**Diseño básico de bobinas**

Alba Rodríguez Lorente, 2022

El diseño de componentes magnéticos presenta una cierta complejidad derivada del hecho de tenerse *infinitas* combinaciones de parámetros de diseño (grados de libertad), que producen un componente con la inductancia de especificación.

Si bien teóricamente esto es cierto, las posibilidades merman si restringimos el diseño al uso de núcleos y conductores comerciales y ajustamos las soluciones a las mecánicamente factibles.

Incluso limitando los resultados aplicando las restricciones anteriores, el número de diseños posibles puede ser muy alto. En la práctica se escogerá el diseño que ofrezca mejores prestaciones dados unos requerimientos concretos, que pueden variar con la aplicación y/o los recursos disponibles. Los parámetros de optimización más habituales son el tamaño o las pérdidas, siendo ambos objetivos opuestos en general.

En este documento se muestra una guía práctica de diseño de bobinas discretas. Es tarea del usuario iterar sobre el proceso expuesto hasta encontrar un diseño que satisfaga las exigencias de la aplicación en que se utilizará el componente.

**Definiciones y expresiones básicas**

Para apoyar las expresiones que se utilizarán en la guía, se resumen en la siguiente tabla las definiciones de las variables utilizadas.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Variables** | | | |
| Variación en el tiempo de campo magnético | | Variación en el tiempo de flujo magnético | |
| Camino magnético | | Longitud del entrehierro | |
| Permeabilidad magnética del vacío | | Permeabilidad relativa del material del núcleo | |
| Número de vueltas | | *MLT*  Longitud media por vuelta | |
| Volumen efectivo del núcleo | | Área de columna (genérica) | |
| ρ  Resistividad del conductor | | Área de ventana devanable[[1]](#footnote-1) | |
| Valores dependientes de la frecuencia[[2]](#footnote-2) en las pérdidas por Steinmetz [1] | | Ocupación de la ventana | |
| Densidad de corriente | | Área del conductor | |
| Número de conductores en paralelo | |  | |
| **Definiciones** | | | |
| Fuerza magnetomotriz – Ley de Ampère | | |  |
| Densidad de flujo | | |  |
| Ley de Faraday | | |  |
| **Expresiones generales de pérdidas** | | | |
| Pérdidas en el núcleo | (4) | | |
| Pérdidas en un devanado |  | | |

**Aproximaciones de diseño según aplicación**

En este documento se contemplan dos aproximaciones de diseño:

1. Ajustando el diseño a la máxima,
2. Ajustando el diseño a la óptima,

La primera aproximación (1.) produce en general diseños más pequeños, ya que se aprovecha más el material. *coeff* es un valor en tanto por 1 con el que se asegura que no se alcanzará durante la operación.

Esta es una aproximación típica en las bobinas de filtro, a través de las cuales pasa una corriente CC con un pequeño rizado CA. Debido a que las pérdidas en el núcleo dependen exclusivamente del rizado, en el caso de las bobinas de filtro estas pérdidas pueden despreciarse en la mayoría de los casos.

La segunda aproximación (2.) da como resultado diseños con menores pérdidas, ya que se diseñan para una que minimiza las pérdidas totales (), estando ambas pérdidas relacionadas con . La siguiente figura demuestra cómo bajo ciertas simplificaciones pueden relacionarse las pérdidas en el conductor (5) con (expresión (7)) [1].



La expresión (8) muestra la que minimiza las pérdidas totales,descrita con los parámetros geométricos y eléctricos definidos anteriormente. A esta ecuación se llega derivando (4) + (7) respecto a e igualando a 0 el resultado.

La aproximación 2. es más útil en aplicaciones en las cuales por las bobinas circula corriente CA, y por tanto las pérdidas de los dos tipos son relevantes y merecerá la pena minimizar los dos aportes.

Independientemente del diseño que se implemente, nunca debe superarse la densidad de flujo de saturación en el componente, **.** Al saturarse el material del núcleo, la bobina pierde el comportamiento inductivo y actúa como una resistencia.

En caso de que la corriente tenga una componente CC adicional,, el valor máximo de será la suma del producido por ésta y la componente AC (rizado), .



En el caso en que la corriente por la bobina sea puramente CA (), el valor máximo de será el que dictamine si se supera o no el valor de saturación.



**Pasos para el diseño del componente**

En esta sección se enumeran las acciones que deben realizarse para diseñar para su construcción una bobina de un cierto valor de inductancia *L*, atendiendo a la especificación eléctrica de la aplicación e imponiendo restricciones mecánicas al diseño.

0) Especificación, datos geométricos y restricciones físicas

El procedimiento dispuesto a continuación parte del conocimiento previo por parte del diseñador de la especificación eléctrica y los parámetros físicos de los materiales, núcleos y conductores preseleccionados para la operación:

* Especificación eléctrica:
* Datos de los núcleos:
* Datos de los conductores:
* Datos del material:
* Restricciones físicas:

1) Decisión de la aproximación de diseño

Si se sigue la aproximación 1.: (6)

Si se sigue la aproximación 2.:(8) +**,** donde:

Si la aplicación tiene una corriente CA pura, el término es 0.

Finalmente se descartan todos los diseños en los cuales .

2) Cálculo del número de vueltas

Según (10):

De nuevo, si la aplicación tiene una corriente CA pura, el término es 0.

Como el número de vueltas es inversamente proporcional a ,si elresultado tiene decimales se debe redondear al número entero inmediatamente superior.

3) Cálculo del *gap* para cumplir el valor de inductancia requisito

El gap total se puede calcular de manera simplificada según la expresión (11):

Por el efecto *fringing* las líneas de flujo se “abomban” alrededor del entrehierro afectando la reluctancia en sentido de hacer disminuir la inductancia. En la imagen se esquematiza este efecto.



Este efecto se minimiza si el entrehierro o *gap* es menor a un 10% de la altura de la columna completa. Se descartan los diseños que requieran un *gap* mayor a un 10% de la columna en donde se considera el *gap[[3]](#footnote-5),[[4]](#footnote-6)*.

4) Cálculo de la profundidad de *skin*

Cuando se trabaja con frecuencias muy altas, en los conductores ocurre el denominado efecto pelicular o *skin*. Según este efecto, la corriente tiende a concentrarse en una corona cerca de la superficie conductora, dejando “vacío” el centro si la sección del conductor es demasiado grande.



Si el área del conductor por donde circula la corriente es menor que la sección, la densidad de corriente en el conductor sería mucho mayor de lo que se habría previsto, y pondría en riesgo la integridad del diseño (aumenta la temperatura, lo que podría derretir el esmalte de aislamiento y producir un cortocircuito entre todas las espiras).

Para evitarlo se calcula en este paso la profundidad de penetración de la corriente por efecto skin según (12). Para elaborar el diseño se escogerán sólo conductores con .

5) Cálculo de *nw* para cumplir *Ku*

La ocupación de la ventana es un parámetro de especificación de diseño según lo definido en el paso 0). Tener un llenado adecuado de la ventana de devanado es necesario para asegurar un diseño óptimo y un balance conductor – núcleo.

Si debido a la restricción impuesta en el paso 4) no se alcanza la ocupación requisito, se debe poner un número de conductores iguales en paralelo hasta completarla.

El número de conductores en paralelo no debe superar aquél que se haya definido máximo en el paso 0) ya que un diseño de este tipo puede dificultar o imposibilitar la construcción del componente. Por ello, la solución se debe descartar si .

6) Cálculo de *J*

Como regla práctica de diseño, la densidad de corriente en el mazo de conductores no debe superar los 10 A/mm2. Por tanto, se desprecia el diseño si no cumple que .

7) Estimación de pérdidas

Las pérdidas en el núcleo sólo las produce el rizado de corriente, por lo tanto, es el valor de densidad de flujo producido por este rizado el que interviene en la expresión (4). Para calcularlo se utiliza (13):

Por último, se calculan las pérdidas que produce el componente según (4) y (5). El dato resultante,debe ser menor que el máximo de pérdidas que se permitan en el componente para no comprometer la eficiencia total del circuito, .

**Aclaraciones sobre el documento**

* Los parámetros en negrita indican que la magnitud varía con el tiempo.
* Para el cálculo de las pérdidas en el núcleo se utiliza la aproximación de *Steinmetz* [1].
* En la guía sólo se consideran hilos de cobre esmaltado de sección circular.
* Se considera despreciable la reluctancia del núcleo por tratarse de una guía de diseño para bobinas con entrehierro.
* Se considera despreciable el posible efecto *fringing* en el entrehierro.
* Se considera despreciable el grosor del esmalte en los conductores.
* Se considera despreciable el efecto de los armónicos de corriente en el cálculo de pérdidas en el conductor.
* Esta guía es suficiente para un diseño básico de bobinas discretas. Las aplicaciones que requieran diseños más fiables deben incluir modelos de pérdidas más complejos, los efectos de segundo orden aquí despreciados, e incluir hilo de litz y foil.

**Referencias**

[1] D. M. Robert, W. Erickson, *Fundamentals of Power Electronics*.

[2]. Louis R. Diana, *Practical Magnetic Design: Inductors and Coupled Inductors*.

[3]. A. Van den Bosse y V. Cekov Valchev, *Inductors and transformers for power electronics*.

© 2022 Autora Alba Rodríguez Lorente

Algunos derechos reservados

Este documento se distribuye bajo la licencia “Atribución-CompartirIgual 4.0 Internacional” de Creative Commons, disponible en

<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.es>

1. Cada una de las dos áreas en el núcleo que alojan los conductores, sustrayendo el espacio que ocupa el carrete. [↑](#footnote-ref-1)
2. Los parámetros *Kfe* [W/m3] y β [adimensional] contienen información de la frecuencia y se obtienen de la linealización de las curvas de potencia volumétrica del fabricante [1]. [↑](#footnote-ref-2)
3. Muchos núcleos comerciales se venden con un entrehierro de un valor fijo. Si se está en esta situación, hay que calcular el número de vueltas en función de este *gap* predefinido. [↑](#footnote-ref-5)
4. En caso de no tener el núcleo ningún *gap* de fábrica es útil crearlo distanciando una longitud *gap*/2 los semi-núcleos. [↑](#footnote-ref-6)