

# CALCULO DE TRANSFORMADORES DE ALTA FRECUENCIA

*El cálculo y la fabricación de los componentes magnéticos de los convertidores, es una de las tareas que mayor rechazo provoca entre los técnicos y aficionados a la electrónica de potencia. En realidad, no es una labor tan difícil, si se conocen los conceptos básicos del campo magnético, y las propiedades de los principales materiales ferromagnéticos.*

*Este artículo pretende familiarizar al lector con los transformadores de alta frecuencia, y ofrece una sencilla metodología de cálculo, que creo puede ser útil para profesionales y aficionados.*

Los elementos inductivos constituyen una parte fundamental en Electrónica de potencia, resulta casi imposible prescindir de ellos en cualquier aplicación real, por ello todo aquel que quiera incursionar en este mundo debe familiarizarse con los conceptos fundamentales de la teoría del campo magnético y las propiedades de los materiales ferromagnéticos usados para la fabricación de inductores y transformadores.

Los transformadores y autotransformadores se usan para transmitir la energía eléctrica hacia los circuitos secundarios, y permiten modificar o no su amplitud y fase. Los inductores se usan para almacenar la energía, esa es la principal diferencia entre ellos.

Los transformadores se fabrican con núcleos ferromagnéticos de alta permeabilidad magnética relativa  $\mu_r$  alcanzando valores de varias decenas de miles. El material empleado se elige fundamentalmente en dependencia de la frecuencia de trabajo. Desde listones de acero electrotécnico para las frecuencias más bajas, hasta una gran variedad de materiales basados en polvo prensado de diferentes tipos de aleaciones (ferritas) para las frecuencias más altas, pasando por materiales de última generación a base de nanos cristales, partículas pulverizadas, materiales amorfos y otras tecnologías revolucionarias, que están logrando disminuir drásticamente el volumen de los inductores y transformadores. Es muy importante la correcta elección del tipo de núcleo para cada aplicación, ya que cada una de ellas ha sido optimizada para un rango de frecuencia específico, con su correspondiente  $\mu_r$ , Inducción Magnética máxima  $B_m$  y nivel de pérdidas por histéresis y corrientes parásitas. Ya hay disponibles anillos magnéticos con entrehierro distribuido, destinados a la fabricación de inductores de potencia, capaces de almacenar grandes cantidades de energía.

En general, cualquier material magnético usado para la fabricación de inductores y transformadores debe cumplir lo mejor posible con las siguientes exigencias:

- Alto valor de la permeabilidad magnética relativa  $\mu_r$ , tanto inicial como máxima. Este parámetro incide directamente en el número de espiras mínimo necesario para alcanzar la inductancia requerida
- Debe ser magnéticamente blando, lo que implica que se magnetice y desmagnetice fácilmente, con bajas pérdidas por histéresis
- Tener un alto valor de inducción magnética de saturación  $B_s$ , lo que permite disminuir el tamaño de los equipos electrónicos
- Tener alta resistencia al paso de la corriente eléctrica, para minimizar las corrientes parásitas
- Mantener las propiedades magnéticas ante grandes variaciones de la temperatura de trabajo
- Tener un bajo coeficiente de magnetostricción, para disminuir las vibraciones y hacer estable su funcionamiento bajo fuertes campos magnéticos
- Mantenerse estable ante cambios de temperatura, presentar una temperatura de Curie elevada
- Etc.

Está claro, que no existe ningún material ideal que reúna fielmente todas las exigencias arriba mencionadas. Por ello, no existe un material universal que satisfaga todas las necesidades y pueda ser usado en todas partes y aplicaciones; en la mayoría de los casos, la optimización de un parámetro afecta a otros. Por ejemplo, es difícil mantener elevadas al mismo tiempo la permeabilidad magnética  $\mu_r$  y la resistencia eléctrica del material, por lo que los núcleos destinados a la fabricación de inductores y transformadores de potencia a frecuencias por encima de 1MHz, presentan una  $\mu_r$  muy por debajo de las 1000 unidades.

***Es importante destacar, que los núcleos magnéticos con altos valores de  $\mu_r$ , son buenos para la fabricación de transformadores, esto permite disminuir el número de espiras, y un buen enlace magnético entre sus devanados, lo que a su vez garantiza bajos valores de inductancias de dispersión y capacitancias parásitas.***

Las ferritas blandas convencionales, cuyo material base es el Mn-Zn y el Ni-Zn, presentan un elevado valor de la permeabilidad relativa, y su Inducción magnética de saturación  $B_s$  no supera los 0.5 T ( 5000 gauss). Estas ferritas no se recomiendan para la fabricación de inductores, debido a su bajo valor de  $B_s$ , sin embargo son ideales para la fabricación de transformadores.

Al diseñar un transformador, es importante tener en cuenta la forma de onda de la corriente que por él circula. No es lo mismo trabajar en corriente alterna, que en corriente alterna con componente de DC. El ciclo de magnetización puede ser simétrico o asimétrico. Al realizar el análisis es necesario considerar los valores instantáneos de voltajes y corrientes durante los procesos transitorios y régimen estacionario, para evitar la saturación del núcleo.

Los transformadores de potencia, generalmente trabajan solamente en ciclos simétricos de magnetización, ya que una mínima componente de corriente directa a través de cualquiera de sus devanados puede ser catastrófico para el funcionamiento de todo el convertidor. En la mayoría de los casos, el bobinado primario se conecta en serie con un capacitor de potencia, que garantiza el equilibrio de las áreas voltios / segundos en cada periodo, o dicho de otra forma bloquea el paso de la componente de corriente continua que pueda estar presente.

Entre los principales fabricantes de materiales magnéticos, podemos citar grandes marcas como *Epcos*, *TDK*, *Ferroxcube*, *Fair Rite*, *Magnetics*, *Gammamet*, *Chan Sung (CS)*, *Micrometals* entre otras. En sus Webs, estas compañías ofrecen todos los datos necesarios para la correcta selección y uso de sus núcleos.

### Cálculo del transformador de alta frecuencia

Todo transformador real tiene pérdidas, que pueden expresarse como la suma de las pérdidas en el núcleo y las pérdidas en el cobre. Es decir, su rendimiento  $\eta$  es menor que la unidad, y por tanto, la potencia de salida siempre es menor que la de entrada.

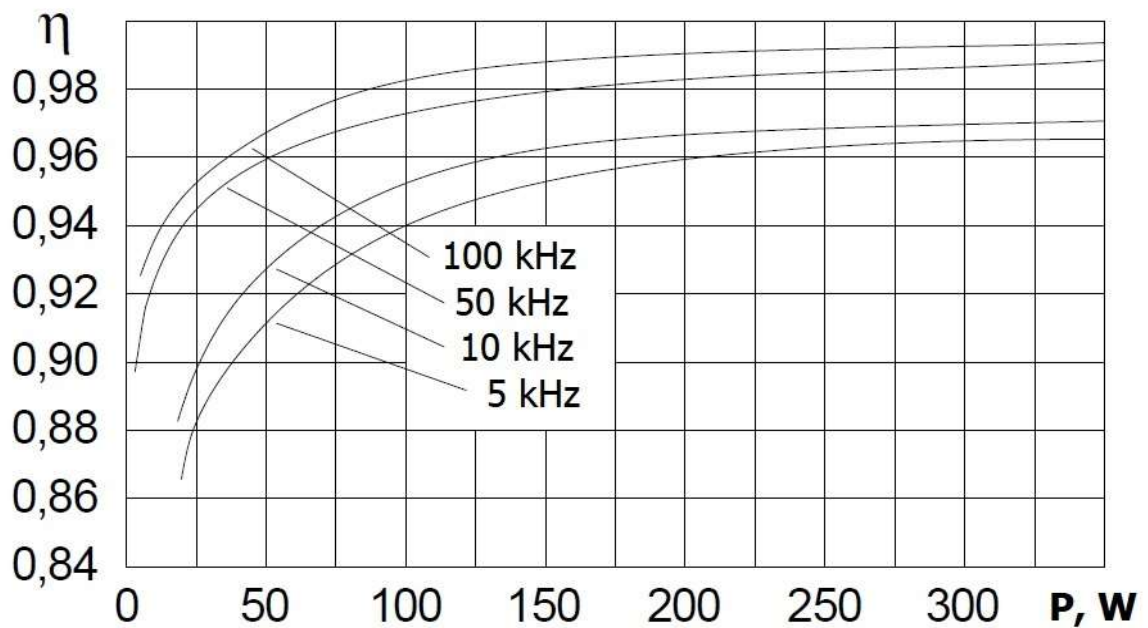


Fig.1. El rendimiento del transformador en función de la potencia.

Las curvas de la Fig.1, fueron obtenidas de forma empírica por los ingenieros soviéticos, como resultado de una investigación llevada a cabo en 1986. [2], con transformadores con núcleo de ferrita *MgZn* similar al material N87 de Epcos.

En la fuente [3] podemos encontrar la siguiente expresión obtenida empíricamente, que permite representar estas curvas de manera analítica:

$$\eta = 0.99 - \frac{0.175}{f} - \frac{1 + \frac{9.95}{f^{1.3}}}{P}; \quad (1)$$

Donde

$\eta$  – es el rendimiento. Suele estar entre 0.75 y 0.985

$f$  – es la frecuencia de trabajo en kHz

$P$  – es la potencia nominal en Watts

Iniciamos el cálculo del transformador, determinando su potencia nominal, usando como datos, la potencia de la carga y la frecuencia de trabajo. Apoyándonos en la fig.1 o la fórmula (1) determinamos su rendimiento estimado  $\eta$ . Luego calculamos la potencia nominal del transformador:

$$P_T = \frac{P}{\eta}; \quad (2)$$

La potencia nominal  $P_T$  es el punto de partida para la selección del núcleo magnético a utilizar. El volumen del núcleo es directamente proporcional a la potencia, e inversamente proporcional a la frecuencia de funcionamiento; depende de otros factores como la densidad máxima de flujo  $B_{max}$  permitida por el material del núcleo, y la densidad de corriente en los enrollados, así como de las pérdidas en el núcleo, provocadas por las corrientes inducidas, y la histéresis en el proceso de magnetización.

Utilizaremos para el cálculo, el método expuesto por Pressman, basado en el múltiplo de las áreas, teniendo además en cuenta la influencia de la frecuencia en las pérdidas magnéticas.

Básicamente, el transformador debe tener el volumen necesario para evitar la saturación del núcleo, ser capaz de absorber las pérdidas magnéticas y eléctricas sin que la temperatura se incremente más de 30 °C sobre la temperatura ambiente, y tener espacio suficiente para alojar los devanados primario y secundarios.

El producto del área de la sección del núcleo y el área de la ventana de la bobina, en  $cm^4$ :

$$A_e \cdot A_w \geq \frac{P_T \cdot D_{cma}}{K_t \cdot B_{max} \cdot f}; \quad (3)$$

Donde:

$A_e$  – Área de la sección del núcleo, en  $cm^2$

$A_w$  – Área de la ventana, en  $cm^2$

$P_T$  – Potencia del transformador, W

$D_{cma}$  – Circular mills / A. Será explicado más adelante

$B_{max}$  – Máxima densidad de flujo permitida por el material usado, en gauss. Su valor debe ser corregido acorde con la frecuencia de trabajo

$K_t$  – Coeficiente dependiente de la topología del circuito donde estará el transformador

$f$  – Frecuencia de trabajo, en Hz

Los parámetros  $A_e$  y  $A_w$ , tienen que ver con la geometría, y los tomamos de la hoja de datos del núcleo candidato.

La potencia del transformador  $P_t$ , la tomamos de las fórmulas (1) y (2)

El parámetro  $D_{cma}$ , es una especie de densidad de corriente invertida, expresada en sistema americano. Se recomiendan valores entre 500 (agresivo) y 800 (conservador)

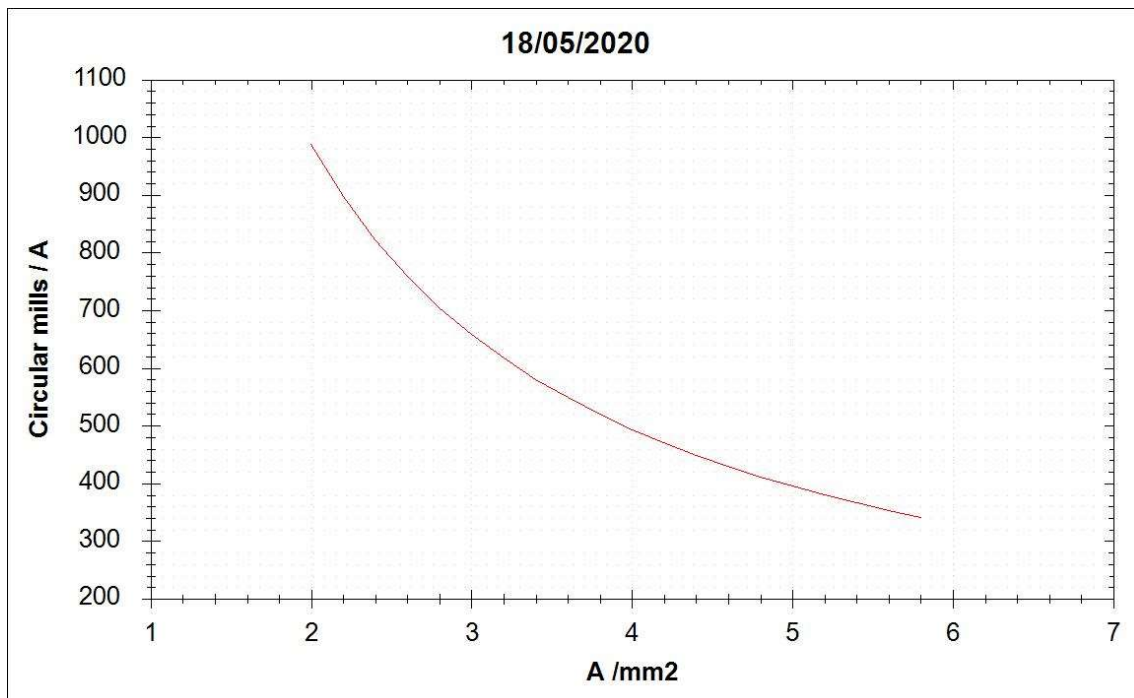


Fig.2. Relación entre la densidad de corriente en  $A / mm^2$  y  $D_{cma}$ .

El gráfico de la fig.2 permite establecer una relación entre los distintos sistemas, para aquellos que no estén familiarizados con el sistema americano.

El parámetro  $B_{max}$ , en gauss es la máxima densidad de flujo permitida por el material usado a la frecuencia de trabajo, que mantenga las pérdidas a un nivel razonable.

Para la mayoría de los materiales de  $MnZn$  comerciales, podemos usar el siguiente gráfico:

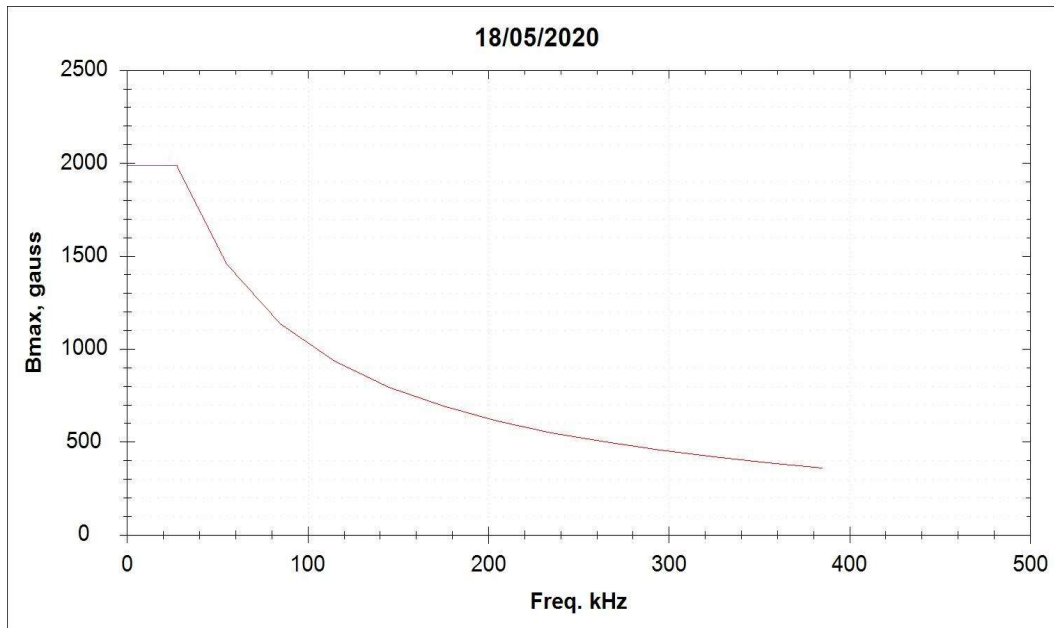


Fig.3. Influencia de la frecuencia de trabajo en el parámetro  $B_{max}$ .

Recordemos que, para pasar de Tesla a Gauss, es necesario multiplicar por 10000.

La siguiente tabla muestra el valor del parámetro  $K_t$  para las distintas topologías:

TOPOLOGIA	$K_t$
Forward Converter	0.0005
Push-pull	0.001
Half-bridge	0.0014
Full-bridge	0.0014
Flyback (single winding)	0.00033
Flyback (multiple winding)	0.00025

Partiendo de la fórmula (3), podemos calcular la potencia máxima que puede transmitir un núcleo de ferrita, a una frecuencia dada:

$$P_{max} \leq \frac{A_e \cdot A_w \cdot B_{max} \cdot f \cdot K_t}{D_{cma}} ; \quad (4)$$

Por ejemplo, para el núcleo E55/28/25 de Epcos N87, sustituyendo en (4), obtenemos para una topología push-pull a 50 kHz:

$$P_{max} \leq \frac{4.2 \times 3.7 \times 1500 \times 50000 \times .001}{600} = 1942.5 \text{ W}$$

Una vez seleccionado el núcleo, usando la formula (3), calculamos el número de espiras en el primario y secundario, mediante la ley de Faraday:

$$N_p = \frac{V_p \cdot 10^8}{4 \cdot B_{max} \cdot A_e \cdot f} ; \quad (5)$$

$$N_s = \frac{V_s}{V_p} \cdot N_p ; \quad (6)$$

Donde  $V_p$  y  $V_s$  – Voltaje, Voltios en el primario y secundario respectivamente

$B_{max}$  – Gauss

$A_e$  – Área de la sección del núcleo, cm<sup>2</sup>

$f$  – Frecuencia en Hz

Para determinar el diámetro de los alambres, necesitamos calcular el valor eficaz de la corriente por los devanados:

$$I_p = \frac{P_T}{V_p} ; \quad (7)$$

$$I_s = \frac{P_T}{V_s} ; \quad (8)$$

Luego, calculamos el área del cobre, para una densidad 3.8 A / mm<sup>2</sup>, o  $D_{cma} = 600$ . Se recomienda usar varios alambres trenzados de menor diámetro, para disminuir el efecto pelicular.

En la página de cálculos de la Web [www.ledoelectronics.com](http://www.ledoelectronics.com) pueden disfrutar de un Apple que le permite realizar todos estos cálculos de una forma rápida y sencilla.

#### *Conclusiones:*

*Se ha detallado el procedimiento de cálculo de un transformador de de alta frecuencia con núcleo de ferrita, basado en el método del producto de las áreas expuesto por Abraham I. Pressman, ligeramente modificado para mayor comodidad, y teniendo en cuenta la influencia de la frecuencia en las pérdidas magnéticas.*

*Bibliografía:*

1. *Kalantarov PL. "Raschot Inductibnostei". Editorial Energia 1964.*
2. *Abraham I Pressman. "Switching Power Supply Design".*
3. *COEY, J.M.D. 2010. Magnetism and magnetic materials. Cambridge. Cambridge University.*
4. *Catálogo CSC "Magnetic Powder Cores".*