



Diseño de Transformadores Monofásicos

Jorge Romo L.

El diseño de cualquier equipo es un proceso de cálculo mediante el cual se trata de determinar sus dimensiones geométricas, de modo de obtener un comportamiento pre-especificado. Así, en el proceso de diseño se pueden distinguir:

1. Especificaciones, o características de funcionamiento deseadas.
2. Algoritmo de diseño, o secuencia lógica de relaciones que permiten determinar las dimensiones a partir de las especificaciones y de ciertos valores supuestos en base a experiencia en diseños similares.
3. Análisis del comportamiento del diseño definitivo, comparación con el comportamiento requerido (especificaciones) y repetición del proceso si es necesario corregir el diseño.

Generalmente ocurre que las ecuaciones de diseño disponibles son insuficientes para la cantidad de incógnitas (dimensiones) a determinar. Por ello, para levantar la indeterminación es necesario suponer un conjunto de valores y/o emplear un modelo simplificado de modo de reducir la cantidad de incógnitas, obteniéndose un diseño preliminar o aproximado. No obstante, al analizar el comportamiento del diseño así obtenido, hay que basarse en el modelo exacto, sin simplificaciones. De allí que se produzcan diferencias entre el comportamiento calculado y las especificaciones, siendo normalmente necesario realizar una serie de iteraciones hasta lograr un diseño satisfactorio. En cada iteración deben corregirse adecuadamente los valores supuestos para aproximar el comportamiento a las especificaciones.

En el caso de transformadores monofásicos, se expondrá aquí un algoritmo de cálculo basado en el modelo simplificado correspondiente al transformador ideal. Las etapas del proceso serán en este caso:

1 Especificaciones

En el caso más simple serán las características nominales, o sea V_1, V_2, f y la potencia aparente S (o bien I_1, I_2 , ya que $S = V_2 I_2 \approx V_1 I_1$).



2 Algoritmo de Diseño

2.1 Sección de conductores primario y secundario

$$S_{C1} = \frac{I_1}{J_1} \quad (1)$$

$$S_{C2} = \frac{I_2}{J_2} \quad (2)$$

Donde J_1 y J_2 son las densidades de corriente en conductores primario y secundario respectivamente, valores que deben suponerse entre 2 y 7 [A/mm²] aproximadamente, dependiendo del tipo de refrigeración. Además S_{C1} y S_{C2} se deben aproximar a valores normalizados comerciales.

2.2 Número de vueltas de los enrollados

Se puede asumir un valor para los volts por vuelta V/N ($= V_1/N_1 \approx V_2/N_2$), que para transformadores monofásicos puede variar entre 0,1 y 10 aproximadamente, dependiendo de la aislación y niveles de voltaje. Entonces, los números de vueltas del primario y secundario serían:

$$N_1 = \frac{V_1}{(V/N)} \quad (3)$$

$$N_2 = \frac{V_2}{(V/N)} \quad (4)$$



2.3 Sección transversal del núcleo

El área aparente del núcleo (= Área neta/factor de apilamiento de chapas) es:

$$A_{Ap} = \frac{(V/N)}{4,44 \cdot f \cdot B_m \cdot f_{ap}} \quad (5)$$

Donde f_{ap} es el factor de apilamiento, que dependiendo del apriete de las chapas puede variar entre 0,90 y 0,98 aproximadamente, y B_m es la densidad de flujo máxima, que dependiendo de la curva B-H de núcleo puede elegirse entre 0,9 y 1,6 [Wb/m²], o más, si el fierro es de buena calidad y el codo de saturación así lo permite.

El área aparente del núcleo corresponde a:

$$A_{Ap} = a \cdot b \quad (6)$$

En que a y b son las dimensiones indicadas en la Figura 1.a o Figura 1.b, según el tipo de núcleo a usar. Así, a y b pueden elegirse arbitrariamente para cumplir (6), o puede ocurrir que para a deba elegirse algún valor normalizado, determinándose b con (6). En general, es conveniente que $a \approx b$.

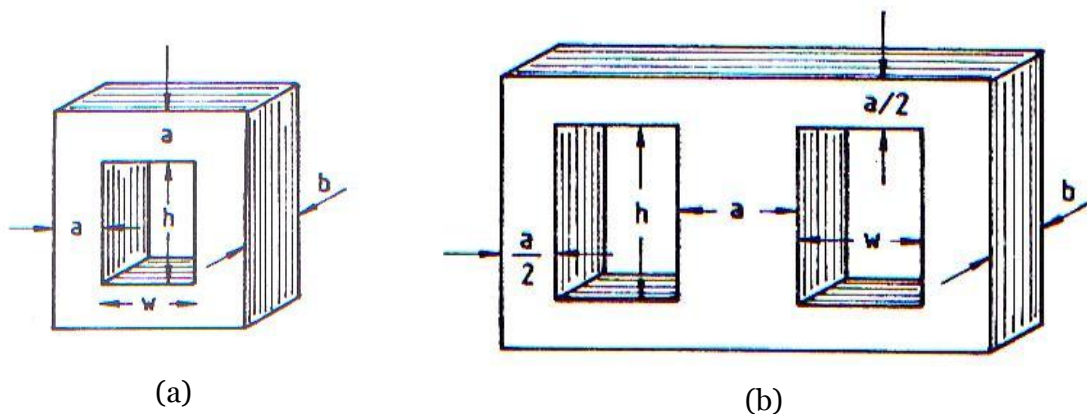


Figura 1. Núcleos tipos ventana y acorazado

2.4 Sección de la ventana

Corresponde a la sección transversal de conductores de cobre que ocuparán la ventana ($N_1 S_{C1} + N_2 S_{C2}$), más espacios de aire y aislación. Si se define $K_V (< 1)$ como el factor de aprovechamiento de la ventana, se tendrá que la sección de la ventana es:

$$S_V = \frac{N_1 \cdot S_{C1} + N_2 \cdot S_{C2}}{K_V} \quad (7)$$

K_V puede elegirse entre 0,3 y 0,7 dependiendo de la calidad del bobinado, entre otras cosas.

Cabe indicar que si el diseño se hace con $J_1 = J_2 = J$ se tendrá que $S_{C1} = I_1/J$ y $S_{C2} = I_2/J$, de modo que (7) también se puede escribir como:

$$S_V = \frac{N_1 \cdot I_1 + N_2 \cdot I_2}{J \cdot K_V} = \frac{2 \cdot N_1 \cdot I_1}{J \cdot K_V} = \frac{2 \cdot N_2 \cdot I_2}{J \cdot K_V} \quad (8)$$

Las dimensiones h y w de la ventana (ver Figura 1) pueden elegirse arbitrariamente de modo de cumplir:

$$S_V = h \cdot w \quad (9)$$

O bien adaptarse a valores de chapas normalizadas. En general conviene que $h \approx \frac{2}{3} w$.

Teniendo la ventana y los conductores definidos, se pueden distribuir adecuadamente las vueltas de primario y secundario, en el número de capas que sea necesario.

3 Análisis del comportamiento

Teniendo el diseño preliminar aproximado (basado en el modelo de transformador ideal), se evalúa el comportamiento que tendría, considerando ahora como modelo el circuito equivalente “exacto” (Figura 2). Para ello, se deben determinar los parámetros de este circuito en función de las dimensiones obtenidas:

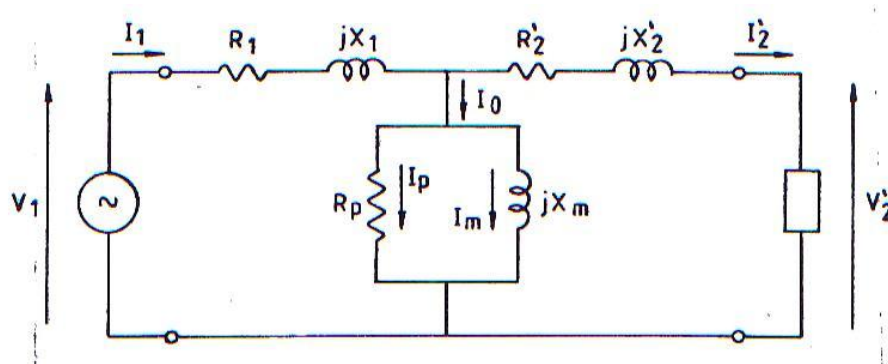


Figura 2. Circuito equivalente referido al primario

3.1 Resistencias de enrollados

Se determinan con las relaciones convencionales.

3.2 Reactancias de fuga

Para el núcleo más usado (acorazado), $X = X_1 + X_2'$ se determina como (ver Figura 3):

$$X = \frac{3,5 \cdot N_1^2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{D_L \cdot L}{3} + D_G \cdot G + \frac{D_H \cdot H}{3} \right)}{10^4 \cdot \left[l + \frac{(L + G + H)}{3} \right]} \quad (10)$$

Sin embargo, como aproximación para transformadores pequeños (de menos de 1 kW), éstas se pueden despreciar frente a las resistencias si se emplean enrollados concéntricos.

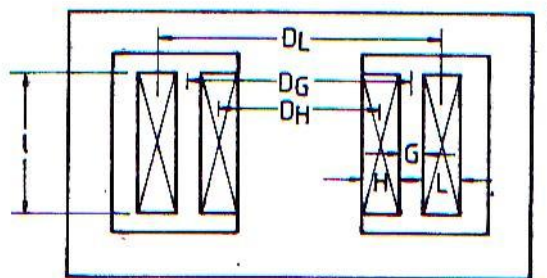


Figura 3. Transformador acorazado

3.3 Reactancia de magnetización

Se determina, referida al primario, como:

$$X_m \approx \frac{V_1}{I_m} \quad (11)$$

En que:

$$I_m = \frac{H \cdot l_m}{N_1} \quad (12)$$

Siendo l_m la longitud media del circuito magnético. De acuerdo a la Figura 1:

$$l_m = 2 [(w + a) + (h + a)] \quad (13)$$

H se determina de la curva B-H, con el valor de B_m correspondiente.

3.4 Resistencia de pérdidas

Se determina, referida al primario, como:

$$R_p \approx \frac{V_1^2}{P_{fe}} \quad (14)$$

Donde P_{fe} se determina a partir de la curva de pérdidas del hierro en W/kg (entrando con B_m correspondiente) y del peso del núcleo obtenido.

El comportamiento evaluado con el circuito equivalente se debe comparar con las especificaciones, y corregir el diseño si corresponde, modificando adecuadamente algunos de los valores supuestos.

Es importante reiterar que el proceso de diseño descrito corresponde al caso más simple, con el mínimo de especificaciones. Sin embargo, es usual tener otros valores de comportamiento deseables, como cierto valor para la regulación de voltaje, rendimiento, corriente en vacío, etc., lo cual debe verificarse al final del proceso descrito recién, mediante el circuito equivalente. Además, podrían existir otros requerimientos que no son evaluables mediante dicho circuito, como la temperatura que alcanza el transformador, esfuerzos mecánicos, etc., los cuales debieran evaluarse con otros modelos que aquí no se estudiarán. Y también, en cualquier caso, debe tenerse como objetivo en el diseño lograr un costo mínimo, lo cual se traduce en general en no sobredimensionar el equipo.

4 Relación potencia-volumen

Finalmente, es interesante encontrar la relación entre la potencia del transformador y su volumen. Para ello se tiene:

$$S = V_1 \cdot I_1 \quad (15)$$

Y reemplazando V_1 de (5) e I_1 de (8):

$$S = (4,44 \cdot N_1 \cdot f \cdot B_m \cdot A_{Ap} \cdot f_{ap}) \left(\frac{S_V \cdot J \cdot K_V}{2N_1} \right) \quad (16)$$

$$S = 2,22 \cdot f \cdot B_m \cdot f_{ap} \cdot K_V \cdot J \cdot A_{Ap} \cdot S_V$$



Se aprecia que la potencia es proporcional al área del núcleo y a la sección de la ventana.

Si se consideran valores típicos $f = 50 \text{ Hz}$, $B_m = 1,5 \text{ Wb/m}^2$, $f_{ap} = 0,95$, $K_V = 0,5$ y $J = 3 \text{ A/mm}^2$ ($= 3 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2$), se obtiene:

$$S = 237,3 \cdot 10^6 \cdot A_{Ap} \cdot S_V \quad (17)$$

El factor numérico será mayor si se exige más al diseño suponiendo valores mayores para B_m , K_V y J , pudiéndose lograr mayor potencia para las mismas dimensiones, aunque se corre el riesgo de sobrepasar las temperaturas límite de las aislaciones.

Además, si se considera un núcleo normalizado como los tipo LT, en que las dimensiones de la ventana en función del ancho a son $w = a/2$ y $h = 2,5 \cdot a$, se tendrá $S_V = 1,25 \cdot a^2$ Y asumiendo una sección cuadrada para el núcleo, $A_{Ap} = a^2$, se tendrá en (17):

$$S = 297 \cdot 10^6 \cdot a^4 \quad (18)$$

Donde S está en [VA] y a , en [m].

Para estos mismo núcleos, se puede ver que su volumen en función de a es

$$Vol = 10,5 \cdot a^3$$

Con lo cual se puede escribir:

$$S = 12,9 \cdot 10^6 \cdot (Vol)^{4/3} \quad (19)$$

O bien:

$$Vol = 0,0465 \cdot 10^{-4} \cdot S^{3/4} [\text{m}^3] \quad (20)$$

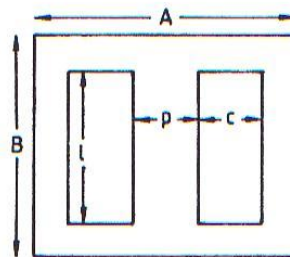
$$Vol = 4,65 \cdot 10^3 \cdot S^{3/4} [\text{mm}^3]$$



Láminas Normalizadas Para Núcleos de Fierro Silicoso

(Medidas en mm.)

Tipo	P	c	l	A	B
EL- N5	5	4,5	9,5	19	14,5
N6	6	6	12	24	18
N10	9,6	8,1	19	35	29
N15	15	9	24	48	42
N20	19,5	10,5	30	60,5	51
N25	25	14,5	39,5	79	68,5
N29	29	16,5	45,5	91	78,5
N39	39	22	61	122	105
LT- N50	50	25	125	150	175
N60	60	30	150	180	210
N80	80	40	200	240	280
N100	120	50	250	300	310
I-3N50	50	60	110	270	210
3N60	60	60	120	300	240
3N80	80	80	160	400	320
3N100	100	100	200	500	400



LT



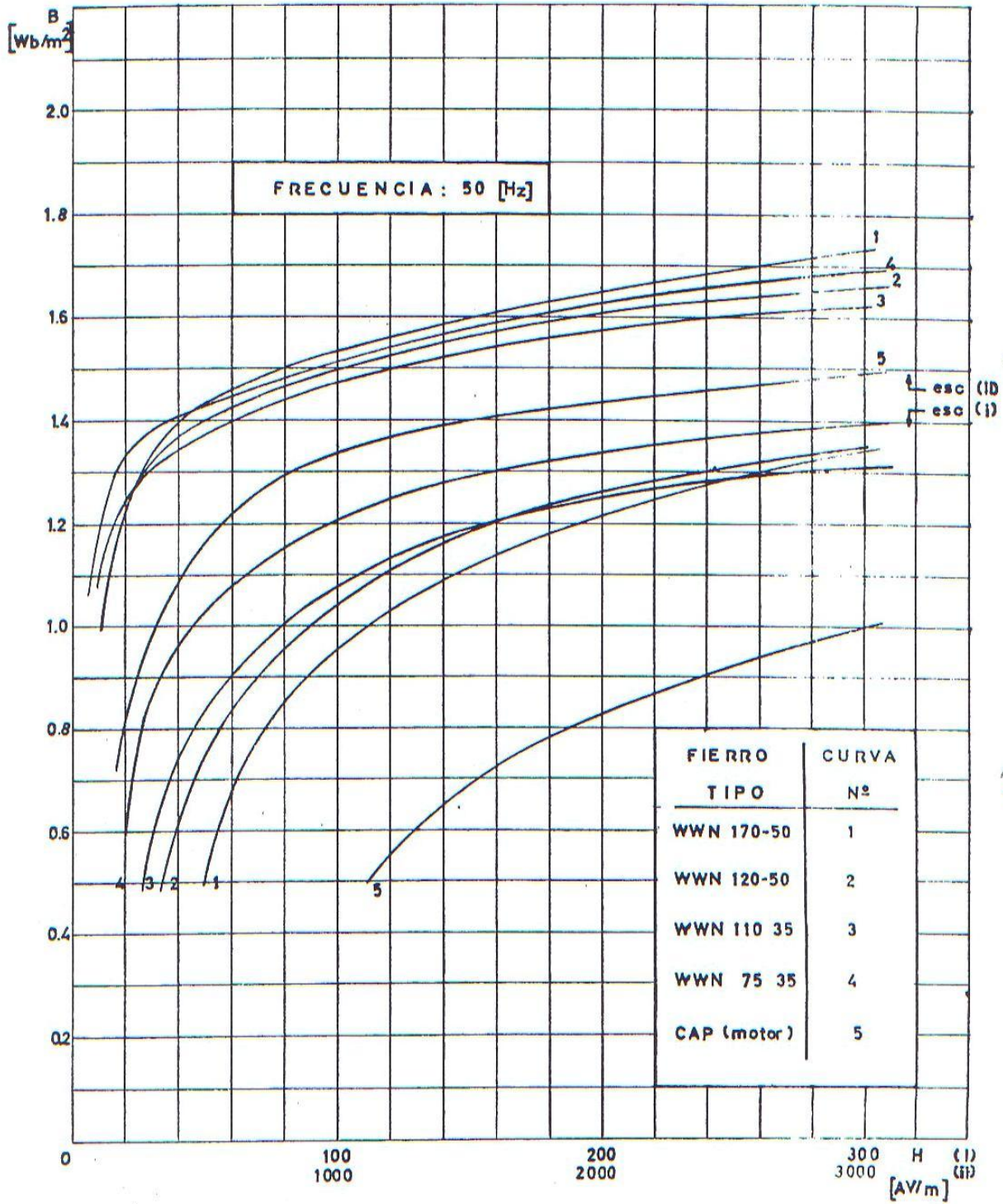
EI



I



Curvas de Magnetización





Curvas de Pérdida

Frecuencia: 50 [Hz]

