



ESCUELA SUPERIOR DE INGENIEROS DE SAN SEBASTIÁN

TECNUN

UNIVERSIDAD DE NAVARRA

Trabajo de Sistemas Eléctricos

**DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UN
TRANSFORMADOR MONOFÁSICO**

CURSO 2009 - 2010

ÍNDICE

1	Diseño de un Transformador Monofásico	3
2	Datos de Partida.....	4
3	Objetivos	5
4	Parámetros de los Bobinados de Primario y Secundario.....	5
5	Procedimiento de Diseño de un Transformador Monofásico	7
6	Datos y Tablas	9
6.1	Relaciones entre Unidades	9
6.2	Propiedades de Materiales Aislantes	9
6.3	Propiedades de Materiales Conductores	10
6.4	Propiedades de Materiales y Chapas Magnéticas	10
6.5	Valores de referencia de Transformadores Monofásicosde Baja Tensión (< 1kV).....	11

1 Diseño de un Transformador Monofásico

El trabajo de este curso en la asignatura de Sistemas Eléctricos consiste en el diseño y fabricación de un Transformador Monofásico de forma artesanal.

El sistema magnético estará formado por dos bobinas (una de primario y otra de secundario) arrolladas sobre un carrete que cada grupo elegirá entre los que se encuentren a disposición de los grupos en el laboratorio de Electrotecnia y un núcleo ferromagnético formado por chapas magnéticas que permitirá que el flujo común a ambas bobinas enlace magnéticamente los circuitos de primario y secundario.

El circuito magnético del transformador monofásico dispone de dos caminos en paralelo por los que volverá el flujo que circula por la columna central. En la Figura 1.1 se esquematiza esa circulación de flujos.

En la figura 1 puede verse las distintas partes de un transformador monofásico.

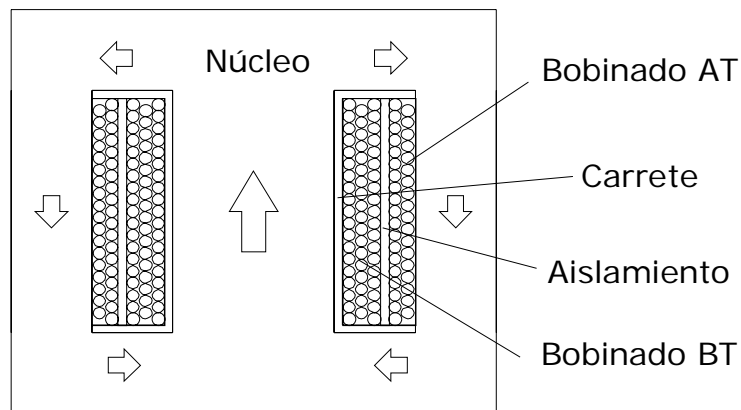


Figura 1.1. Esquema de Transformador Monofásico (Alzado-corte)

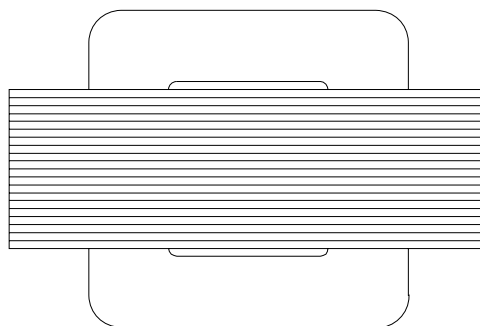


Figura 1.2. Esquema de Transformador Monofásico (Planta)

El circuito magnético de un transformador monofásico está caracterizado por dos áreas o superficies características: el Área de Núcleo, A_c , que es la superficie de la columna central del transformador, y el Área de Ventana, A_v , que es la superficie del hueco o ventana que queda entre la columna central y las laterales; en realidad es la superficie que estará ocupado por los bobinados de primario y secundario, así como por los aislamientos.

Las chapas magnéticas que se utilizarán tienen forma de E y de I. En la figura 2 puede verse el tipo de chapas que se utilizarán para construir el núcleo del transformador.

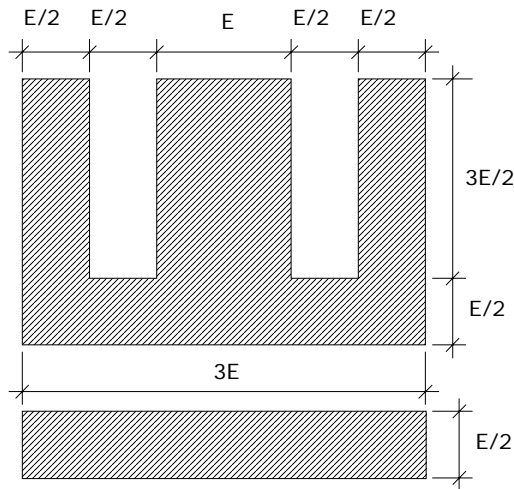


Figura 2. Chapas Magnéticas para fabricar el núcleo ferromagnético

Conociendo las dimensiones anteriores, se podrá escribir que las áreas definidas serán:

$$A_c = E D \quad A_v = \frac{3E^2}{4} \quad (1)$$

siendo D la profundidad del núcleo. Habitualmente, siempre que sea posible, se suele tomar un valor de D parecido a E ; así A_c será una superficie prácticamente cuadrada. Se puede tomar un valor de D distinto a E , pero es mejor que la superficie se acerque al cuadrado.

Al producto de estas dos superficies se le denomina Área Producto, A_p , y es un valor muy significativo en el diseño de los transformadores, ya que está relacionada con la potencia nominal y con la densidad de corriente de los bobinados de primario y secundario.

Las bobinas se fabricarán siguiendo las indicaciones que se les dé en clase. Cada grupo podrá apuntarse para realizar el bobinado en las bobinadoras que tendrán a disposición en el laboratorio.

Una vez diseñado y montado el transformador, deberán realizarse los ensayos característicos para encontrar sus parámetros y contrastarlos con el diseño. Para ello, en el laboratorio se dispondrá de todos los elementos de medida necesarios, así como los autotransformadores de relación variable (varivolt) y las fuentes de energía de CA.

El funcionamiento de un transformador monofásico es bien sencillo y está perfectamente explicado en clase, en el libro de teoría o en el guión de la práctica de laboratorio nº 1. Por ello no se va a describir en este documento.

2 Datos de Partida

El diseño y cálculo de un transformador consiste en elegir el tipo de núcleo que se va a utilizar, elegir el carrete correspondiente, definir los números de espiras de primario y secundario,

así como los diámetros de los hilos esmaltados de los dos bobinados.

Los datos de partida para cada grupo son las tensiones de primario y secundario del transformador, su potencia nominal, su tensión de circuito abierto o de vacío y el calentamiento (diferencia de temperatura entre el transformador y el ambiente) permitido para el funcionamiento correcto del transformador.

3 Objetivos

El objetivo principal del trabajo será el diseño y la fabricación de un transformador monofásico que cumpla con las especificaciones que se proporcionan en los datos de partida para cada grupo.

Además, el transformador diseñado deberá tener el máximo rendimiento, pero con el menor peso y el menor coste posible de todos los diseños que cumplan con las especificaciones asignadas. Para tener en cuenta el peso y el coste, se proporcionarán las densidades de todos los elementos que forman parte del transformador, así como su precio aproximado.

Por otra parte, otro objetivo del trabajo es la realización de los ensayos característicos de un transformador y la contrastación de los resultados analíticos y numéricos con los empíricos. Así, se valorará que los resultados de los ensayos permitan obtener unos valores de caídas de tensión, rendimientos, tensiones de vacío, pérdidas en el núcleo y en el cobre, etc. muy similares a los obtenidos en la etapa de diseño analítico del transformador.

Se premiarán los trabajos que destaquen en cualquiera de los apartados anteriores. En la WEB de la asignatura se indicará oportunamente los puntos adicionales a la valoración del trabajo que se ofrecerán.

4 Parámetros de los Bobinados de Primario y Secundario

Para realizar los bobinados, los alumnos trabajarán en el laboratorio con una bobinadora manual. Cada grupo acudirá al laboratorio de acuerdo con el horario al que se haya apuntado en las tablas disponibles en el Laboratorio de Electrotecnia.

Para ello, es necesario realizar unos cálculos previos tal como se explica a continuación. Deben estar definidos los diámetros de los hilos que se van a utilizar y el número de espiras que debe llevar cada bobina. Fíjense que las corrientes que van a circular por las bobinas determinarán la sección y el diámetro de los conductores elegidos. Téngase también en cuenta que los dos extremos de las bobinas deben tener la suficiente longitud para poder conectarlos a las tomas de CA del laboratorio.

Para definir completamente cada bobinado es necesario determinar sus dimensiones (altura y diámetros interior y exterior), el tamaño del conductor que la forma y el número de espiras. En este caso, la altura de ventana está definida por el tipo de chapas: $3E/2$, siendo E la anchura de la columna central de la chapa magnética.

En la siguiente figura, se puede apreciar las diferentes dimensiones y parámetros de un conjunto de dos bobinados concéntricos.

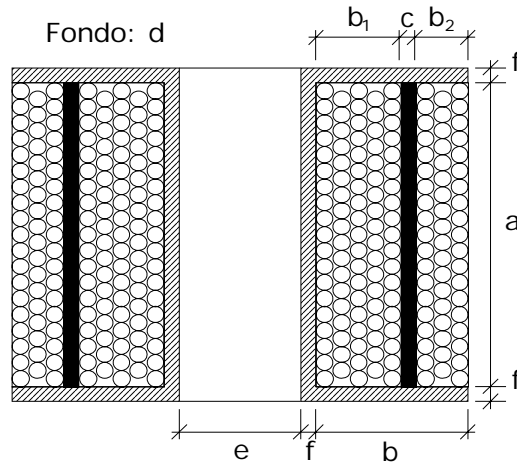


Figura 3. Parámetros Físicos de los Bobinados

Las dimensiones de las bobinas son, además de “a” y “b” (altura y espesor de la bobina; b_1 y b_2 si hay dos bobinados), la profundidad “d” (D) y la anchura “e” (E) de las chapas magnéticas (son las dimensiones del núcleo: D y E), el espesor del carrete “f” y la longitud media de bobina o de espira “ l_{media} ” (se le llama también l_m o MLT). El espesor del aislamiento entre bobinados es “c”.

No toda la superficie “a b” (“a b_1 ” y “a b_2 ”, para cada bobina) será efectiva. Normalmente esto se mide con el coeficiente de llenado, que será un valor comprendido entre $0.4 \leq k_v \leq 0.6$.

La relación entre las dimensiones geométricas y el número de capas y de espiras por capa para cada bobina es la siguiente:

$$N_{E_k} \approx \frac{1}{2} \left(\frac{2a}{D_{cond_k}} - 1 \right) \quad N_{C_k} \approx \frac{2}{\sqrt{3}} \left(\frac{b_k}{D_{cond_k}} - 1 \right) + 1$$

$$a \approx \frac{D_{cond_1}}{2} (1 + 2N_{E_1}) \approx \frac{D_{cond_2}}{2} (1 + 2N_{E_2}) \quad (2)$$

$$b_k \approx \frac{D_{cond_k}}{2} (2 + (N_{C_k} - 1)\sqrt{3})$$

siendo “ b_k ” el espesor de la bobina, N_{E_k} el número de espiras por capa y N_{C_k} el número de capas de la bobina. $N_k = N_{E_k} N_{C_k}$.

De la figura 3 se puede deducir la longitud de conductor y la resistencia de cada bobina.

$$l_{media} = 2(d + 2f) + 2(e + 2f) + \pi b = MLT \quad \text{bobina única}$$

$$l_{media_1} = 2(d + 2f) + 2(e + 2f) + \pi b_1 = MLT_1 \quad \text{bobina interior} \quad (3)$$

$$l_{media_2} = l_{media_1} + \pi(b_1 + b_2 + 2c) = MLT_2 \quad \text{bobina exterior}$$

$$l_{Bobina_k} = l_{media_k} N_k \quad R_{C_k} = \rho \frac{l_{media_k} N_k}{s_{Cu_k}} \quad (4)$$

donde “ N_k ” es el número de espiras, “ ρ ” la resistividad ($\rho_{Cu} = 1.77 \cdot 10^{-8} \Omega m$ y $\rho_{Al} = 2.83 \cdot 10^{-8} \Omega m$) y “ s_{Cu_k} ” la sección efectiva del conductor correspondiente.

Una vez que se conoce la resistencia en corriente continua, R_C , se obtendrá la de corriente alterna, R , suponiendo que el valor de R_F es un 20% de la resistencia total de cada bobinado a la frecuencia de 50 Hz.

Por otra parte, la inductancia de dispersión de flujo (equivalente en el primario, L_p) para un bobinado en capas como el que se utilizará en el transformador monofásico tiene la expresión.

$$L_p = \frac{1.2 \text{ MLT } N_1^2}{a} \left(c + \frac{b_1 + b_2}{3} \right) 10^{-8} \text{ (H)} \quad (5)$$

En esta expresión, las dimensiones de los bobinados y de la longitud media, MLT (del conjunto de los dos bobinados), están en "cm" y son las que se pueden apreciar en la figura anterior. Para calcular la misma pero referida al secundario, L_s , solamente hay que cambiar el número de espiras N_1 por N_2 .

5 Procedimiento de Diseño de un Transformador Monofásico

Como ya se ha dicho, el Área Producto, A_p , es un valor muy significativo en el diseño de los transformadores, ya que está relacionada con la potencia nominal y con la densidad de corriente de los bobinados de primario y secundario. Su valor es el punto de partida del diseño de un transformador y es función de distintas magnitudes y coeficientes, tal como puede verse.

$$A_p = \left[\frac{10000 S_N}{4,44 (x/(x+1)) k_h k_v k_J f B_{\max}} \right]^{8/7} \quad (6)$$

siendo:

- A_p el área producto (cm^4).
- S_N la potencia nominal del transformador (VA).
- f , la frecuencia en (Hz).
- B_{\max} , el valor de pico de la inducción (T). Podrá ser 1 T, en el caso de chapa normal (espesor 0.50 mm), ó 1.36 T, si se elije chapa de bajas pérdidas (espesor 0.35 mm).
- k_h , coeficiente o factor de apilamiento del núcleo → El área transversal real de hierro será $A_{\text{h}} = k_h A_c$. Es aproximadamente igual a 0.95.
- k_v , coeficiente o factor de relleno de ventana → El área real de cobre será $A_{\text{cu}} = k_v A_v$. Tiene valores comprendidos entre 0.4 y 0.6.
- x , coeficiente de densidad de corriente → $J_1 = xJ$; $J_2 = J$, donde J_1 es la densidad de corriente del primario y J_2 la del secundario. Se puede tomar $x=1$ en primera instancia; al rehacer los cálculos se puede ver si interesa realmente que $J_1 \neq J_2$.
- k_J , constante de calentamiento: vale 366 para 25 °C, 534 para 50 °C y 603 para 60 °C.

Además, se puede obtener la densidad de corriente de cada bobinado de acuerdo con el valor del A_p y el de x elegido.

La densidad de corriente será:

$$J = k_J A_P^{-1/8} \rightarrow \begin{cases} J_1 = x J \\ J_2 = J \end{cases} \quad (7)$$

siendo:

- o J la densidad de corriente media de los bobinados de primario y secundario (A/cm²)
- o k_J, constante de calentamiento: vale 366 para 25 °C, 534 para 50 °C y 603 para 60 °C.

Una vez elegida la densidad de corriente (o densidades), se puede trabajar con la elección de la chapa magnética con la que se va a apilar.

Se partirá del valor obtenido del Área Producto, A_p, y, en primera aproximación, se intentará que el núcleo central tenga una sección transversal cuadrada (D=E) o, al menos, aproximadamente cuadrada. De esa forma, se tomará el tamaño de chapa que interese y se obtendrá el valor real de D (profundidad del núcleo) y el número de chapas necesarias. Con estos datos se elegirá el carrete adecuado para el citado núcleo y para dar soporte a los bobinados.

Lo siguiente es calcular, con los valores anteriores, las secciones de conductor de los bobinados de primario y secundario, y sus diámetros:

$$s_1 = \frac{I_{1N}}{J_1} \quad s_2 = \frac{I_{2N}}{J_2} \quad (8)$$

Y, además, los números de espiras de los bobinados:

$$N_1 = \frac{V_{1N}}{4,44 f B_{\max} A_h} \quad N_2 = \frac{V_{2o}}{4,44 f B_{\max} A_h} \quad (9)$$

Habrà que comprobar que las bobinas así definidas, con su número de espiras y con el diámetro de conductor, pueden colocarse realmente en la ventana disponible. Se puede hacer la comprobación calculando el valor total de superficie de cobre que habrá en la ventana y ver si es menor que la superficie de ésta; además, se comprobará que su valor está comprendido entre 0.4 y 0.6. Si no, habrá que rehacer los cálculos.

Una vez que está clara la elección de los conductores y de las bobinas, hay que obtener el número de espiras por capa y el número de capas de cada bobinado, tal como se ha visto en el apartado anterior. Además, se obtendrá la longitud media de cada bobina y su resistencia; con dichas resistencias se obtiene la resistencia equivalente en el secundario.

Por otra parte, se calculará el valor de la inductancia de dispersión de flujo (con la expresión (5) del apartado anterior) y la reactancia equivalente en el secundario.

A continuación, se podrán obtener los valores de pérdidas en el cobre y en el hierro. En el cobre, mediante las corrientes y las resistencias. En el hierro, mediante el valor de la masa del núcleo y las densidades de pérdidas de cada tipo de chapa: 2.40 W/kg, para la chapa normal, y 1.10 W/kg, para chapa de bajas pérdidas.

Con las pérdidas y diseñando el transformador para que el rendimiento máximo se produzca con corriente nominal en el secundario, se obtendrá el rendimiento en ese supuesto. El objetivo será minimizar dicho valor con el menor volumen y coste posibles. Además, deben calcularse el resto de parámetros del transformador.

Para obtener la corriente de vacío del transformador, tómesese el valor aproximado (en tanto por ciento de la nominal) que aparece en las tablas del último apartado de esta memoria; o, inténtese obtener el valor de la corriente de magnetización a partir de las características del núcleo (permeabilidad, longitud media, sección transversal, reluctancia, etc.) y el de la corriente de pérdidas a partir de las P_n . Para ello, los componentes del grupo deberán obtener características de los materiales que pueden encontrar en el último apartado o que deberán encontrar por su propia cuenta en manuales, libros o apuntes.

Una vez que se haya terminado de diseñar el transformador con rendimiento máximo, se realizarán analíticamente los ensayos y se pasará a fabricarlo tal y como se explicará oportunamente en clase.

6 Datos y Tablas

6.1 Relaciones entre Unidades

Energía:	$1\text{J}=10^7$ ergios= 0.24 cal = 6.24 eV= $9.49 \cdot 10^{-4}$ Btu
Potencia:	1 W= $1.36 \cdot 10^{-3}$ CV= $1.34 \cdot 10^{-3}$ hp
Par:	1 Nm= 0.738 lbf pie
Inducción magnética:	$1\text{T}=1$ Wb/m ² = 10^4 G= 64.5 klíneas/pulg ²
Excitación magnética	1 Av/m= 0.0126 Oe

6.2 Propiedades de Materiales Aislantes

Las siguientes propiedades son indicativas de su orden de magnitud.

	Densidad gr/cm ³ a 20°C	ϵ_r 50 Hz y 20°C	Rigidez Dieléctrica (kV/mm) a 50 Hz	Temperatura Máxima °C
Baquelita (tipo A)	1.3	5-10	16-20	70
Vidrio pyrex	2.5	4.8	40-45	500
Porcelana	2.4	5-6.5	34-38	1000
Esteatita	2.7	6	20-40	1000
Mylar	1.4	3	400	150
Policloruro de vinilo (PVC)	1.4	3.5-7	20-40	70
Polietileno reticulado	1.1	2.5-5	30	90
Neopreno	1.3	4-8	20-30	150
Goma butílica	0.95	2.5	15-20	65
Aceite de transformador	0.88	2.2	30	70
Pyraleno 1467	1.56	3.9	200	70

6.3 Propiedades de Materiales Conductores

Las siguientes propiedades son indicativas de su orden de magnitud.

	Densidad gr/cm ³ a 20°C	Resistividad Ω m a 20°C	Coefficiente Temperatura (°C ⁻¹)	Punto Fusión °C
Plata	10.5	1.59 10 ⁻⁸	0.0058	960
Cobre	8.9	1.77 10 ⁻⁸	0.0038	1083
Oro	19.3	2.44 10 ⁻⁸	0.0034	1063
Aluminio	2.7	2.82 10 ⁻⁸	0.0039	660
Tungsteno	18.7	5.6 10 ⁻⁸	0.0045	3370
Hierro	7.87	10.0 10 ⁻⁸	0.0050	1535
Plomo	11.3	22.0 10 ⁻⁸	0.0039	327
Manganina	8.5	44 10 ⁻⁸	0.00001	910
Constantan	8.9	49 10 ⁻⁸	0.00001	1210
Nicrom	8.25	100 10 ⁻⁸	0.0004	1350

6.4 Propiedades de Materiales y Chapas Magnéticas

A continuación, se ofrecen las propiedades orientativas de diversos tipos de materiales magnéticos.

	Densidad gr/cm ³ a 20°C	B _{SAT} (T)	H _{SAT} (Av/m)	P _h (50Hz; B _{SAT}) W/kg
Chapa normal	8.8	1.1-1.4	400-1000	1-3
Chapa grano orientado	8.15	1.9-2.2	200-400	1-2
Ferritas	4.8	0.4-0.5	150-200	0.1-0.2

Dimensiones geométricas de chapa magnética para transformadores (Núcleos E/I):

Anchura E (mm)	14	16	20	22	25	32	36	42	50
Longitud circuito magnético (mm)	90	96	120	132	150	192	216	252	300
Peso 1 cm chapas apiladas (gr)	95	105	180	215	265	460	600	800	1.140

6.5 Valores de referencia de Transformadores Monofásicos de Baja Tensión (< 1kV)

Estos valores corresponden a transformadores de pequeña potencia (< 5kVA). Son valores orientativos y casi no dependen de las tensiones nominales.

S_N (VA)	P_o (W)	P_N (W)	$\Delta V_N = V_{2o} - V_N$ (% V_{2N})	I_{1o} (% I_{1N})	$\cos \varphi_{1N}$ con R_L
25	0.27	5.2	15.0	22	0.970
50	0.82	9.5	12.0	18	0.972
100	2.5	12.4	9.0	16	0.975
125	3.6	14.5	7.5	15.6	0.981
250	6.5	24.7	6.0	14.5	0.991
300	7.8	26.0	5.0	12.8	0.991
400	11.2	34.8	4.5	13.8	0.992
500	13.2	39.4	4.0	14.2	0.992
750	20.5	50.4	3.0	14.6	0.993
1000	32.6	63.8	1.5	14.1	0.992
1500	39.6	83.9	1.5	14.0	0.992
2000	51.3	109.7	1.5	13.8	0.995
2500	69.7	128.8	1.5	13.7	0.996
5000	108.2	208.3	1.0	10.0	0.996