

## Algunas consideraciones sobre bobinas

¿Qué sabemos de las bobinas?

Generalmente a esta pregunta se responde sucintamente ya que este dispositivo no es nuevo para el radioaficionado.

: "Para adaptar una antena o hacer un acoplador o un filtro,..."

Cualquiera sabe que enrollando un hilo metálico sobre una forma, normalmente cilíndrica, se obtiene una bobina. Y que esa bobina tendrá una inductancia y ofrecerá una reactancia (resistencia a la corriente alterna) a una frecuencia determinada.

Bueno. Aquí vamos a escudriñar un poco más en el interior de esos dispositivos y descubriremos algunos conceptos nuevos que caracterizan a una bobina o inductor.

La figura 1 muestra los parámetros físicos que describen a una bobina.

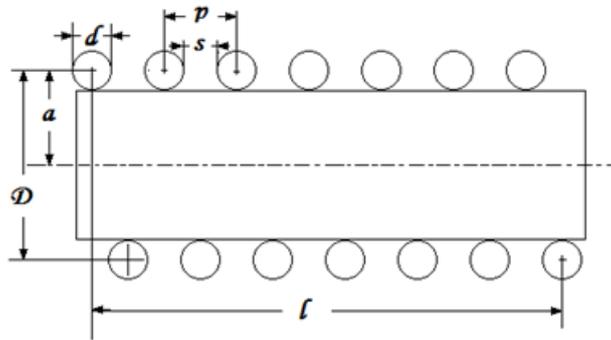


Fig. 1

En la cual,

$d$  Es el diámetro del hilo

$s$  Es la separación entre espiras

$p$  Es el paso de la hélice que forman las espiras "pitch"

$a$  Es el radio del inductor (desde el centro del conductor al eje de la forma)

$D$  Es el diámetro de la bobina (entre centros del conductor)

$l$  Es la longitud de la bobina (entre centros del conductor)

La formulación para calcular la inductancia que presenta una bobina a partir de estas dimensiones es muy variada, según el investigador que la haya deducido y todas ellas tienen unos condicionantes en lo que respecta a la relación diámetro/longitud.

Así podemos ver como ejemplo,:

Fórmula de Wheeler

$$L = 0'394 \frac{a^2 N^2}{9a + 10l} \mu H$$

Con un error del 1% para relaciones  $D/l < 3$  o sea para bobinas que tengan un diámetro hasta tres veces mayor que su longitud, lo cual es válido para la mayoría de bobinas que por el contrario, suelen tener su longitud, mayor que su diámetro.

Esnault-Pelteire.-

Esta es una aproximación a la anterior

$$L = 0'0397 \frac{N^2 a^2}{0'92a + l} \mu H$$

Válida para relaciones de  $D/l$  entre 0'2 y 1'5 con un error del 0'1%

Otras fórmulas contemplan un factor de corrección "K" y el "factor de forma F" que dependen también de la relación  $D/l$

Por otra parte, La inductancia así calculada también está afectada por la frecuencia de trabajo, de tal manera que esta inductancia se convierte en una "inductancia efectiva"  $L^*$ .

Así,

$$L^* = \frac{L}{1 - 10^{-6}(2\pi F)^2 L * Cd} \mu H$$

Aquí aparece el término "Cd" que se refiere a la capacidad distribuida de la cual hablaremos más adelante.

En la fórmula,

La frecuencia F, viene en MHz y

La capacidad distribuida, Cd, en pF

La operación inversa es el cálculo del número de espiras necesario para diseñar un inductor a partir de una inductancia prefijada y con un conductor y una forma de soporte con unos diámetros determinados.

Podemos usar este procedimiento

Primero averiguaremos el número de espiras "n" que cabe en un cm.

$$n = \frac{10}{2d}$$

Hacemos  $X = \frac{50}{nD^2}$  y aplicamos:

$$N = LX \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{23}{\frac{D}{2} LX^2}} \right)$$

Siendo:

d= diámetro del hilo en m/m

L.- inductancia requerida en  $\mu\text{H}$

D.- diámetro de la bobina entre centros del conductor en cm.

O también esta fórmula

$$N = \sqrt{\frac{1000 * l * L + 450LD}{D^2}}$$

En la que  $l$  y  $D$  vienen dados en m/m y  $L$  en  $\mu\text{H}$ .

Cualquiera de las dos da resultados con suficiente aproximación.

### **Resistencia óhmica de un inductor a la RF.**

Es bien sabido que la resistencia que ofrece un conductor eléctrico al paso de la corriente alterna es diferente que la ofrecida cuando la corriente es continua y que además aumenta en función de la frecuencia. Esto es debido al "efecto piel" o efecto pelicular, dado que la corriente tiende a circular cerca de la superficie del conductor.

Ahora bien. La resistencia a la RF ofrecida por un conductor rectilíneo y cilíndrico de cobre, se determina por esta fórmula condensada.

$$R_{RF} = \frac{l * \sqrt{F}}{24a}$$

Siendo

$l$  la longitud del conductor en metros

F la frecuencia en MHz

a= radio del conductor en m/m.

Pero cuando este conductor lo enrollamos para formar una bobina, esta resistencia aumenta drásticamente debido a una serie de parámetros a considerar como son:

El efecto de proximidad.-

La existencia de conductores situados muy próximos y paralelos, transportando corriente en el mismo sentido, como en el caso de una bobina, hace que el campo magnético generado por un conductor, se vea afectado por los adyacentes resultando un campo efectivo modificado que da lugar a un aumento a la resistencia a la RF que tendría si estuviera aislado como señalábamos al principio.

Capacidad distribuida.-

La proximidad entre las espiras de un inductor y de las espiras a tierra, da lugar a la aparición de una capacidad entre ellas, cuya combinada se convierte en una capacidad efectiva en paralelo con la bobina. También afecta a la resistencia efectiva de la bobina. Es función de la relación  $p/d$  (paso de la hélice y diámetro del conductor). Se determina mediante ábacos o experimentalmente.

La coexistencia de la inductancia de la bobina y la capacidad distribuida en paralelo con ella, da lugar a que a determinada frecuencia, la bobina se convierta en un circuito resonante en paralelo. A esa frecuencia, la bobina está en "auto-resonancia". Algunos diseñadores, aprovechan esta circunstancia para construir trampas de onda sin utilizar capacidades externas. Elevando esa frecuencia, se llega a otra, en que la bobina se convierte en una capacidad (presenta una reactancia resultante de carácter capacitivo).

Entorno.-

Es otra circunstancia que puede modificar el campo de la bobina, por cercanía de objetos metálicos sensibles al campo magnético, afectando también a la resistencia y capacidad distribuida.

Suponiendo aislada de perturbaciones, podemos ver en la siguiente gráfica (Figura 2) cómo afecta la proximidad de las espiras a la resistencia de la bobina en función de su resistencia si el conductor empleado no estuviera enrollado.

Factor multiplicador de la resistencia pelicular de un conductor rectilíneo a la RF, cuando este se enrolla en forma de bobina en función del diámetro del conductor  $d$  y del paso de hélice de la bobina  $p$

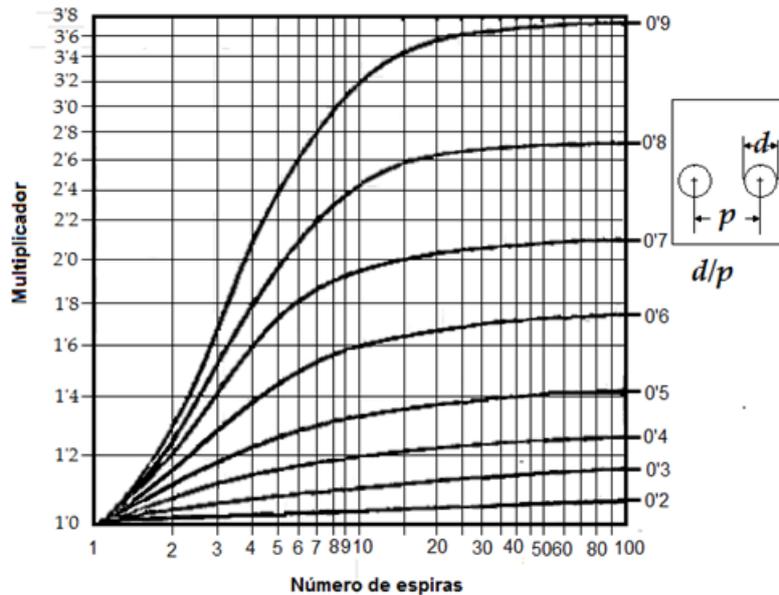


Fig. 2

Aquí podemos ver que por ejemplo, con 20 espiras prácticamente juntas  $d/p = 0.9$  la resistencia de la bobina sería la de la longitud del conductor recto, multiplicada por 3.6.

También podemos observar en la condición usada más comúnmente, que la resistencia de un arrollamiento con espiras separadas una distancia igual a su diámetro, ( $d/p = 0.5$  ó  $s=d$ ) la resistencia es 1.4 veces (aprox.) la del mismo hilo, recto (entre 20 y 100 espiras. Depende del número de espiras que tenga la bobina). Esta resistencia se suele determinar a partir de un Q o factor de mérito de la bobina estimado a su vez y de la reactancia que presente a la frecuencia de interés, como vemos a continuación..

#### Factor de mérito o Q de un inductor.-

La resistencia óhmica de una bobina a la RF es una resistencia en serie con la inductancia pura, de tal manera, que el circuito equivalente de un inductor en el campo de la RF es el de la figura 3

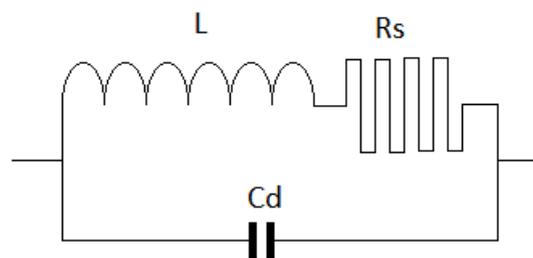


Fig. 3

La presencia de esta resistencia es algo indeseado que degrada la calidad de la bobina y se llama factor de mérito o "Q" a la relación entre la reactancia que presenta la inductancia de la bobina y esta resistencia en serie.

$$Q = \frac{2\pi FL}{R_s}$$

El Q depende de la frecuencia, como depende la reactancia de la bobina y la propia resistencia, como hemos visto anteriormente. Así, cuanto menor sea la  $R_s$  frente a la reactancia más alto será el Q y mayor la calidad de la bobina.

A fin de conseguir una bobina con un alto Q, el diseñador deberá procurar el empleo de un conductor suficientemente grueso, para minimizar en lo posible la resistencia a la RF del mismo, así como un paso de la hélice adecuado para minimizar la capacidad distribuida ( $p \Rightarrow 2d$ ) y el efecto de proximidad.

La determinación de este valor es una tarea algo imprecisa debido a la cantidad de condicionantes presentes.

Una fórmula generalista puede ser:

$$Q = \frac{\sqrt{f}}{\frac{6'9}{a} + \frac{5'4}{l}}$$

$a$  (radio de la bobina) y  $l$ , su longitud en cm

$f$  en Hz

O esta otra:

$$Q = 0'15 \sqrt{f \left( \frac{1}{a} + \frac{1}{l} \right)}$$

Para  $l > a$

Y además se debe cumplir que la relación  $d/p$  sea

De 0'5 a 0'7 para  $l \leq a$

De 0'6 a 0'8 para  $l \cong 4a$

De 0'75 a 0'9 para  $l \gg a$

De todas formas, para cálculos prácticos, el diseñador suele tomar valores estimados. Así para bajas frecuencias (hasta 1 MHz) suele estimar un valor de 300 y para más altas frecuencias, lo estima en 200.

Una vez determinado (o estimado el Q), la resistencia (total) de la bobina a la frecuencia de trabajo, tendrá un valor también estimado:

$$R_s = \frac{2\pi FL}{Q}$$

De todas formas ante la dificultad del cálculo preciso del Q así como de la resistencia, podemos recurrir a su medición mediante el dispositivo adecuado ("Q-metro").

### **La bobina en un circuito resonante.**

La asociación de una inductancia y una capacidad en serie o en paralelo, da lugar a que a determinada frecuencia, las reactancias que presenten sean iguales y como son de signo opuesto, se anulen, presentando en un caso con su disposición en serie, un cortocircuito (teórico) y en el otro dispuestas en paralelo, una impedancia infinita (teórica). Esa condición se llama de "resonancia".

En la práctica, habrá que tener en cuenta la resistencia en serie de la bobina en las condiciones explicadas anteriormente, por la que el conjunto inductancia-capacidad presentará un Q en resonancia, que determinará un ancho de banda en el que consideraremos que las características de dicho conjunto no varían; mantendrá su "cortocircuito" en el caso de disposición en serie, o su alta impedancia en su disposición en paralelo. En la práctica, el cortocircuito de la disposición en serie, no es tal, debido a la presencia de la resistencia de la bobina en serie con ella. Esa resistencia en serie junto con la reactancia en resonancia de la bobina, determina el Q del circuito como hemos visto anteriormente. El ancho de banda, es aquel tramo de frecuencia en que los límites están marcados por la caída a su valor  $\frac{1}{\sqrt{2}}$  (ó 0'7 veces), de la corriente en el caso de la disposición en serie, o de la tensión en la condición de paralelo.

$$\Delta F = \frac{F_0}{Q}$$

Siendo  $\Delta F$ , el ancho de banda y  $F_0$  la frecuencia de resonancia.

### **La Bobina y la frecuencia de la corriente que la atraviesa.**

El comportamiento de una bobina difiere si consideramos la frecuencia de la corriente que discurre a través de ella.

Cuando la frecuencia es cero, como en el caso de la corriente continua, el campo magnético creado es fijo y no produce ningún efecto secundario excepto la resistencia óhmica que presente la longitud de hilo empleada en su arrollamiento. Si este arrollamiento, abraza un cuerpo de naturaleza ferromagnética, se constituirá un imán permanente o no, según dicha naturaleza (por ejemplo acero o hierro).

Si la corriente que atraviesa la bobina es alterna, el campo magnético creado es variable y se producirán fenómenos de inducción, como es el caso de los transformadores. Por otra parte, si la corriente es de baja frecuencia (hasta unas decenas de Kilociclos), la bobina se comporta casi como si la corriente fuera continua, salvo que el campo magnético produce fenómenos de inducción de corriente en otros conductores cercanos y ofreciendo al circuito eléctrico en el que esté instalada,

además de su resistencia óhmica con un valor prácticamente igual al que ofrece en corriente continua, otra resistencia "virtual", llamada "reactancia inductiva" representada por la letra "X", que se suma vectorialmente a la resistencia pura anteriormente aludida estando los dos vectores desplazados 90º, según se puede ver en la figura 4.

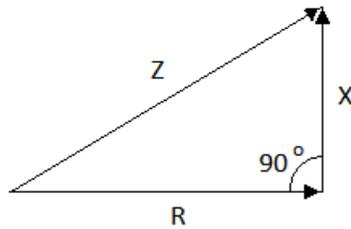


Fig 4

La combinación resultante de esta resistencia y reactancia, es otra "resistencia" que recibe el nombre de "Impedancia" de la bobina y se representa por la letra "Z"

$$[\text{Resistencia pura (R)+ Reactancia (X) = Impedancia(Z)}]$$

(Recordemos que esta suma es vectorial como se ve en la figura 4)

Un circuito serie, tiene su disposición equivalente paralelo de tal manera como se ve en la figura 5

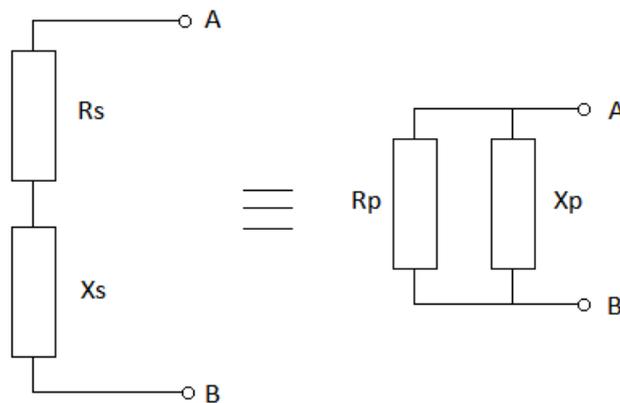


Fig. 5

De tal manera, que se cumple, que los valores paralelos equivalentes Rp y Xp valen,

$$Rp = \frac{R_s^2 + X_s^2}{R_s}$$

$$Xp = \frac{R_s^2 + X_s^2}{X_s}$$

Con estas igualdades, las impedancias presentes en los puntos A y B, son iguales por lo que para determinados cálculos, es útil el intercambio de ambas equivalencias.

Cuando la frecuencia de la corriente, alcanza valores elevados, sobre todo valores de Radiofrecuencia, la bobina se comporta además como una guía de ondas helicoidal con los siguientes efectos respecto a las bajas frecuencias:

Aumenta la resistencia por el efecto pelicular y la capacidad distribuida y el efecto de proximidad de las espiras como hemos visto anteriormente.

Si el conductor tiene sección circular, existe un factor de corrección de su inductancia debido a la deformación del campo magnético.

Ofrece un apreciable retardo a la velocidad de propagación de la corriente a través de ella.

En su analogía como guía de ondas, es un elemento de línea de transmisión con un factor de propagación " $\beta$ " medido en radianes/metro, una longitud angular medida en radianes y una impedancia característica como corresponde a una línea de transmisión.

Todos estos parámetros los podemos hallar mediante un programa de cálculo, que es el más preciso al que podemos tener acceso y es de libre disposición y que tiene en cuenta todos los factores de corrección aludidos anteriormente. Está disponible en la red gracias a la gentileza de Serge Stroobandt ON4AA en su WEB

<http://hamwaves.com/antennas/inductance.html>.

Con todo lo expuesto anteriormante, y aunque la literatura existene acerca de este tema es extensísima, creo que hemos hecho un repaso suficiente a todos los parámetros que intervienen en el funcionamiento de una bobina que nos ayudan a una mejor comprensión de su función en un circuito eléctrico.

EA5ND (ex EA5BWL)