

f [Hz]

D y l [cm]

Y para $f \leq f_0/10$

Existen otras expresiones que se deberá tener cautela en cuanto al sistema de unidades adoptado porque debido a eso el cálculo es erróneo.

Otra de cuyo gráfico disponemos:

$$Q = 75 \cdot D \cdot \varphi \cdot \sqrt{f(\text{Mhz})} \quad D \text{ en cm.} \quad \cos \varphi = 1 / \sqrt{Q^2 + 1}; \quad \text{para } Q > 1$$

$$\cos \varphi \cong 1/Q$$

Retornando a Q_m dicho valor puede graficarse en función de l y D , de allí una vez obtenido el correspondiente valor de R , se calcula la potencia en vatios (W) $P = R \cdot I^2$; y los vatios necesarios a disipar por unidad de superficie, es este valor obtenido dividido la superficie que presenta la bobina a la disipación por convección.

La sobre elevación de temperatura, no deberá superar los límites prefijados, en caso de superarlo habrá que rehacer los cálculos, tomando un valor menor de densidad de corriente.

Como superficie de irradiación de calor se considera:

- La superficie exterior del conductor si el p es grande, L grande con S_e mayor que $\frac{d/2}{r_c}$, siempre que estén bobinadas sin soporte (auto sustentada).
- La superficie exterior de la bobina ($\pi \cdot D \cdot l$) cuando estén bobinados sobre una forma de material no conductor y en general cuando S_e menor que r_c .

RANGO APROXIMADO DE UTILIZACIÓN DE LOS DIFERENTES INDUCTORES

SOLENOIDES	MULTICAPA	C/ NÚCLEO FERROMAGNÉTICO
$F = 1,5$ a 200 MHz	$F = 100$ a 1.000 KHz	$F =$ audiofrecuencia
$Q = 100$ a 500	$Q = 40$ a 150	$Q = 0,5$ a 10
$L = 1$ a 500 μHy	$L = 500 \mu\text{Hy}$ a 100 μHy	$L = 1$ ó más de 100 Hy

Tabla 1

Las ferritas blandas (soft ferrites) prestan servicio desde la corriente continua a las microondas (1.000 MHz o más)

INDUCTORES MULTICAPA

Se construyen para Inductancias superiores a $150\mu\text{H}$ y para frecuencias inferiores a 1,5 MHz. Hemos visto que para un solenoide el valor de la inductancia estaba dado por

$$L = \mu_0 \cdot \frac{N^2 \cdot A}{l}$$

Vemos que si queremos aumentar L nos conviene aumentar N, pero esto nos obliga a otro tipo de formato para que las dimensiones no sean exageradas.

Formas de bobinados

El bobinado senoidal no conviene debido a que las capas forman cilindros concéntricos de cobre, esto hace aumentar la capacidad y disminuye la inductancia, esto se ve en el gráfico siguiente:

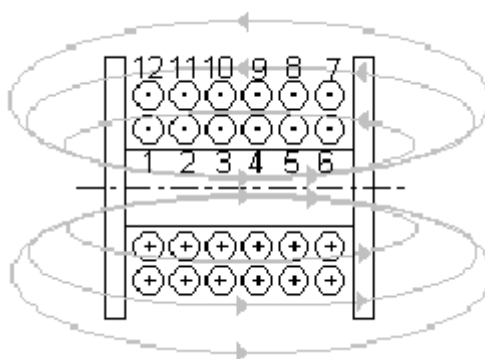


Figura 12

Para solucionar este problema de capacidades, se debe evitar que las espiras eléctricamente distantes estén juntas, para ello se hacen 3 tipos de bobinados:

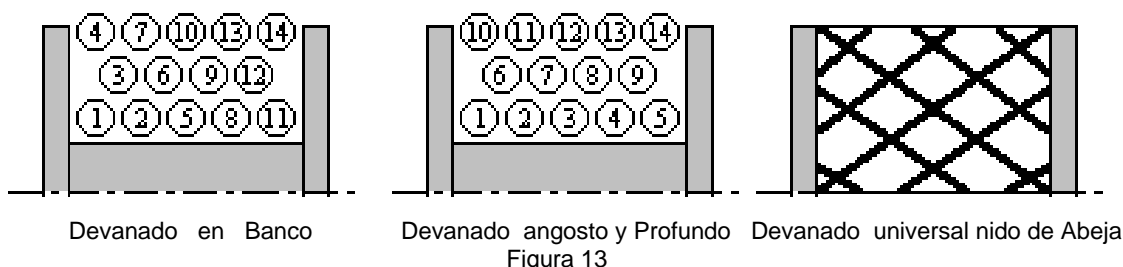


Figura 13

El devanado universal se caracteriza porque el conductor se arrolla transversalmente.

Durante el proceso de arrollamiento, un guía-hilos conduce al conductor de un lado a otro de la bobina. El conductor generalmente es delgado o de varios hilos (Litz) aislado con seda, o para facilitar la adherencia con algodón ó nylon.

Las pérdidas por corrientes inducidas en un conductor que circula una I_{CA} , pueden reducirse dividiendo al cable, de allí que se transporta a la Corriente Alterna en conductores aislados entre si, incrementando la resistencia a las corrientes inducidas, o dicho de otro modo, eliminar proximidad. Esta nueva subdivisión no es suficiente, en efecto, si los conductores son aislados y paralelos entre si con una capa de aislación de espesor despreciable, el conjunto tendrá las mismas pérdidas que si el conductor fuera sólido.

Un alambre Litz, debe diseñarse de manera tal que no puede circular corriente de un conductor a otro, de manera que cada uno permita circular una cantidad igual de corriente respecto a la corriente total.

Esto puede lograrse entrelazando y retorciendo los alambres aislados de manera que cualquier par de ellos sean sucesivamente transpuestos relativamente al campo magnético que es producido por las corrientes inducidas. Este campo puede suponerse producido por dos componentes, un campo concéntrico causado por la corriente circulante en el conductor y un campo perpendicular, causado por la corriente circulante en todas las otras espiras de la bobina, construida con dicho cable. El número de conductores depende de la frecuencia y de los resultados

que se pretendan, pudiendo en algunos casos llegar al centenar, para usos comunes se usan de 4 a 7 hilos. Además se los usa con éxito hasta unos 2 MHz, con lo cual lo hace ideal para la construcción de inductores multicapa.

Otra característica del conductor es que debe ser de bajas pérdidas y pueda doblarse fácilmente.

La forma sobre la que se devana el inductor es generalmente resina prensada, cartón baquelizado, porcelana no esmaltada, etc.

En este tipo de arrollamiento los contactos entre espiras se reducen a puntos, con la consecuente disminución de las pérdidas y elevación del Q.

Las características que deben reunir los conductores los inductores con devanado universal son:

- 1) Pequeña capacidad distribuida.
- 2) Elevado Q.
- 3) Buena rigidez mecánica.

Si se subdivide el arrollamiento en secciones, se obtiene una mayor disminución de la capacidad distribuida, un aumento del Q y la posibilidad de una regulación del valor de la inductancia.

Al realizar el arrollamiento se puede desplazar al conductor de un lado a otro 1, 2 y 3 veces por vuelta de la forma, pero se debe tener en cuenta que el comienzo y el final de cada espira no coincidan, pues, sino las sucesivas espiras estarían superpuestas. Estas deben terminar antes ó después del comienzo; si terminan antes el devanado se llama RETROGRESIVO, si termina después, se llama PROGRESIVO. El ángulo puede variar dentro de amplios márgenes, además conviene que la separación entre conductores sea del 25% del diámetro de los mismos.

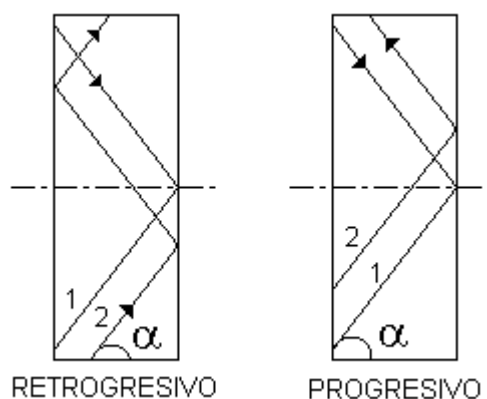


Figura 14

Existen diversas fórmulas para calcular los inductores multicapas, una de ellas es la que nos da el manual de Therman (Pág. 61), y es:

$$L = \frac{l^{5/3}}{d^{2/3}} \cdot I [\mu\text{Hy}]$$

l = longitud total del conductor.

d = distancia entre centro de los conductores adyacentes (pulg.)

I = factor de corrección que se obtiene del siguiente gráfico.

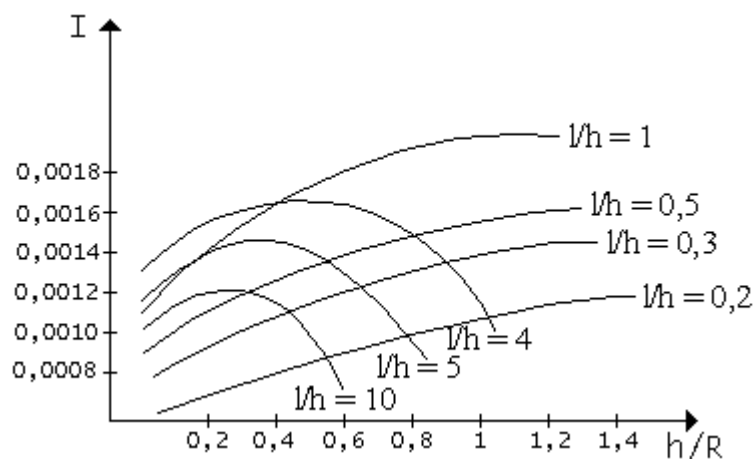


Figura 15

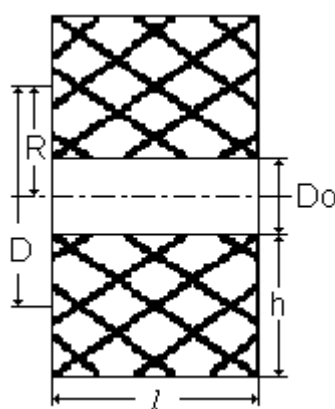


Figura 16

D_0 = Diámetro interior de la forma

D = Diámetro medio de la bobina

R = Radio medio de la bobina

h = Espesor radial de la bobina

l = Longitud entre ejes de conductores extremos o carrera del bobinado.

Del gráfico anterior surge que la inductancia máxima se obtiene (para una longitud dada del conductor) cuando la sección es cuadrada y el lado de la misma es 0,662 del radio medio, o sea que las relaciones óptimas son:

$$l = h \cdot 0.662 \cdot R$$

Otra manera de calcular la inductancia es mediante la fórmula de Wheeler:

$$L = \frac{D^2 \cdot N^2}{38 \cdot D + 114 \cdot l + 127 \cdot h} [\mu\text{Hy}] ; D, h, l (\text{cm})$$

Otra sería:

$$L = \frac{0,2 \cdot D^2 \cdot N^2}{7,6 \cdot D + 22,8 \cdot l + 25,4 \cdot h}$$

Esta fórmula está dentro del 1% de la tolerancia cuando se cumplen las relaciones óptimas entre l , h y D .

Las fórmulas anteriores son útiles para la verificación y el cálculo de la inductancia de inductores ya construidos, pero no son prácticas para el diseño. Para este caso se puede obtener

una fórmula que permita resolver fácilmente el problema partiendo de la fórmula para inductores de una capa:

$$L = J \cdot N^2 \cdot R$$

Pero teniendo en cuenta que J no va a ser función solamente de l / D como en los de una sola capa, sino también de h / l , llamando $p = l / D_0$ y $q = h / l$ se tiene:

$$L = J(p, q) \cdot N^2 \cdot R$$

Si m es el número de capas y n_c es el número de espiras por capa, se tiene $N = m \cdot n_c$ pero por otro lado es $m = h / d_c$ donde d_c es el diámetro del conductor con aislación y cubierta, o sea:

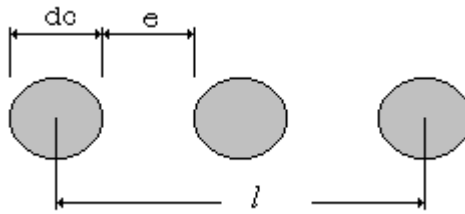


Figura 17

para $e = 0,25 \cdot d_c$
y e = separación entre espiras

Siendo:

$$N = m \cdot n_c = \frac{h}{d_c} \cdot \left(\frac{l}{d_c + e} + 1 \right)$$

Donde l es equivalente a c y es la carrera.

Además:

$$R = \frac{D_0 + h}{2}$$

Reemplazando, multiplicando y dividiendo por l^3 tengo el valor de L dado donde:

$$L = \frac{J(p, q)}{2} \cdot \frac{1}{d_c^2} \cdot \frac{h^2}{l^2} \cdot \left(\frac{l}{d_c + e} + 1 \right)^2 \cdot \frac{D_0 + h \cdot l^3}{l}$$

$$\frac{D_0 + h}{l} = \frac{D_0}{l} + \frac{h}{l} = \frac{1}{p} + q$$

Reemplazando lo anterior en la ecuación de L obtengo:

$$L = \frac{J(p, q)}{2} \cdot q^2 \left(\frac{1}{p} + q \right) \cdot \left(\frac{l}{d_c + e} + 1 \right)^2 \cdot \frac{l^3}{d_c^2}$$

Llamando:

$$M = \left[\frac{J(p, q)}{2} \cdot q^2 \cdot \left(\frac{1}{p} + q \right) \right]$$

Y como en la práctica es $e = 0,25 \cdot d_c$, nos queda:

$$L = M(p, q) \cdot \left[\frac{l}{1,25 \cdot d_c} + 1 \right]^2 \cdot \frac{l^3}{d_c^2} \quad \text{Donde } l \text{ es equivalente a } c \text{ (carrera)}$$

Se pueden graficar los valores de $M = f(p)$ con q como parámetro.

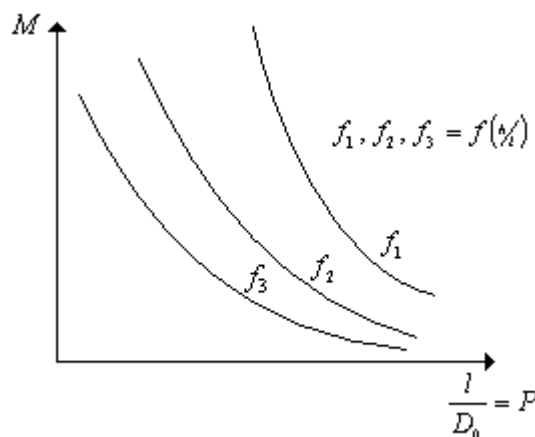


Figura 18

Se advierte que en la fórmula no aparece el número de espiras N , el diámetro es el bruto con aislación y la separación $e = 0,25 \cdot d_c$, además las medidas son en cm.

Verificación de inductores multicapa

Para esto se puede utilizar cualquiera de las ecuaciones planteadas. En el caso de tener que determinar el número de espiras de un inductor se procede de la siguiente forma:

Se coloca en un núcleo la bobina cuyo número de espiras se quiere determinar y otra bobina con un número de espiras conocido, luego se aplica una tensión conocida E_c a una de ellas y se mide con voltímetro de alta impedancia la tensión E_d que aparece en los bornes de la otra. Entonces la relación de tensiones será igual a la relación del número de vueltas, o sea:

$$\frac{E_d}{E_c} = \frac{N_d}{N_c}$$

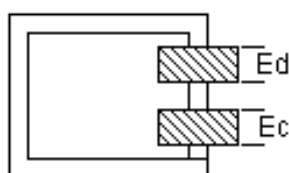


Figura 19

Proyecto de inductores multicapa

Los datos necesarios son:

Datos principales:

- 1) Valor de la inductancia L
- 2) Corriente circulante I
- 3) Frecuencia de trabajo f

Datos complementarios:

- 1) Q esperado (entre 100 y 200)
- 2) Sobre elevación de temperatura

Una vez determinados los datos, con la expresión:

$$L = M(p, q) \left[\frac{l}{1,25 \cdot d_c} + 1 \right]^2 \frac{l^3}{d_c^2}$$

Y con el gráfico de M en función de p y q puedo obtener el valor de L. Se debe tener en cuenta que cuando estas bobinas se usan como choque, por ellas no circula corriente alterna, sino solamente continua, es decir que hay una distribución uniforme de corriente en el conductor.

Cuando se los utiliza con frecuencias del orden de 1 MHz o menores, el error que se comete, sino se tiene en cuenta el efecto pelicular, es del orden del 3% al 5%, error en general aceptable en un proyecto de este tipo.

Desarrollo:

1^o) Se adopta una densidad de corriente J normalmente de 2 A / mm² y este valor debe ratificarse ó rectificarse en el análisis final de sobre elevación de temperatura.

2^o) Determinación de la sección y el diámetro del conductor

$$\text{Secc.} = \frac{I}{J} = \frac{\pi \cdot d_{cm}^2}{4} \Rightarrow d_{cm} = \sqrt{\frac{4 \cdot \text{Secc}}{\pi}}$$

con d_{cm} entro en la tabla, se debe tener en cuenta que $d_c = d_{cu} + \text{aislación y cubierta}$.

3^o) Adopción de D_0 y un valor de l , para esto se adoptan valores tentativos de D_0 y l , que se ratifican o no según los resultados del paso 5, como referencia conviene que sea del orden de $1,5 = l / D_0 = p$

$$D_0 = 1" \cong 25\text{mm}$$

4^o) Cálculo del valor de M, este lo obtengo de la fórmula:

$$M = \frac{L}{\left(\frac{l}{1,25 \cdot d_c} + 1 \right)^2 \cdot \frac{l^3}{d_c^2}}$$

5^o) Obtención del valor de h, para esto se entra en el gráfico con los valores p y M, obteniendo $q = h / l$. Conviene recordar que h / R esté entre 0,6 y 0,8, si el valor obtenido no es conveniente, puede reverse el paso 3.

6^o) Cálculo de la sobre elevación de temperatura. Para esto es necesario conocer la longitud total del conductor y luego la resistencia total.

Long. del conductor = $\pi (D_0 + h) \cdot N$ Donde $D_0 + h$ es el diámetro medio

Luego se calcula la potencia disipada $W = R \cdot I^2$ y en base a la superficie de transmisión de calor se determina la sobre elevación de temperatura. Como superficie de transmisión puede tomarse las superficies verticales, las que dependen de la ubicación de la bobina. En todos los casos el criterio juega un rol muy importante en el diseño del inductor.

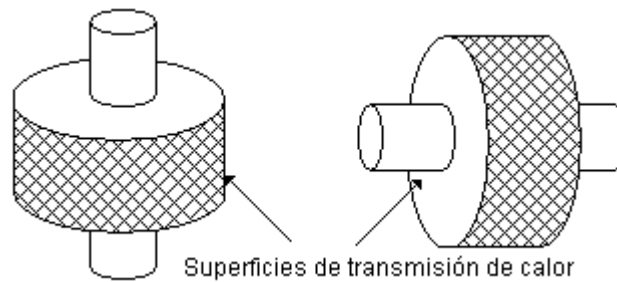


Figura 20

Otra forma de dar los datos:

Los datos se pueden presentar de la siguiente forma:

- 1) Valor de inductancia L
- 2) Valor de la corriente continua I_{cc}
- 3) Valor de la corriente de radiofrecuencias I_{RF}
- 4) La frecuencia

Datos complementarios:

- 1) Valor de Q esperado
- 2) Sobre elevación de temperatura

Hay que tener en cuenta en este caso que el valor eficaz de la corriente viene dado por:

$$I_{ef} = \sqrt{I_{cc}^2 + I_{rf}^2}$$

Con la corriente puedo determinar la sección con la relación:

$$S_{cu} = \frac{\pi \cdot d_c^2}{4}$$

Verificación del Q :

Sabemos que el Q viene dado por $Q = \omega \cdot L / R_{ef}$

En esta necesitamos determinar R_{ef} , se procede en forma inversa que en los solenoides, pues aquí el efecto de proximidad es reducido dado que las frecuencias de trabajo son bajas. El cálculo de R_{ef} lo haremos en base a la espira media, la que será:

$$2 \cdot \pi \cdot R \cdot N = \text{long. del alambre}$$

como conocemos d_c y de la tabla correspondiente extraemos el valor de la resistencia en Ω / Km entonces obtengo R_{cc} con:

$$R_{cc} = 2 \cdot \pi \cdot R \cdot N \cdot \text{Res}[\Omega/\text{Km}]$$

con este valor, en las tablas ó gráficos de Terman Pág. 31 se efectúa la corrección para corriente alterna:

$$\frac{R_{ca}}{R_{cc}} = f(x) \quad \text{ó} \quad \frac{R_{ca}}{R_{cc}} = f(1 - F)$$

Con el valor de R_{ef} así obtenido se calcula el Q; el Q esperado en estos inductores es del orden de 100 a 120.

Verificación de Δt :

La corriente total es:

$$I = \sqrt{I_{cc}^2 + I_{rf}^2}$$

El término I_{rf} puede depreciarse en algunos casos, si no es muy significativo comparado con I_{cc} , entonces puedo poner:

$$W = I^2 \cdot R_{ef}$$

Entonces conociendo la superficie de disipación (depende en cada caso de la posición de la bobina) se determina W / dm^2 , y con las curvas se determina el Δt .

Calculo de la capacidad distribuida:

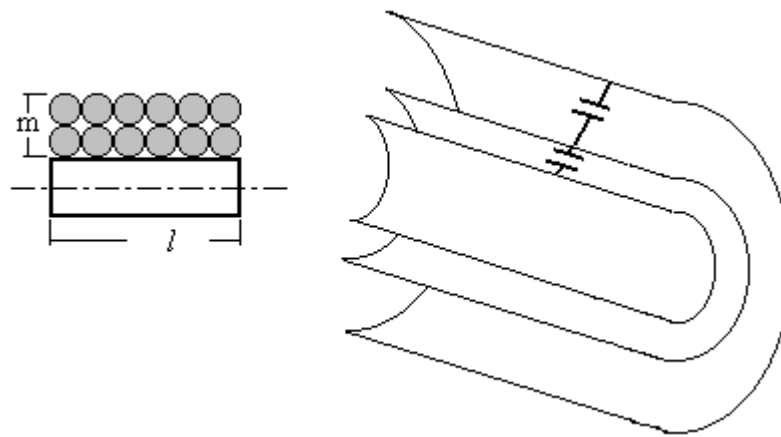


Figura 21

Cada capa puede considerarse como verdaderos capacitores, la energía total almacenada es:

$$W = \frac{1}{2} \cdot C_t \cdot E_t^2$$

La energía almacenada por una capa con respecto a la contigua depende de la capacidad C_l promedio de dos cilindros, la tensión aplicada será E_t / m , además el número de capacitores que existen es $(m - 1)$, entonces:

$$W = \frac{1}{2} \cdot C_t \cdot E_t^2 = \frac{1}{2} \cdot C_l \left(\frac{E_t}{m} \right)^2 \cdot (m-1) \quad \text{donde} \quad C_t = C_l \cdot \frac{m-1}{m^2}$$

Además

$$C_l = E \cdot \frac{S}{d} = E_0 \cdot E_r \cdot \frac{D \cdot l}{\frac{h}{m-1}}$$

E_r es la que corresponde a la aislación de alambre

El valor así calculado puede obtenerse como máximo, pues la real será menor dado que el cálculo lo hemos hecho como si el bobinado fuera senoidal.

Consideraciones constructivas

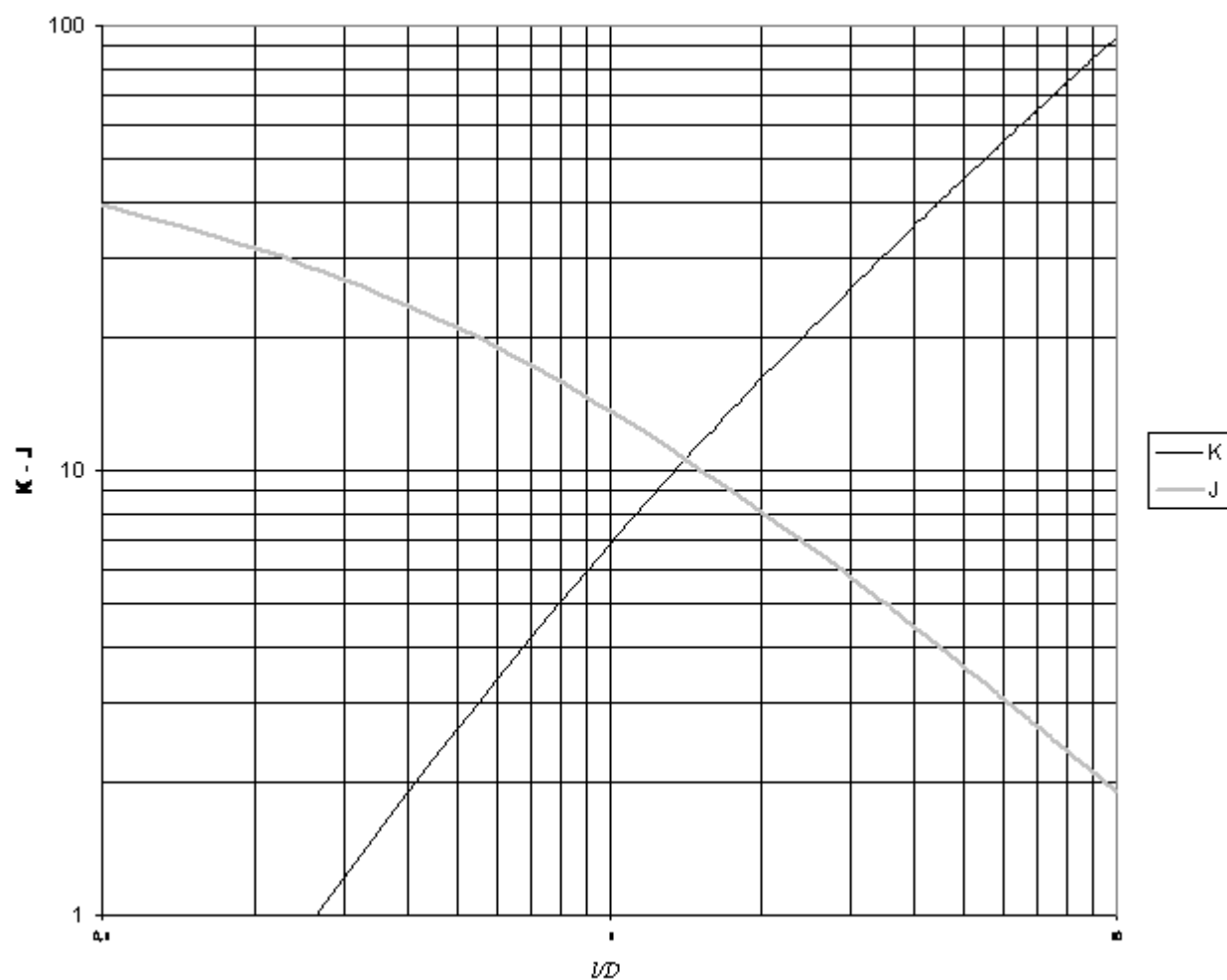
Es conveniente someter a las bobinas ya terminadas a temperaturas de 80 °C a 90 °C (en un horno), con el objeto de eliminar la humedad, luego se las impregna en aceite o barniz sintético durante espacio de una ó dos horas.

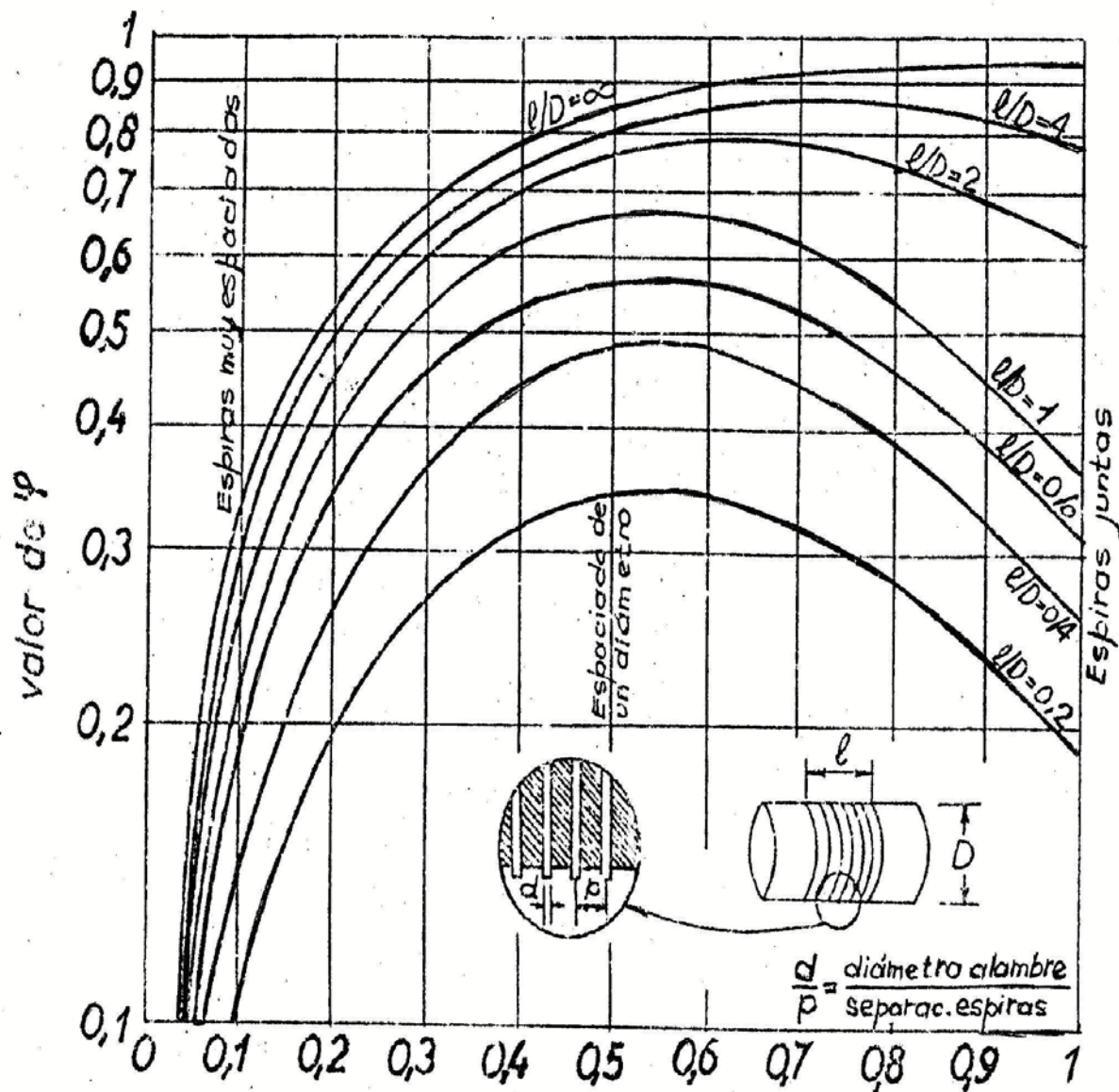
Es conveniente también extraer el sobrante, por ejemplo provocando vacío. El impregnante debe ser de tal calidad que no provoque caídas en el Q de la bobina.

BIBLIOGRAFÍA

- Manual Radiotron.

PROYECTO DE SOLENOIDES (GRAFICAS)





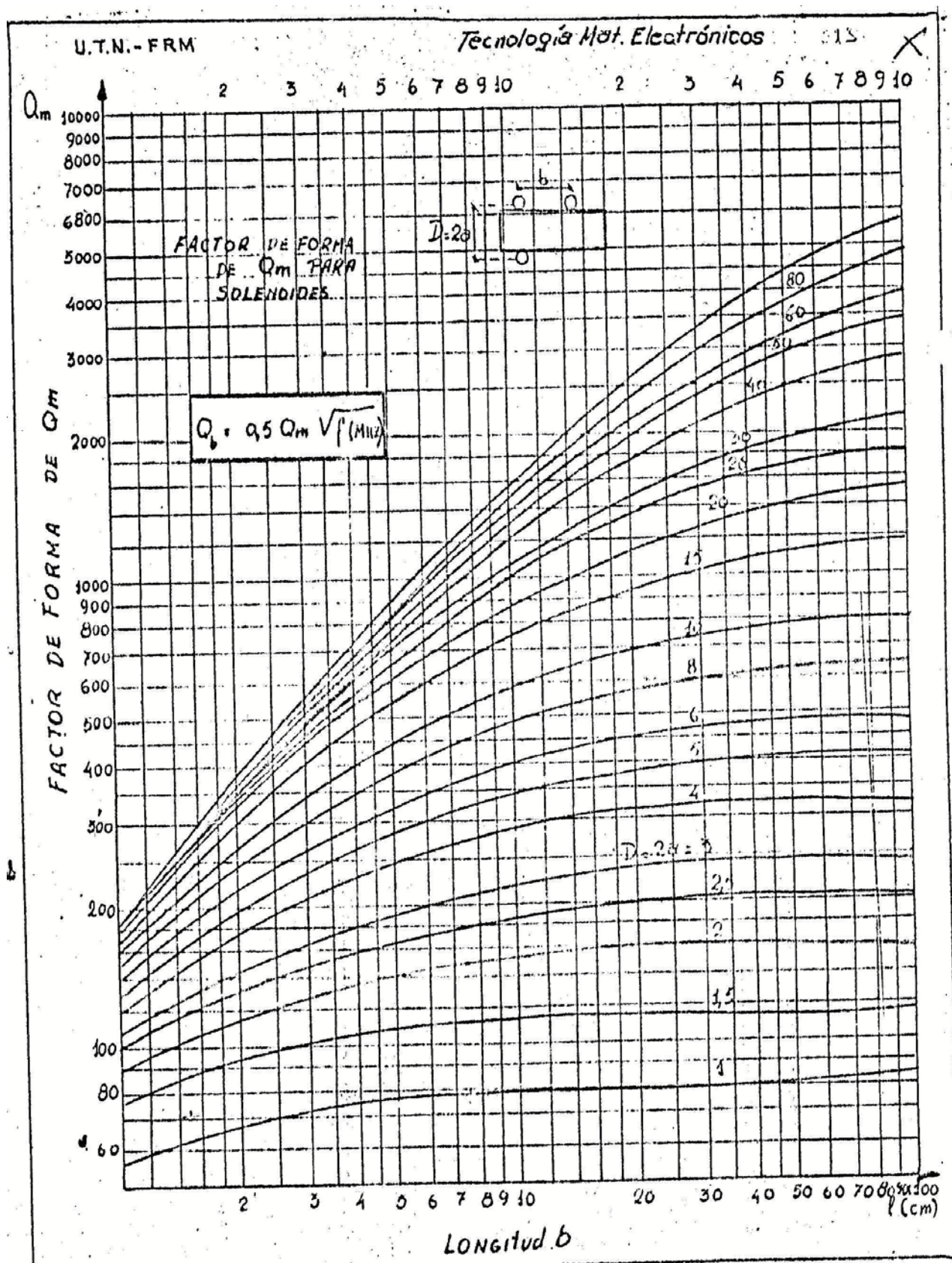
$$Q = 75 D \psi \sqrt{f}$$

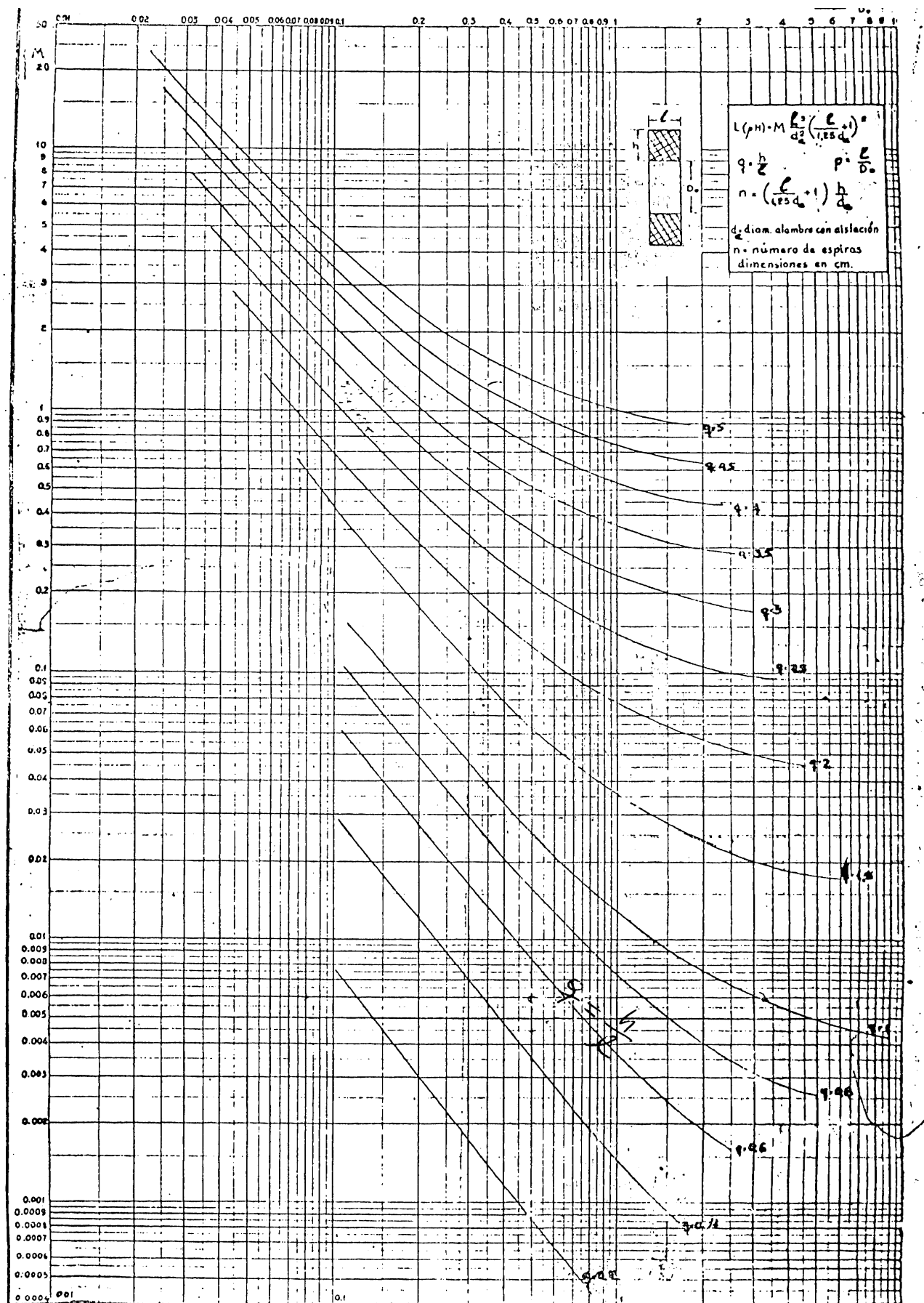
D = diámetro de la bobina (cm)

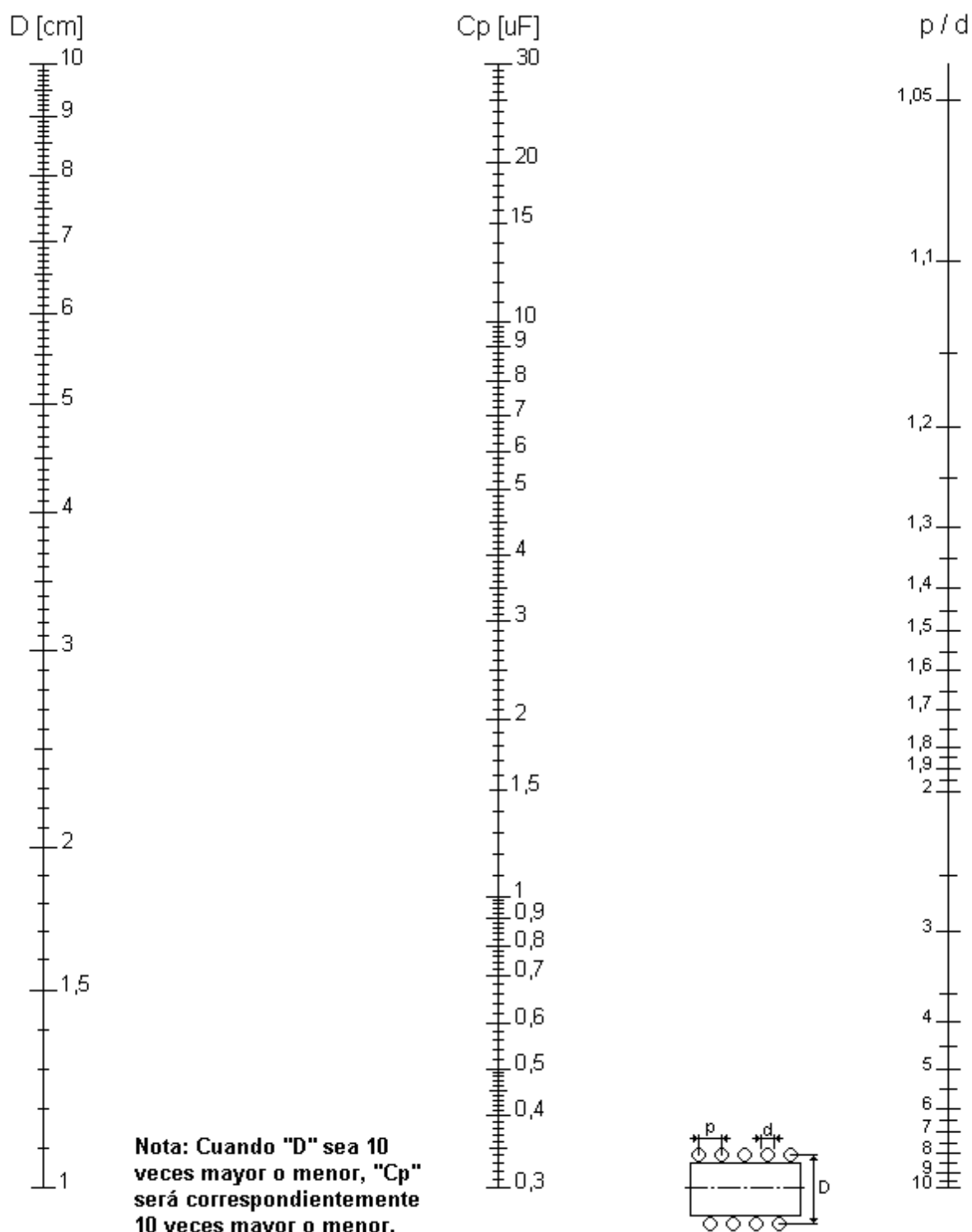
ψ = coeficiente (ver gráfico)

f = frecuencia en Megaciclos

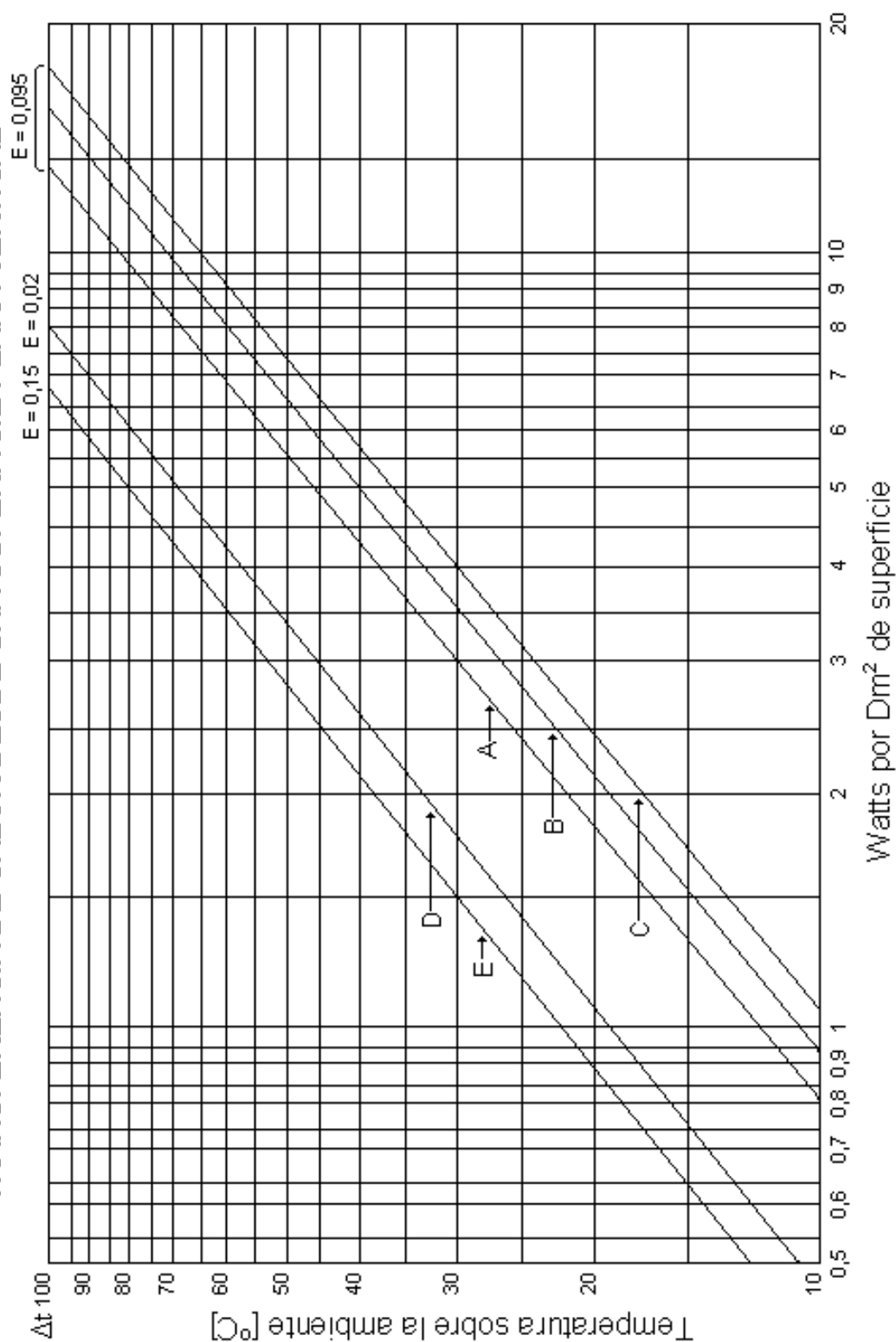
El Q así obtenido es el determinado por las pérdidas en el inductor, causadas por los efectos pelicular y de proximidad. Por lo tanto, no se tiene en cuenta las pérdidas dieléctricas que pueden producirse en la forma o soporte del inductor o en el aislamiento del arrollamiento. En general, si la forma es de buena calidad y el ambiente no es excesivamente húmedo, las pérdidas dieléctricas no son importantes y pueden despreciarse.







TRANSFERENCIA DE CALOR DESDE UNA SUPERFICIE PLANA VERTICAL



Usar "A" para 0°C Temperatura Ambiente, Superficie de Color Oscuro
 Usar "B" para 25°C Temperatura Ambiente, Superficie de Color Oscuro
 Usar "C" para 50°C Temperatura Ambiente, Superficie de Color Oscuro
 Usar "D" para 25°C Temperatura Ambiente, Superficie de Cobre Pulido
 Usar "E" para 25°C Temperatura Ambiente, Superficie de Plata Pulida