SEGUNDA PARTE

DISEÑO DE TRANSFORMADORES

Cálculo de transformadores. Cálculo simplificado de transformadores. Estudio térmico del transformador. Detalles constructivos.

CAPÍTULO VII

CÁLCULO DE TRANSFORMADORES

En el Capítulo II hemos visto cómo se repartían las pérdidas en los transformadores, y que el rendimiento era máximo cuando las pérdidas en el hierro eran iguales a las del cobre. En el diseño de transformadores se presentan dos factores que influyen en esas dos clases de pérdidas, y que son: la sección del núcleo y el número de espiras del bobinado. Para asegurar el flujo necesario para el funcionamiento, es decir, para que se induzca una f.e.m. de valor prefijado, puede variarse la sección del núcleo y el número de espiras, en sentido contrario; si se emplea una sección grande, hará falta un número de espiras reducido, y viceversa.

Una sección grande implica un gran volumen de hierro, y por ende, aumento de las pérdidas en el núcleo; asimismo, un gran número de espiras lleva consigo un bobinado de mayor resistencia eléctrica, con lo que aumentarán las pérdidas en el cobre, que son proporcionales a esa resistencia.

De estas consideraciones deducimos que, como ambos factores son de efecto similar sobre el rendimiento, podrá maniobrarse con ellos en los cálculos, hasta conseguir un mínimo de pérdidas. Y en ese detalle reside la complejidad del diseño, pues no puede tomarse arbitrariamente ninguno de los dos factores.

Para sentar principios que se utilizarán en el cálculo, veremos antes algunas características del núcleo de hierro del transformador que permiten fijar un punto de partida en el desarrollo que sigue. Desde luego que el desarrollo completo que se planteará en este capítulo no es necesario para algunos casos prácticos de transformadores de reducida potencia, en los que se puede prescindir de la teoría para tomar valores aconsejados por la experiencia. Veremos más adelante que en esos casos se emplean fórmulas empíricas de más fácil aplicación y que conducen a resultados suficientemente buenos. Pero siempre se fijarán los límites dentro de los que puedan aplicarse tales simplificaciones, pues en los transformadores de gran potencia, para servicio industrial, hay que emplear un criterio técnico-económico más completo.

SECCIÓN DEL NÚCLEO

El núcleo de hierro de todos los transformadores vistos en capítulos anteriores tiene una sección transversal de la rama central, o sea de la rama que lleva arrollados los bobinados, que hemos designado con la letra S, en todos los casos. Veamos algunos detalles de esta sección, pues puede tener cualquier forma geométrica (cuadrada, rectangular, etcétera) sin que ello intervenga en los cálculos del flujo; en efecto, basta que esa sección tenga el valor S, para que se asegure que el producto de ella por la inducción dará el flujo adoptado y prefijado.

Supongamos que se adopta una sección cuadrada para el núcleo, según figura 84. Este cuadrado es la sección transversal o normal de la rama central del núcleo. Supongamos también que este cuadro está inscrito en un círculo de diámetro D, y que el lado vale a. El bobinado arrollado sobre el núcleo tiende a tener una forma cilíndrica, porque al doblar los conductores para envolverlos alrededor del paquete de chapas, si son gruesos, no es fácil darle

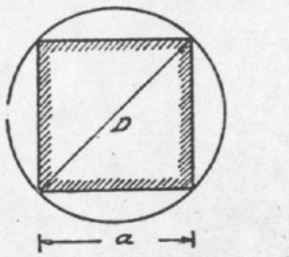

FIG. 84. — Inscripción de una sección cuadrada del núcleo en un círculo.

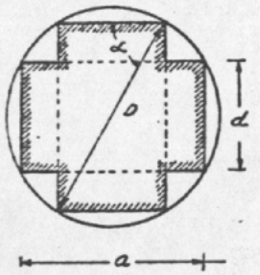

FIG. 85. — Inscripción de la sección en cruz en el círculo.

otra forma que la circular. Luego puede suponerse que el espacio entre el cilindro que forma el bobinado y el prisma cuadrangular que forma el núcleo, queda vacío.

Para tener espiras de longitud mínima, será conveniente que el núcleo ocupe el prisma de mínimo espacio perdido, o, dicho en otra forma, que la sección del núcleo tenga forma tal, que llene lo más posible el círculo en que quede inscrita. Veamos si la sección cuadrada es la más conveniente.

Es práctico introducir un *coeficiente*, llamado de *plenitud del hierro*, k_f, que está dado por el cociente entre la sección neta del hierro y el área del círculo en que aquélla está inscrita. Calculemos el coeficiente de plenitud para la sección cuadrada. Referiremos ambas superficies al diámetro D, como dato, lo que nos permitirá hallar un valor numérico para k_f. El área del cuadrado de la figura 84, en función del diámetro D, se puede calcular, sabiendo que el lado vale 0,7 por la longitud de la diagonal, que es, precisamente, D.

$$S = 0{,}7\,D \times 0{,}7\,D = 0{,}49\,D^2$$

Y el área del círculo sabemos que vale $0{,}785\,D^2$, de modo que el coeficiente de plenitud toma un valor:

$$k_f = \frac{0{,}49\,D^2}{0{,}785\,D^2} = 0{,}625$$

Que es un valor teórico, pues no hay que olvidar que el paquete de chapas que forma el núcleo tiene espacios de aislación entre cada par de chapas, lo que reduce la sección neta de tierro en un 10 % aproximadamente. Luego, reduciéndose la sección de hierro en 10 %, también se reducirá k_f en la misma proporción, y tendremos que en lugar de 0,625, el coeficiente de plenitud valdrá: 0,56.

Veamos, en cambio, lo que sucede si se da a la sección del núcleo una forma como la que se ve en la figura 85. Se trata de un doble rectángulo, o más bien, una sección en cruz, que aprovecha más el círculo, dando un llenado mayor. Veamos cuánto vale la sección neta de hierro que puede inscribirse en el círculo, y el valor que alcanza el coeficiente de plenitud.

Busquemos primero una fórmula que nos dé el área de esta figura en función del diámetro D, del círculo. Por de pronto ese área vale la suma de los dos rectángulos cruzados, menos el cuadrado central que aparece sumado dos veces:

$$S = 2\,a\,d - d^2$$

Pero las dos medidas a y d se pueden escribir en función del diámetro D y el ángulo indicado en la figura:

$$a = D \operatorname{sen} \alpha$$
$$d = D \cos \alpha$$

Y reemplazando estos valores en la fórmula del área, se obtiene:

$$S = D^2 (\operatorname{sen} 2\alpha - \cos^2 \alpha)$$

Ahora hay que hacer intervenir las matemáticas, para hallar el valor del ángulo que haga que el área S sea máxima. El procedimiento es hallar la derivada de la función S, con respecto al ángulo α e igualarla a cero. El valor que resulta es *):

$$\alpha = 58°\ 15'$$

Con este valor del ángulo, encontramos inmediatamente los valores de las medidas:

$$a = D \operatorname{sen} \alpha = 0{,}85\,D$$
$$d = D \cos \alpha = 0{,}53\,D$$

*) Veamos:

$$\frac{dS}{d\alpha} = D^2(2 \cos 2\alpha + 2 \cos \alpha \operatorname{sen} \alpha) =$$
$$= D^2(2 \cos 2\alpha + \operatorname{sen} 2\alpha)$$

Igualando a cero y dividiendo por D^2, resulta:

$$2 \cos 2\alpha + \operatorname{sen} 2\alpha = 0$$

Luego, el área de la sección S. en función del diámetro, resulta:

$$S = D^2 \,(\operatorname{sen} 2\alpha - \cos^2 \alpha) = 0{,}616\, D^2$$

Calculemos ahora el coeficiente de plenitud del hierro, al que multiplicaremos por 0,9 para tener en cuenta la merma de 10 % ocasionada por la aislación entre chapas:

$$k_f = 0{,}9\, \frac{0{,}616\, D^2}{0{,}785\, D^2} = 0{,}71$$

Que, como se ve, resulta un 25 % mayor que para la sección cuadrada. Este motivo es suficiente para que en todos los transformadores industriales se adopte la sección en cruz para el núcleo, lo que redunda en menor espacio ocupado por el núcleo y con ello la menor longitud del alambre de los bobinados. En la práctica, cuando el núcleo tiene la forma de cruz, se suele considerar al coeficiente de plenitud con un valor máximo igual a:

$$k_f = 0.7$$

Que es más real que el anterior, pues la merma por aislación entre chapas depende del espesor de las mismas, y el valor 0,7 contempla un buen promedio práctico. De acuerdo con lo que antecede, en los croquis en que aparezca un ancho a de la cruz, se tendrá que entre la sección S y esa medida hay la relación:

$$S = 0{,}77\, a^2$$

Que contempla el 10 % de merma, y que fué deducida de las expresiones precedentes.

DIMENSIONADO DEL NÚCLEO

Partiremos de la expresión general de la f.e.m. inducida en el bobinado secundario del transformador, que conocemos desde el primer capítulo:

$$E_2 = 4{,}44\, f\, \Phi\, N_2\, 10^{-8}$$

En la que la f.e.m. está dada en Volt, y puede ser reemplazada por el cociente entre la potencia aparente que se tomará del secundario y la corriente del mismo; f es la frecuencia en c/s; Φ es el flujo máximo que se tiene en el núcleo y N_2 es el número de espiras del bobinado secundario. Al poner:

$$E_2 = \frac{P_a}{I_2} = \frac{P_a}{\delta\, s_2}$$

Y dividiendo por cos 2 α, se tiene:

$$2 + \operatorname{tg} 2\alpha = 0$$
$$\operatorname{tg} 2\alpha = -2$$

Y resulta un ángulo que corresponde a esa tangente:

$$2\alpha = 180^\circ - 63^\circ\, 30'$$
$$\alpha = 58^\circ\, 15'$$

afirmamos que la f.e.m. es igual al cociente entre la potencia aparente, dada en Voltamper (que es el dato más común, en transformadores) y la corriente secundaria; esto no es exacto, pero resulta bastante aproximado para los cálculos. En el último quebrado hemos reemplazado la corriente secundaria por el producto entre la sección del conductor del bobinado y la densidad de corriente; la primera se tomará en mm² y la segunda en A/mm².

Con estos datos podemos volver a nuestra expresión general de la f.e.m., en la que reemplazaremos el valor de ella dado más arriba, quedando:

$$P_a = 4{,}44\, f\, \Phi\, N_2\, \delta\, s_2\, 10^{-8}$$

Y que todavía puede tomar otra forma, si se cambia el flujo por el producto de la inducción magnética y la sección del núcleo S:

$$P_a = 4{,}44\, f\, B\, S\, N_2\, \delta\, s_2\, 10^{-8}$$

Expresión que nos da la potencia en el secundario, en VA. Hay que tener presente que en esta fórmula, S, sección del núcleo se toma en cm², y s_2 sección del conductor, se toma en mm².

Veamos ahora la forma de hacer algunas simplificaciones, a fin de introducir factores de más fácil interpretación. En primer lugar, trataremos el coeficiente de plenitud del cobre.

COEFICIENTE DE PLENITUD DEL COBRE

Supongamos un núcleo como el que se ve en la figura 86, que es del tipo en anillo. En la ventana del mismo debe poder colocarse el bobinado primario,

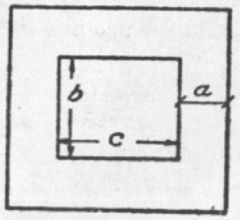

FIG. 86. — Indicación de las dimensiones en un núcleo tipo anillo.

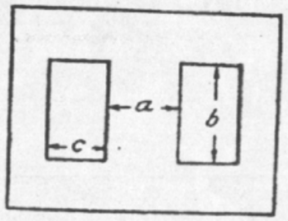

FIG. 87. — Indicación de las dimensiones en un núcleo tipo acorazado.

el secundario, y las piezas aislantes entre ambos y contra las paredes del núcleo. Las dimensiones de esta ventana son:

ancho	c (cm)
alto	b (cm)
ancho lleno de núcleo	a (cm)

Y si el núcleo es del tipo acorazado, según ilustración de la figura 87, tenemos las mismas dimensiones, con la única diferencia que en el anillo, ambos costados tienen el mismo ancho neto a, mientras que en el acorazado, la parte central tiene el ancho a pero las dos ramas laterales tienen la mitad de este ancho, según se ha visto en capítulos anteriores.

Si el transformador es trifásico el núcleo tiene la forma de la figura 87, pero en este caso las tres ramas verticales del mismo tienen idéntico ancho a, y las dos ventanas deben ser un poco más grandes. Pero en las expresiones siguientes se tendrán en cuenta todos estos detalles. Por ahora, fijaremos como bases las letras que se han adoptado para las dimensiones indicadas.

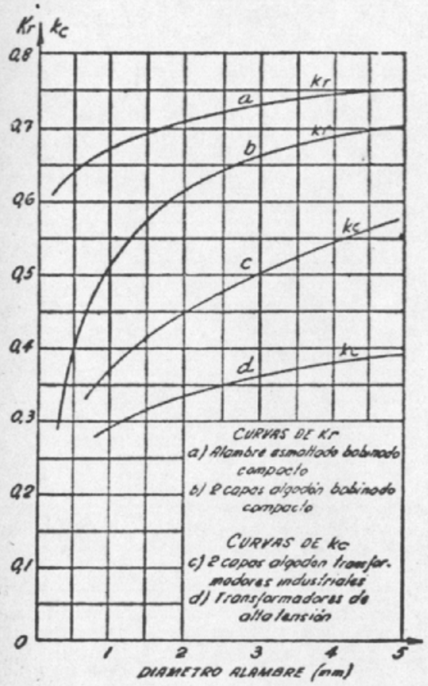

FIG. 88. – Coeficiente de plenitud del cobre en bobinados de transformadores.

Si se toman las secciones de los conductores del bobinado primario y secundario en cm², y se las multiplica por los respectivos números de espiras, esos productos nos dan las áreas que ocupan esos bobinados dentro de la ventana. La suma de las dos áreas llenas de cobre, dividida por la superficie de la ventana, es el coeficiente de plenitud del cobre:

$$k_c = \frac{N_1 s_1 + N_2 s_2}{b\,c}$$

No hay que confundir el coeficiente de plenitud k_c con el factor de relleno. que se refiere al cociente entre la sección neta de cobre y la sección que ocupa el mismo alambre con aislación incluída. Este factor de relleno se suele llamar k_r y puede servir de ilustración. La figura 88 da los coeficientes de plenitud del cobre y de relleno para distintos diámetros de alambre empleados en el bobinado. Las dos curvas (a) y (b) son las que dan el factor de relleno para dos tipos usuales de alambre, y no deben usarse en los cálculos que siguen. Las dos curvas (c) y (d) son las que dan el coeficiente de plenitud del cobre, que es el valor que nos interesa en nuestros cálculos. Como vemos, oscila alrededor de 0,35 para devanados de alta tensión, y alrededor de 0,5 para bobinados de baja tensión. En caso de no saber cuál valor tomar en cada curva, se puede probar con promedios. En virtud de que los números de espiras están en relación inversa a las corrientes, aproximadamente, puede suponerse que las superficies ocupadas en la ventana por cada bobinado, son las mismas; en efecto, a menor corriente, menos sección pero más espiras, luego, sin que ello sea riguroso, puede suponerse la igualdad propuesta. En tal caso, asignamos al secundario la mitad de la superficie de la ventana, y escribimos:

$$N_2 s_2 = \frac{100\,b\,c\,k_c}{2}$$

Donde el 100 tiene por objeto reducir las secciones de cm² a mm², para poder colocar esta igualdad en la expresión general de la potencia secundaria. Es decir que, en la ecuación general de P_a colocaremos el segundo miembro de esta última igualdad, en lugar del producto $N_2 s_2$; además, podemos valernos de otra substitución, para hacer intervenir al coeficiente de plenitud del hierro. Sabemos que el área neta del núcleo es igual a la del círculo en que está inscrita por el coeficiente de plenitud, es dcir:

$$S = \frac{\pi D^2}{4} k_f$$

Y con estas dos expresiones, una que tiene el coeficiente de plenitud del cobre y otra el del hierro, vamos a la fórmula general de P_a, con lo que obtenemos:

$$P_a = 4{,}44\, f\, B\, \frac{\pi D^2}{4}\, k_f\, \frac{100\, b\, c\, k_c}{2}\, \delta\, 10^{-8}$$

Ahora trataremos de introducir un coeficiente de índole práctica que interviene directamente en los cálculos del núcleo. Hasta aquí hemos justificado la inclusión de los coeficientes de plenitud, de la densidad de corriente en los bobinados y de la potencia aparente en el secundario, porque todos ellos son valores conocidos o que pueden adoptarse en base a la experiencia. Pero para entrar de lleno en el cálculo del núcleo tenemos que hacer intervenir nuevos coeficientes o relaciones, con las cuales iremos a la tabla de valores que nos permitirá dimensionar el núcleo en definitiva. Tales factores tienen fundamento teórico, pero su adopción es de carácter empírico.

COEFICIENTE n

Se obtiene de la expresión general de la potencia aparente, previo cambio de miembro de algunos de sus factores. Para ello tomemos la expresión citada, que es la última que hemos obtenido, y pasemos al primer miembro el producto $b\,c\,D^2$, y todo lo demás al segundo. Esto es porque esas tres dimensiones no son conocidas antes del cálculo del núcleo, mientras que los demás factores son conocidos o pueden adoptarse; podemos entonces poner:

$$n = b\,c\,D^2$$

Y, de acuerdo con la expresión de la potencia aparente, se puede escribir:

$$n = \frac{0{,}57\, P_a\, 10^6}{B\, f\, \delta\, k_c\, k_f} \quad \text{[para monofásicos]}$$

Que se ha obtenido por simplificación de todos los factores numéricos. Las letras significan: P_a la potencia aparente secundaria en VA; B la inducción máxima que habrá en el núcleo, en Gauss; f la frecuencia de la red en c/s; δ la densidad de corriente en los conductores, en A/mm², y k_c y k_f los coeficientes de plenitud del cobre y del hierro, ya conocidos.

En la expresión que da n hemos aclarado que se trata de transformadores monofásicos, y esto se debe a que hemos partido de ese principio. Para transformadores trifásicos sabemos que la ventana debe tener una dimensión un poco mayor, para dar cabida a los juegos de bobinados; pero, en cambio, si se dispone de la potencia aparente en el secundario, como dato, resultará que la expresión de n da valores menores, pues a cada fase le toca una tercera parte de esa potencia. En definitiva, y después de hacer las correspondientes deducciones y simplificaciones, hechas por el mismo procedimiento, se obtuvo la fórmula:

$$n = \frac{0{,}385\, P_a\, 10^6}{B\, f\, \delta\, k_c\, k_f} \quad \text{(para trifásicos)}$$

En la cual las letras significan lo mismo que en la fórmula anterior, pero P_a es la potencia aparente total trifásica del secundario, en Voltamper, es decir, es la potencia de los tres secundarios en conjunto.

Para iniciar el cálculo de un transformador, monofásico o trifásico, lo primero que se hace es determinar el valor del coeficiente n para lo cual se emplean las fórmulas vistas. Habrá que adoptar algunos valores que aparecen en ellas, y eso se hace de acuerdo con la experiencia. Más adelante daremos algunos ejemplos numéricos, para fijar ideas.

COEFICIENTE m

En el capítulo segundo vimos cómo debían estar relacionadas las pérdidas en el cobre y en el hierro para máximo rendimiento; debían ser iguales, pero en algunos casos, como en los transformadores de servicio intermitente, se prefiere aumentar el porcentaje de pérdidas en el cobre para reducir el del hierro. Se consigue en esta forma que las pérdidas permanentes sean menores y las intermitente mayores. El rendimiento, en esta forma, se eleva.

Además, debemos tener en cuenta la relación que hay entre el peso del cobre y el peso del hierro, bien para establecer que esa relación debe ser la unidad, bien para elegirla de acuerdo con los costos. Si el cobre vale más que el hierro, convendrá emplear menor peso de cobre que de hierro, a fin de abaratar el transformador. Para dejar la solución de este problema a las condiciones del mercado de ambos materiales se introduce el factor:

$$\alpha = \frac{\text{peso del hierro}}{\text{peso del cobre}}$$

que valdrá la unidad o más según el caso y las condiciones de la plaza. Ambos pesos se deben tomar en la misma unidad, por ejemplo en Kg.

Y ahora, considerando las pérdidas en ambos materiales, fijemos una nueva relación de interés:

$$\beta = \frac{\text{pérdidas en el hierro}}{\text{pérdidas en el cobre}}$$

Que valdrá la unidad para transformadores de servicio permanente y más de uno para los de servicio intermitente.

La relación última, que da el cociente entre las pérdidas en el hierro y en el cobre, puede ser escrita en otra forma, si se conocen las pérdidas unitarias en ambos materiales, es decir, las pérdidas por Kg. Éstas casi siempre son conocidas. En efecto, las pérdidas por Kg de núcleo de hierro se dan en los gráficos de las figuras 34, 35 y 36, de modo que suponemos que constituyen un dato del problema. Veamos ahora cómo se determinan las pérdidas por Kg de cobre.

Para esto, debemos calcular las pérdidas en Watt en un alambre de cobre, y el peso del mismo. Las pérdidas son iguales al producto de la resistencia por el cuadrado de la intensidad de corriente; esta última es igual al producto de la densidad y la sección del alambre; luego, las pérdidas en el alambre son:

$$W = I^2 R = \delta^2 s^2 \frac{0{,}02\, l}{1000\, s}$$

tomando la resistividad igual a 0,02 para tener en cuenta la temperatura de trabajo del bobinado; el divisor 1000 es para poder tener la longitud en milímetros a efectos de uniformar unidades, ya que la sección S se da en mm² y la densidad δ en A/mm².

Calculemos ahora el peso en Kg de ese mismo alambre, igual al volumen por el peso específico. El volumen es igual a la sección por el largo, y si los tomamos en mm² y mm respectivamente, debemos dividir por 1000000, a fin de obtener el resultado en Kg:

$$\text{Peso} = \frac{8{,}9\, l\, s}{1000000}$$

Si dividimos las pérdidas por el peso, obtendremos el valor de las pérdidas por Kg de cobre, que era el dato que necesitábamos:

$$p_c = 2{,}25\, \delta^2 \quad [\text{W/kg}]$$

Donde hemos llamado p_c a las pérdidas por Kg de cobre. Y si designamos con p_f a las pérdidas por Kg de hierro, que son conocidas, tenemos que se puede escribir:

Pérdidas en el hierro: peso hierro $\times\, p_f$
Pérdidas en el cobre: peso cobre $\times\, p_c$

Y ahora volvamos al cociente entre ambas pérdidas, que habíamos propuesto anteriormente, en el cual aparecerá el cociente entre el peso del hierro y del cobre, que es el otro coeficiente propuesto:

$$\beta = \frac{\text{peso hierro} \times p_f}{\text{peso cobre} \times p_c}$$

Pero, como hemos dicho, el cociente entre el peso del hierro y el peso del cobre lo habíamos llamado α, de modo que resulta, después de reemplazar valores:

$$\alpha = \frac{p_c\, \beta}{p_f} = \frac{2.25\, \delta^2\, \beta}{p_f}$$

Con lo que podemos afirmar que el valor de α resulta conocido, pues es función del cuadrado de la densidad de corriente adoptada, de la relación entre pérdidas en el hierro y en el cobre (vale la unidad para transformadores de servicio permanente y mayor para los intermitentes), y de las pérdidas por Kg de hierro, que se obtienen en curvas (figuras 34, 35 y 36).

Con este valor se puede ya plantear el coeficiente *m* que hemos citado anteriormente, y que es el definitivo que irá a los cálculos del transformador. Este coeficiente vale:

$$m = \frac{1{,}16\, k_c\, \alpha}{k_f}$$

Donde los coeficientes de plenitud del cobre k_c y del hierro k_f ya son conocidos, pues hemos hablado anteriormente de ellos.

La segunda etapa en el cálculo será, entonces, determinar el valor de *m* para el transformador que se estudia. Los valores de las fórmulas anteriores permiten encontrar *m*, y con este valor se puede seguir adelante en la forma que veremos de inmediato. Se supone que ya se tiene calculado el coeficiente *n* de que hablamos anteriormente.

COEFICIENTES *p* y *t*

De la práctica constructiva surgen relaciones empíricas entre las distintas dimensiones del transformador. Así es como para cada valor del coeficiente *m* que se definió últimamente, se pueden establecer dimensiones del núcleo, haciendo intervenir además al coeficiente *n*, que está ligado a la potencia, densidad de corriente y magnética y a la frecuencia del transformador.

Para facilitar los cálculos, se da una tabla en la que aparecen dos nuevos coeficientes, deducidos en función de los datos empíricos mencionados, sobre la base de estadísticas de una gran cantidad de transformadores.

Como se ve en el cuadro, los valores de *m* y *p* son los mismos para transformadores monofásicos y trifásicos, no así los de *t* que varían, debiendo tomarse el que corresponda. A la tabla se entra con el valor del coeficiente *m* que ya hemos calculado anteriormente, y cuyo campo de variación está entre 0,6 y 2,0 en la práctica. Con los valores de los cuatro coeficientes: *n*, *m*, *p* y *t* se entra al cálculo definitivo del núcleo del transformador.

Tabla de valores de los coeficientes p y t

Valor de *m*	Valor de *p*	Valor de *t*	
		Monofásicos	Trifásicos
0,6	2,14	3,58	3,25
0,8	2,04	3,08	2,77
1,0	1,95	2,70	2,48
1,2	1,88	2,48	2,25
1,4	1,80	2,23	2,00
1,6	1,76	2,08	1,87
2,0	1,72	1,92	1,73

CÁLCULO DEFINITIVO DEL NÚCLEO

Hay tres fórmulas para determinar las tres dimensiones clásicas del núcleo, que nos interesan. Ellas son, el diámetro del círculo que rodea a la sección neta de hierro, el ancho y el alto de la ventana. La sección puede tener forma de cruz o cuadrada, pues en los cálculos se habrá tomado el valor de k_f que corresponde a la misma. Con el diámetro, ya sabemos obtener las demás dimensiones de la sección, según se ha visto al principio de este capítulo.

Las tres expresiones que citamos, que dan las dimensiones del núcleo en centímetros, son:

$$D = \sqrt[4]{\frac{m\, n}{p}}$$

$$b = t\, D$$

$$c = \frac{n}{D^2\, b}$$

De las cuales deducimos inmediatamente, que el primer valor a calcular es el diámetro del círculo que contiene a la sección del núcleo, dado por la raíz cuarta del producto de los coeficientes *m* y *n* dividida por el coeficiente *p*; D se obtiene en cm. Luego calcularemos el alto de la ventana, como producto de ese diámetro por el coeficiente *t* de valor particular para transformadores monofásicos o trifásicos, y obteniéndolo también en cm; finalmente, con los valores del coeficiente *n*, y las dos dimensiones ya calculadas, resulta el ancho de la ventana, c en cm.

Teniendo el núcleo ya dimensionado, lo que resta es simple, puesto que de la expresión general de la f.e.m. sale el número de espiras necesario; en efecto, tomemos la citada expresión de la f.e.m. en la que despejamos el número de espiras del bobinado secundario:

$$N_2 = \frac{E_2\, 10^8}{4{,}44\, f\, B\, S}$$

Y en esta expresión todos los términos del segundo miembro son ya conocidos; en efecto, E_2 es la f.e.m. inducida en el secundario, en Volt; f es la frecuencia; B es la inducción, que ya hemos adoptado una vez para calcular el núcleo en Gauss, y S es la sección neta de hierro, que calculamos por:

$$S = \frac{\pi\, D^2\, k_f}{4}$$

Es decir, en función del diámetro, D obtenido antes, en cm, resultando S en cm^2.

Y una vez conocido el número de espiras del secundario, y dado que el transformador debe tener una relación de transformación prefijada k, se tiene que el número de espiras del primario vale:

$$N_1 = N_2\, k$$

Donde ya sabemos que la relación de transformación k se calcula por el cociente de las ff.ee.mm. del primario y del secundario, datos del problema.

De aquí en adelante, lo que resta son detalles de segundo orden, fácilmente calculables. La sección de los conductores para cada bobinado se encuentra por el cociente entre la intensidad de corriente que circula por ellos, y la densidad de corriente que se adoptó desde el principio del cálculo. La intensidad, a su vez, puede ser calculada por cociente entre la potencia aparente y la tensión, para ambos bobinados. Se debe tomar la potencia por fase si es trifásico. Dado que el rendimiento del transformador es una cifra elevada, puede tomarse, para estos cálculos, igual a la unidad, con lo que las potencias aparentes de los dos bobinados serán iguales. El único inconveniente es que se estará tomando una sección muy levemente mayor para el secundario.

Finalmente podría interesar el cálculo anticipado del peso del hierro y del cobre del transformador. Pero ello merece que nos detengamos, para hacerlo con más detalle.

PESO DEL COBRE DE LOS BOBINADOS

Para calcular el peso del cobre de nuestro transformador, utilizaremos el coeficiente de plenitud k_c que ha intervenido en los cálculos. Como las dimensiones del núcleo han resultado de acuerdo con el valor adoptado para k_c el valor que se obtenga para el peso de cobre será exacto, ya que se parte de datos que sirvieron para dimensionar todo el conjunto.

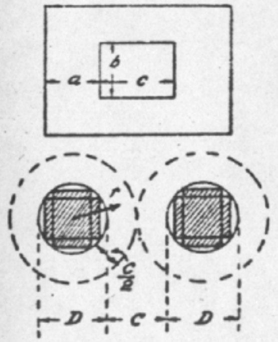

Fig. 89. — Corte de un núcleo monofásico con sección en cruz.

Supongamos un núcleo en corte, como se ve en la figura 89. Por el momento consideraremos que la sección tiene la forma ideal, para mínimo volumen del núcleo, es decir, en cruz. Las dimensiones que nos interesan están marcadas en el croquis de la misma figura. Obsérvese que al arrollar el conductor sobre el núcleo, la primera espira tendrá un radio igual a la mitad del diámetro del círculo que envuelve a dicho núcleo, y que la última espira de esta sección tendrá un radio igual al de la primera, más la mitad de la dimensión *c*. Luego el radio medio del bobinado, o, lo que es lo mismo, el radio de la espira media vale:

$$r = \frac{D}{2} + \frac{c}{4}$$

Se supone que el otro bobinado está arrollado alrededor de la otra sección igual del núcleo. Teniendo el radio medio, puede calcularse el volumen del bobinado, pues es un toroidé cilíndrico, de espesor c/2 y alto b; se tiene:

$$v = 2\pi\left(\frac{D}{2}+\frac{c}{4}\right) b \ \frac{2}{c}$$

Que vale para un bobinado; los dos juntos ocuparán un volumen doble. Todas las dimensiones se dan en cm, de manera que multiplicando por el peso específico 8,9 se tiene el peso en gramos, y dividiendo por 1000, en Kg. Pero hay que tener presente que el volumen del toroide no está lleno de cobre, pues hay aislación y espacios vacíos. Para calcular el volumen neto de cobre, afectaremos a la expresión con el factor de plenitud del cobre, k_c, que tiene precisamente ese concepto:

$$Q_c = 4\pi\left(\frac{D}{2} + \frac{c}{4}\right) k_c\, b\ \frac{c}{2}\ 8{,}9 \cdot \frac{1}{1000}$$

Expresión que permite hacer varias simplificaciones numéricas y algebraicas, obteniendo finalmente la fórmula definitiva:

$$Q_c = 0{,}014\ k_c\ b\ c\ (2\ D + c) \quad \text{[para monofásicos]}$$

Donde las dimensiones del número se dan en cm, y el peso Q_c resulta en Kg. Esta fórmula es válida para transformadores monofásicos. Para trifásicos, hay que considerar tres toroides en lugar de dos, según se puede apreciar en la figura 90. Lo más simple para calcular el peso del cobre en un transformador trifásico, es multiplicar por 1,5 a la fórmula dada para monofásicos, con lo que se tiene:

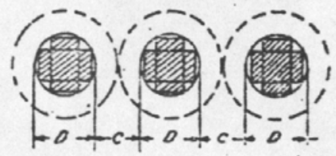

Fig. 90. — Corte de un núcleo trifásico con sección en cruz.

$$Q_c = 0{,}021\ k_c\ b\ c\ (2\ D + c) \quad \text{[para trifásicos]}$$

Donde las letras significan lo mismo que antes y el peso se tiene en Kilogramos. Se ve que en cuanto se conocen las dimensiones del núcleo, puede obtenerse el peso necesario de cobre.

PESO DEL NÚCLEO DE HIERRO

En forma similar a lo que hemos hecho para calcular el volumen, y luego el peso del cobre, podemos proceder para calcular el peso del hierro empleado en el núcleo. Para ello, veamos la figura 91 que muestra un núcleo con las dimensiones marcadas.

La parte que queda dentro de los bobinados tiene sección en cruz, a efectos de ocupar mínimo espacio, según se ha visto; las partes superior e inferior tienen sección rectangular; de base igual al ancho mayor de la sección en cruz, y altura dada por la que necesite para tener igual sección que las partes verticales.

Sabemos que el ancho de la sección en cruz vale:

$$a = 0{,}85\ D$$

Y que el área neta de la sección, en función de este diámetro D y del coeficiente de plenitud del hierro k_f, vale:

$$S = 0{,}785\ D^2\ k_f$$

Donde el factor 0,785 es la cuarta parte de 3,14, según ya sabemos. En virtud de ello, el alto de las partes inferior y superior, marcado en la figura con la letra g, puede calcularse por cociente entre el área de la sección neta y el ancho que debe tener:

$$g = \frac{0{,}785\ D^2\ k_f}{0{,}85\ D} = 0{,}925\ D\,k$$

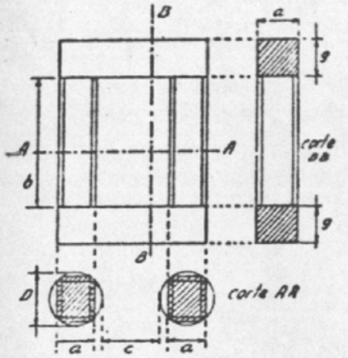

Fig. 91. — Cortes y vistas de un núcleo en anillo con sección en cduz.

Ahora podemos calcular el volumen de hierro, pues hay dos ramas de sección S y largo b, y otras dos de sección S y largo $(c + 2\,D) - (D - a)$. De modo que se tiene:

$$v = 2\ S\ b + 2\ S\ (c + D + a)$$

Y si en esta fórmula ponemos en lugar de a, que no siempre es cómodo conocer de antemano, su equivalente (0,85 D), y en lugar de la sección ponemos $(0{,}785\ D^2\ k_f)$, y multiplicamos por el peso específico 7,8 y dividimos por 1000 para tener el resultado en Kg, resulta, después de simplificar los valores numéricos:

$$Q_f = 0{,}012\ k_f\ D^2\ (b + c + 1{,}85\ D) \quad \text{[para monofásicos]}$$

Donde las dimensiones del núcleo se toman en cm, y el peso Q_f de todo el hierro resulta en Kg. Para transformadores trifásicos haríamos las mismas consideraciones y obtendríamos la expresión:

$$Q_f = 0{,}006\ k_f\ D^2\ (3\ b + 4\ c + 5{,}7\ D) \quad \text{[para trifásicos]}$$

Donde las letras significan lo mismo que en la fórmula anterior, y el peso del núcleo se tiene también en Kg. Ambas expresiones permiten calcular el peso total del núcleo en cuanto se conocen sus dimensiones principales.

EJEMPLO DE CÁLCULO DE UN TRANSFORMADOR

Para aclarar cualquier duda en el uso del planteo desarrollado en todo lo que precede, pongamos un ejemplo numérico. Sea un transformador con los siguientes datos: Potencia aparente $P_a = 20$ KVA — Tensiones: $E_1 = 6600$ V; $E_2 = 220$ V. Monofásico. Y supongamos que se dispone de chapas de acero al 2 % de silicio, de espesor 0,35 mm. El transformador será para servicio permanente, con lo que la relación de pérdidas en el hierro y en el cobre da la unidad.

En la figura 15 tenemos la curva de imanación de chapas, de la que obtenemos un valor permisible: B = 12000 Gauss.

En la figura 35 tenemos las pérdidas en el hierro, para B = 12000 Gauss y espesor de chapa 0,35; tenemos $p_f = 3{,}5$ W/Kg.

Como queremos que la relación de pérdidas valga la unidad. $\beta = 1$.

Corresponde adoptar otros valores para proseguir el cálculo. La densidad de corriente la tomamos igual a: $\delta = 2\ \text{A/mm}^2$. El coeficiente de plenitud del cobre, para bobinados de alta tensión puede tomarse en la figura 88 igual a k_c : 0,35 para diámetros medios. Y si usamos la sección óptima en cruz, el coeficiente de plenitud del hierro vale $k_f = 0{,}7$. Supongamos que la frecuencia f = 50 c/s.

Ahora podemos comenzar los cálculos. Para ello calculamos los coeficientes *n* y *m*, que conocemos, en la siguiente forma:

Coeficiente n:

$$n = \frac{0{,}57\ P_a\ 10^6}{B\ f\ \delta\ k_f\ k_c} = \frac{0{,}55 \times 20000 \times 10^6}{12000 \times 2 \times 50 \times 0{,}35 \times 0{,}7}$$

$$n = 38800$$

Coeficiente m:

Primero se calcula α:

$$\alpha = \frac{2{,}25\ \delta^2\ \beta}{p_f} = \frac{2{,}25 \times 4 \times 1}{3{,}5}$$

$$\alpha = 2{,}57$$

Y ahora podemos calcular m:

$$m = \frac{1{,}16\ k_c\ \alpha}{k_f} = \frac{1{,}16 \times 0{,}35 \times 2{,}57}{0{,}7}$$

$$m = 1{,}5$$

Valores de p y t en la tabla:

Buscamos en la tabla de página 120 para m = 1,5 y resulta:

$$p = 1{,}78$$
$$t = 2{,}15$$

Cálculo de las dimensiones del núcleo:

$$D = \sqrt[4]{\frac{m\ n}{p}} \qquad \sqrt[4]{\frac{1{,}5 \times 38800}{1{,}78}}$$

$$D = 13{,}5\ cm$$

$$b = t\ D = 2{,}15 \times 13{,}5 = 29\ cm$$

$$c = \frac{n}{D^2\ b} = \frac{38800}{13{,}5^2 \times 29} = 7{,}3\ cm$$

Sección $S = 0{,}785\ k_f\ D^2 = 0{,}785 \times 0{,}7 \times \overline{13{,}5}^2 = 100\ cm^2$

Cálculo del bobinado:

El número de espiras del secundario es:

$$N_2 = \frac{10^8\ E_2}{4{,}44\ f\ B\ S} = \frac{10^8 \times 220}{4{,}44 \times 50 \times 12000 \times 100} = 82$$

El número de espiras del primario es:

$$N_1 = k\ N_2 = \frac{6600 \times 82}{220} = 2460$$

La corriente secundaria, por tratarse de un transformador monofásico vale:

$$I_2 = \frac{P_n}{E_2} = \frac{20000}{220} = 90\ A$$

Y la corriente primaria vale este último valor dividido por k:

$$I_1 = \frac{90 \times 220}{6600} = 3\ A$$

Las secciones de los dos bobinados, con densidad 2 A/mm², son:

$$s_2 = 45\ mm^2 \quad ; \quad s_1 = 1{,}5\ mm^2$$

Peso del cobre y del hierro:

$$Q_c = 0{,}014\ k_c\ b\ c\ (2\ D + c)$$

$$Q_c = 0{,}014 \times 0{,}35 \times 29 \times 7{,}3\ (2 \times 13{,}5 + 7{,}3)$$

$$Q_c = 35{,}7\ Kg\ \text{(peso del cobre)}$$

$$Q_f = 0{,}012\ k_f\ D^2\ (b + c + 1{,}85\ D)$$

$$Q_f = 0{,}012 \times 0{,}7 \times 13{,}5^2\ (29 + 7{,}3 + 1{,}85 \times 13{,}5)$$

$$Q_f = 94\ Kg\ \text{(peso del hierro)}$$

Pérdidas en el cobre y en el hierro:

Las pérdidas por Kg de cobre valen:

$$p_c = 2{,}25\ \delta^2 = 2{,}25 \times 4 = 9\ W/Kg$$

Luego las pérdidas totales en el cobre:

$$W_c = p_c\ Q_c = 9 \times 35{,}7 = 321{,}3\ W$$

Y las pérdidas totales en el hierro valen:

$$W_f = p_f\ Q_f = 3{,}5 \times 94 = 329\ W$$

que resultan aproximadamente iguales a las del cobre, como se quería.

Rendimiento:

El rendimiento del transformador se puede calcular con la expresión:

$$\eta = \frac{P_n}{P_n + W_c + W_f} = \frac{20000}{20000 + 321{,}3 + 329} = 0{,}968$$

$$\eta = 96{,}8\ \%$$

A título informativo, veamos lo que hubiera resultado si se hubiera tomado un núcleo de sección cuadrada en lugar de sección en cruz. Por lo pronto, los coeficientes generales de los cálculos se alteran, puesto que sabemos que el de plenitud del hierro vale solament:

$$k_f = 0{,}56$$

Y con este valor, se obtienen los siguientes resultados, que ponemos directamente para evitar el laborioso proceso numérico:

$$n = 48500$$

$$m = 1{,}86$$

Entrando en la tabla con este último valor se encuentran los dos coeficientes:

$$p = 1{,}724$$

$$t = 1{,}98$$

Obtenidos por interpolación entre valores sucesivos. Ahora se calculan las dimensiones del núcleo, que resultan:

$$D = 15{,}1\ cm$$

$$b = 30\ \ cm$$

$$c = 7{,}1\ \ cm$$

La sección neta del núcleo resulta aproximadamente igual a la anterior, es decir, 100 cm², que está formada por un lado de longitud:

$$a = 0{,}7\ D = 0{,}7 \times 15{,}1 = 10\ cm$$

Las pérdidas en el hierro y en el cobre son algo mayores, pues calculando sale:

$$W_c = 351\ W$$

$$W_f = 346{,}5\ W$$

Y también resultan mayores los pesos de cobre y hierro:

$$Q_c = 39 \text{ Kg}$$

$$Q_f = 99 \text{ Kg}$$

Y hasta hay una pequeña diferencia en el rendimiento, que resulta, después de calculado:

$$\eta = 0{,}96 = 96 \ \%$$

Todo lo cual nos indica que siempre que no haya inconvenientes de otra naturaleza, se adoptará la sección óptima en cruz para el núcleo. Los menores pesos necesarios de cobre y de hierro justifican esta aseveración, por sí solos.

CAPÍTULO VIII

CÁLCULO SIMPLIFICADO DE TRANSFORMADORES COMUNES, ESPECIALES Y AUTOTRANSFORMADOES

En el capítulo anterior se ha visto el cálculo completo del transformador, de modo que puede resolverse cualquier caso que se presente en la práctica. Sin embargo, cuando se trata de potencias medias y pequeñas, con servicio en bajas tensiones, casi nunca se pretende ir al detalle, y suele utilizarse un criterio más dirigido hacia el empirismo. De estadísticas de fabricación pueden obtenerse datos de proporciones de núcleos referidos a la potencia en juego, y a relaciones entre las medidas de un mismo núcleo. También se encuentran factores que llegan a tales dimensiones con el número de espiras de los bobinados.

A todo ello lo llamamos cálculo simplificado, porque permite ahorrar tiempo en el diseño, aunque desde luego anticipamos que cuando se trata de transformadores grandes, es preferible realizar el proceso tratado anteriormente, o, por lo menos, verificar los cálculos con él.

En lo que sigue, se clasifican los transformadores en dos categorías, en lo que atañe al tipo de servicio: constante e intermitente. Los primeros son los transformadores de distribución, que tienen funcionamiento permanente, aunque la carga no sea constante, como es el caso de las subestaciones de las redes, las instalaciones industriales, etc. Los de servicio intermitente son aquellos en los que el primario permanece siempre conectado, pero se toma carga sólo a intervalos más o menos prolongados. Es lógico que según el servicio, convendrá que las pérdidas en el cobre sean iguales a las del hierro o sean mayores que éstas, según ya se ha visto anteriormente.

Además de esta clasificación, siempre queda la que se había hecho para los núcleos, agrupándolos en los dos tipos clásicos: anillo y acorazado. Los trifásicos pueden ser en anillo, que son los más comunes, o simétricos, de utilización sólo en grandes potencias, por lo que quedan fuera de los que trataremos en el presente capítulo. De modo que cuando los núcleos centrales o verticales de las bobinas son todos iguales, el núcleo se llama en anillo, y cuando las secciones laterales son de menor ancho, pero hay dos de ellas, se trata del acorazado.

TENSIÓN ESPECÍFICA

A diferencia del método general, el simplificado calcula previamente el bobinado, y después el núcleo. Esto sólo es posible si se dispone de estadísticas completas, pues es más lógico prever primero el circuito magnético, y determinar después las condiciones de enlace con el eléctrico.

La tensión específica es la relación que hay entre la f.e.m. inducida en cada devanado y la cantidad de espiras del mismo:

$$V_e = \frac{E}{N}$$

Válida para los dos devanados. Si en esta relación se reemplaza el valor de la f.e.m. dado por su expresión general, se tiene:

$$V_e = \frac{E}{N} = \frac{4{,}44\ f\ \Phi\ N\ 10^{-8}}{N}.$$

Donde se puede simplificar N arriba y abajo; pero en cambio multipliquemos numerador y denominador por la corriente que circula por el bobinado, dejando sin simplificar la N; tenemos:

$$V_e = \frac{E\,I}{N\,I} = \frac{4{,}44\ f\ \Phi\ N\,I\ 10^{-3}}{N\,I}$$

Y si ahora multiplicamos entre sí las dos expresiones que dan V_e, obtenemos el cuadrado de este factor o tensión específica, dado por ese producto:

$$V_e^2 = \frac{E\,I}{N\,I}\ \frac{4{,}44\ f\ \Phi\ N\,I\ 10^{-8}}{N\,I.}$$

Y ahora sí podemos hacer algunas simplificaciones interesantes: en primer lugar eliminamos un numerador y un divisor N I; luego, ponemos en lugar del producto E I la potencia aparente del transformador, dada en Voltamper; y escribimos separadamente la primer parte de la expresión y la segunda, sacando raíz cuadrada a los dos miembros, a fin de hacer notar los factores que son dependientes de la potencia y los que no lo son, se tiene:

$$V_e = \sqrt{P_a}\ \sqrt{\frac{4{,}44\ f\ \Phi}{10^8\ N\,I}}$$

La expresión obtenida es la que utilizaremos para introducir los valores empíricos que suministra la estadística. En la segunda raíz aparece en el numerador el producto del flujo y la frecuencia, y en el denominador el producto del número de espiras y la corriente. Ambos productos están relacionados por números fijos, que se cumplen para una gran cantidad de casos prácticos, y dentro de los límites que se han especificado en este capítulo. Luego, en virtud de ello, podemos decir que toda la segunda raíz tendrá un

valor que se puede utilizar para toda una serie de transformadores. Asignándole categoría de coeficiente empírico, pondríamos:

$$V_e = A\sqrt{P_a}$$

Donde el coeficiente A se da en la tabla, para los tipos usuales de transformadores, y P_a es la potencia aparente del transformador, en VA.

Tipo de transformador	Valor de A	
	Máximo	Mínimo
Núcleo anillo, servicio intermitente	0,022	0,014
Núcleo anillo, servicio constante	0,030	0,020
Núcleo acorazado, servicio intermitente	0,026	0,025
Núcleo acorazado, servicio constante	0,045	0,033

Debiendo tomarse los valores máximos para tensiones más bajas y frecuencias más altas, y los valores mínimos para las tensiones más altas y frecuencias menores.

En resumen, de todo lo dicho se desprende que para calcular el factor que designamos como tensión específica, sólo hay que conocer la potencia aparente del transformador (dato del problema) y el tipo de servicio, con lo cual se aplica la última fórmula y se obtiene V_e. Por consiguiente, calcular el número de espiras de cada devanado es muy sencillo, pues se conocerán las tensiones respectivas, y cada número de espiras será:

$$N = \frac{E}{V_e}$$

Que se puede aplicar a los dos bobinados, obteniéndose el número de espiras de cada uno, y siendo E las respectivas tensiones conocidas para primario y secundario.

DIMENSIONADO DEL NÚCLEO

Si tomamos nuevamente la expresión general de la f.e.m., a la que dividimos por el número de espiras para que nos dé la tensión específica, y colocamos el producto de la inducción por la sección de núcleo en lugar de flujo, se tiene la fórmula:

$$S = \frac{V_e\ 10^8}{4{,}44\ f\ B}$$

En cuya expresión ya hemos despejado la sección S, en cm², del núcleo, y que aparece dada en función de la tensión específica, que ya conocemos, de la frecuencia f, en c/s, y de la inducción máxima B en Gauss. Si adoptamos un valor para la inducción magnética, ya está resuelto el problema, pues las demás cantidades de la fórmula son conocidas.

La inducción magnética en transformadores, puede tomar valores que dependen del tipo de servicio, y en la práctica suelen utilizarse las siguientes cifras:

Para servicio intermitente: B = 10000 a 13000
Para servicio constante: B = 13000 a 15000

Se explica que las cifras para servicio intermitente sean menores, puesto que en estos casos se trata de reducir las pérdidas en el hierro, para aumentar las del cobre. Los datos de la inducción corresponden a frecuencias de trabajo de 50 a 60 ciclos por segundo. Para frecuencias menores pueden elevarse algo los valores, más o menos en un 10 %.

De modo que se dispone ya de la sección del núcleo, y resta establecer las dimensiones de las ventanas y repartir los dos lados de la sección S. Si esta

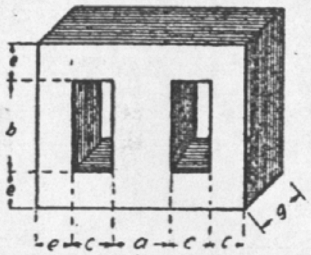

FIG. 92. — Indicación de las dimensiones de un núcleo tipo acorazado.

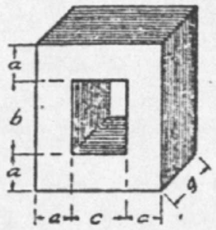

FIG. 93. — Indicación en un núcleo monofásico en anillo.

última se adopta cuadrada, sus dos medidas serán iguales, pero en caso contrario serán diferentes. También puede usarse la sección en cruz, de que se habló en el capítulo anterior.

Para dimensionar el resto del núcleo se emplean relaciones más o menos prácticas, que dan unas de ellas en función de las otras. Así, para núcleos acorazados, las distintas medidas que se ilustran en la figura 92, están relacionadas en la siguiente forma:

$$\frac{b}{c} = 2{,}5 \quad \text{a} \quad 3{,}5$$

$$\frac{g}{a} = 2 \quad \text{a} \quad 3$$

$$\frac{e}{a} = 0{,}5 \quad \text{a} \quad 0{,}75$$

Y para transformadores a núcleo anillo, las medidas ilustradas en la figura 93 están relacionadas en la siguiente forma:

$$\frac{b}{c} = 2{,}5 \quad \text{a} \quad 3{,}5$$

$$\frac{g}{a} = 1{,}0 \quad \text{a} \quad 1{,}5$$

Claro está que tales relaciones permiten encontrar algunas medidas cuando se conocen otras. Pero no hay que olvidar que la ventana debe permitir el paso de los dos devanados, de modo que hay que partir de esta base para dimensionarla.

A tal objeto, supongamos que los ampervueltas de ambos devanados son iguales, lo que es suficientemente exacto; luego escribimos:

$$s = \frac{I}{\delta}$$

Es decir, que la sección del alambre conductor está dada por el cociente entre la corriente y la densidad de corriente. Como la superficie necesaria de la ventana es igual al producto del número de espiras por la sección del alambre, sumando los dos bobinados, y teniendo en cuenta el espacio vacío y la aislación, podemos escribir:

$$k_c \, b \, c = 2 N s = 2 \frac{N I}{\delta}$$

Donde k_c es el factor de plenitud del cobre, definido en el capítulo anterior, dado en la curva de la figura 88, y cuyo concepto expresa la relación entre la sección neta de cobre y la superficie de la ventana. En la expresión última, las dos medidas *b* y *c* están dadas en cm, el producto N I puede referirse a cualquiera de los dos devanados, por ejemplo al secundario, y la densidad habría que tomarla en Amper por cm²; como esto último es incómodo, se la multiplica por 100, pero se la expresa en A/mm². Finalmente, nos queda:

$$b \, c = \frac{N I}{50 \, k_c \, \delta}$$

Con lo que se obtiene la superficie de la ventana del núcleo, repartiendo las dos dimensiones en forma que entre ellas se cumpla la relación que se dió anteriormente. Si se toma un promedio de b = 3 c, se puede simplificar el cálculo, pues la última fórmula da el producto de la medida *c* por 3 *c*, y resolviendo por una raíz cuadrada, obtenemos:

$$c = \sqrt{\frac{N I}{150 \, k_c \, \delta}}$$

Con lo que la dimensión *c* obtenida en cm, resulta dada en función del número de espiras de uno de los bobinados, N; la corriente que circula por ese bobinado, I, en Amper; el factor de plenitud del cobre y la densidad de corriente en A/mm². Una vez calculada esta dimensión se tienen las demás usando los relaciones vistas anteriormente. Pero aclaremos cuál es el valo usual de la densidad de corriente.

Tipo de transformador	densidad δ (A/mm²)
Bobinados al aire, tipo común	1,0 a 2,0
En baño de aceite, refrigeración natural	1,5 a 2,5
Con refrigeración de agua	2,5 a 3,0
En aceite, enfriado con aire forzado	2,5 a 3,5
Refrigeración excepcionalmente buena	3,5 a 4,0

BOBINADOS DEL TRANSFORMADOR

Las secciones de los conductores empleados en los dos bobinados se calculan conociendo las corrientes que los recorren y la densidad de corriente que puede adoptarse, en función de la clase de refrigeración empleada. Por simple cociente entre estos dos datos, tenemos:

$$s = \frac{I}{\delta} \; [\text{mm}^2]$$

Válida para los dos bobinados, siempre que se tome la corriente que corresponda en cada caso. Como las secciones de cobre que se encuentran en plaza siguen una serie standard, habrá que elegir la que esté más cerca del valor calculado, preferiblemente mayor, si no hay gran disparidad.

El devanado se dispone en capas, y se especifica que la tensión entre dos capas sucesivas no debe ser mayor de 350 V. Este detalle puede hacer modificar la forma de la ventana, adoptando distinta proporción entre sus lados. Los demás detalles pertenecen a las consideraciones prácticas constructivas del transformador, de manera que los dejaremos para más adelante.

EJEMPLO DE CÁLCULO

Para ilustrar sobre el método simplificado de cálculo de transformadores, resolveremos un ejemplo numérico, para transformador monofásico: Calcular un transformador de 20 KVA de potencia, para 6600/220 V, con frecuencia 50 c/s, y que trabajará en servicio continuo. El núcleo será en anillo.

Adoptaremos los siguientes valores, tomados de las tablas y curvas propuestas:

Inducción B = 12000 Gauss.

Densidad de corriente $\delta = 2$ A/mm².

Factor de plenitud de cobre $k_c = 0{,}35$ por ser alta tensión.

Factor A, por ser de servicio continuo A = 0,02.

Con lo que se puede calcular la tensión específica:

$$V_e = A\sqrt{P_a} = 0{,}02\sqrt{20000} = 2{,}83$$

Y los números de espiras de los dos bobinados resultan:

$$N_1 = \frac{E_1}{V_e} = \frac{6600}{2{,}83} = 2340$$

$$N_2 = \frac{E_2}{V_e} = \frac{220}{2{,}83} = 78$$

Que están entre sí en la relación de transformación, k : 30, como se comprueba. La sección del núcleo, de acuerdo con lo visto, vale:

$$S = \frac{V_e\, 10^8}{4{,}44\, f\, B} = \frac{2{,}83 \times 10^8}{4{,}44 \times 50 \times 12000} = 106\ \text{cm}^2$$

La sección de la ventana se calcula partiendo de su ancho, para lo cual hay que conocer el número de espiras y la corriente en un devanado; tomemos el secundario, cuyo número de espiras es 78, y la corriente vale:

$$I_2 = \frac{P_a}{E_2} = \frac{20000}{220} = 91\ \text{A}$$

Con lo que el ancho de la ventana será:

$$c = \sqrt{\frac{N\,I}{150\, k_c\, \delta}} = \sqrt{\frac{78 \times 91}{150 \times 0{,}35 \times 2}} = 8{,}2\ \text{cm}$$

Y el alto de la ventana será el triple, ya que adoptamos la relación 3:

$$b = 3\,c = 3 \times 8{,}2 = 24{,}6\ \text{cm}$$

El núcleo puede ser de sección cuadrada, en cuyo caso el lado de la misma es la raíz de la sección, y vale:

$$a = 10{,}3\ \text{cm}$$

Los conductores los calculamos en función de la densidad y las corrientes circulantes; la corriente primaria es aproximadamente de 3 A, pues es 30 veces menor que la secundaria, con lo que las secciones de los conductores valen:

$$s_2 = \frac{I_2}{\delta} = \frac{91}{2} = 45{,}5\ \text{mm}^2$$

$$s_1 = \frac{I_1}{\delta} = \frac{3}{2} = 1{,}5\ \text{mm}^2$$

Y queda resuelto el problema en todos sus detalles. Puede compararse este caso con el ejemplo que dimos para un transformador de iguales datos en el capítulo anterior, aunque en ese caso se trataba de uno trifásico. Sin embargo, las dimensiones del núcleo han resultado similares. Pero debemos hacer algunas aclaraciones.

MÉTODO SIMPLIFICADO PARA TRIFÁSICOS

El cálculo de transformadores trifásicos se hace preferentemente por el método descrito en el capítulo anterior, por tratarse generalmente de unidades de mayor potencia. Pero, si se deseara verificar rápidamente las dimensiones u otros datos puede utilizarse el método simplificado. En este caso, el núcleo tiene las características que indica la figura 94, y se ve en seguida que cada ventana debe dar cabida a los bobinados de dos fases, si bien es cierto que las corrientes que los recorren, y por ende, las secciones, son más pequeñas. Por este motivo, el cálculo de transformadores trifásicos, si se quiere hacerlo por este método simplificado, lo que no es del todo conveniente, se atendrá a las siguientes condiciones:

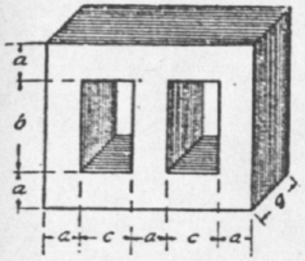

FIG. 94. — Indicación de las dimensiones en un núcleo trifásico en anillo.

La tensión específica se calculará con la misma expresión vista para monofásicos, interviniendo la potencia total del transformador como potencia aparente P_a. Con el dato resultante se calcularán los respectivos números de espiras, de cada primario y cada secundario. Lo mismo para la sección del núcleo, se empleará la fórmula ya vista para monofásicos.

Las secciones de los conductores se calcularán con la corriente de una sola fase, es decir, con la tercera parte de la potencia aparente dividida por la tensión, ya que la intensidad circulante está dada por ese cociente.

La fórmula que da el ancho de la ventana debe ser modificada, porque en cada ventana pasan los primarios y secundarios de dos fases. La nueva fórmula es:

$$c = \sqrt{\frac{N}{75\, k_c\, \delta}}$$

Donde la corriente y el número de espiras corresponde a un bobinado, primario o secundario, pero de una sola fase. La proporción entre las dimensiones del núcleo se mantiene igual que para monofásicos, es decir, que la dimensión: alto de la ventana, puede ser también:

$$b = 3\,c$$

como antes. La sección del núcleo puede ser cuadrada o rectangular, o si no en cruz para mejor aprovechamiento del espacio, como hemos demostrado en el capítulo anterior. De manera que se ve que casi no hay nada que agregar a lo dicho antes, salvo el detalle del ancho de la ventana. Insistimos que para transformadores de gran potencia, especialmente trifásicos, conviene verificar los cálculos con el método general. En transformadores monofásicos suelen obtenerse buenos resultados con las simplificaciones que permite el método visto últimamente.

CASO DE TRANSFORMADORES MUY PEQUEÑOS

Para transformadores muy pequeños, de potencias inferiores a I KVA, todavía se pueden simplificar más los cálculos, ya que hay menos interés en conseguir rendimientos elevados. En tales casos suele adoptarse un rendimiento bajo para conseguir apreciable economía en el costo de los materiales. Un caso típico de tales transformadores es el de los equipos rectificadores de baja potencia, que llevan un transformador con varios secundarios.

En tales casos, puede recurrirse a un método sumamente rápido de cálculo, que comienza por fijar la sección del núcleo, luego determina el número de espiras de cada bobinado, y finalmente da las secciones del alambre y de la ventana del núcleo.

La sección del núcleo se da por la fórmula:

$$S = 1{,}5\,\sqrt{P_a}$$

Donde P_a es la potencia aparente del transformador. Si hay varios secundarios, esa potencia debe ser la total, es decir, la suma de los productos de cada tensión por cada corriente máxima de consumo; se da en VA, y la sección resulta en cm².

Luego se calcula el número de espiras del primario, por simple deducción hecha de la expresión general de la f.e.m. inducida, que ya conocemos:

$$N_1 = \frac{V_1\, 10^8}{4{,}44\, f\, S\, B}$$

En cuya expresión, V_1 es la tensión aplicada al primario, en Volt; f es la frecuencia de la red, en c/s; S es la sección del núcleo, que resultó anteriormente, en cm² y B es la inducción en Gauss, que para este tipo de transformadores se toma comprendida entre 8.000 y 10.000 Gauss, para limitar las pérdidas en el hierro.

El número de espiras de cualquiera de los bobinados secundarios se calcula referida al primario, por la conocida relación:

$$N_2 = \frac{N_1\, V_2}{V_1}$$

Donde las tensiones y números de espiras con subíndice 1 corresponden al primario y las de subíndice 2 al secundario.

La sección de los conductores se calcula tomando sus respectivas corrientes de carga y una densidad de corriente comprendida entre:

$$\delta = 1{,}0 \quad a \quad 2{,}0\ A/mm^2$$

Aunque no conviene llegar a la cifra mayor, por razones de elevación excesiva de temperatura, ya que estos transformadores pequeños tienen refrigeración natural sin baño de aceite.

La dimensión de la ventana se calcula con la expresión vista anteriormente, pero puede adoptarse un factor de plenitud mayor, si hay un solo secundario.

Si hay varios, no conviene elegir valores de k_c grandes, por la cantidad de piezas aislantes a interponer, además de un detalle muy importante: cada secundario ocupa como mínimo, una capa, aunque por su número de espiras necesite mucho menor ancho; luego, el ancho de la ventana debe contemplar ese desperdicio, y para ello se toman valores del factor de plenitud como si se tratara de transformadores de alta tensión. Luego, puede usarse el gráfico de la figura 88, y la fórmula ya vista:

$$c = \sqrt{\frac{\Sigma N I}{150\, k_c\, \delta}}.$$

Donde el símbolo sumatorio que aparece dentro de la raíz es para indicar que debe tomarse la suma de los ampervueltas de todos los secundarios que tenga el transformador. El ancho *c* resulta en cm, según se ha visto anteriormente. Luego puede tomarse el alto de la ventana:

$$b = 3\,c$$

Y establecer las proporciones restantes en la forma conocida. Casi siempre la sección del núcleo se adopta cuadrada, en estos casos.

CÁLCULO GRÁFICO DE TRANSFORMADORES PEQUEÑOS

Las expresiones anteriores para dimensionar transformadores de hasta 1 Kw de potencia pueden llevarse a una simplificación mayor para los casos en que se deban calcular con mucha frecuencia. Para tal fin no hay más que trazar gráficos que den resueltos los dos cálculos principales, el de la sección

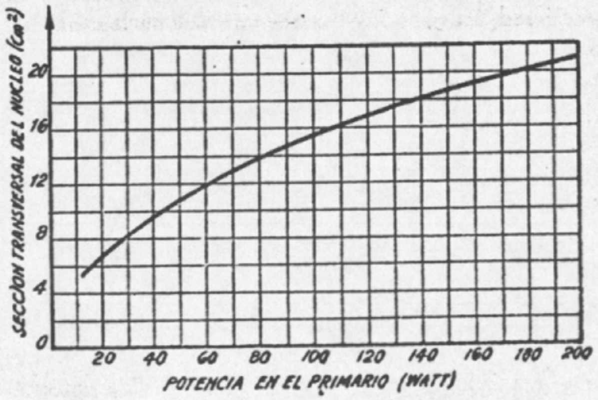

FIG. 95. — Sección transversal del núcleo para transformadores de hasta 200 Watt.

del núcleo y el de la cantidad de espiras del primario, luego de lo cual lo que resta es muy simple. Es evidente que siempre debemos determinar previamente la potencia del transformador, obtenidas para este tipo de cálculos por simple sumatoria de todas las potencias de los bobinados secundarios, cada uno de los cuales sirve una tensión determinada a un consumo también dado.

A esa sumatoria se le agrega un 20 % para tener en cuenta las pérdidas, cifra que parece un poco grande pero usual en transformadores pequeños.

Obtenida la potencia total del transformador (consumida en los secundarios), pasaremos a determinar la sección transversal del núcleo mediante

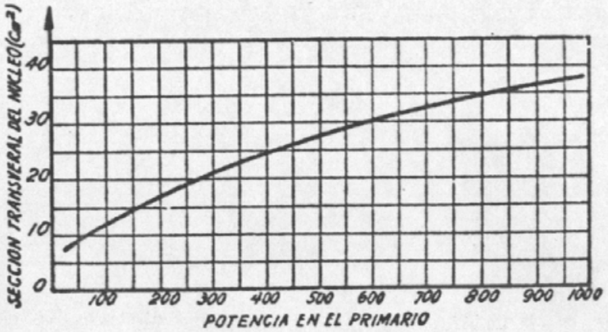

FIG. 96. — Sección transversal del núcleo para transformadores de 200 hasta 1000 Watt.

dos gráficos que la dan directamente. Uno, el de la figura 95, es para transformadores de potencia hasta 200 Watt, y otro, de la figura 96, es para transformadores comprendidos entre 200 y 1000 Watt. En estos gráficos se entra en el eje horizontal con la potencia calculada y llegando a la curva, se lee en el eje vertical la sección necesaria para el núcleo, directamente en cm².

Una vez obtenido ese dato, pasamos a determinar, también gráficamente, el número de espiras del bobinado primario. Usamos ahora dos gráficos, del mismo modo que para la sección, uno para los transformadores hasta 200 W y otro para los comprendidos entre 200 y 1000 W. El primer gráfico se da en la figura 97 y el segundo en la figura 98. En ambos se entra con la sección obtenida antes, por el eje horizontal, leyendo en el vertical la cantidad de espiras del primario, directamente. Como estos gráficos dan resultados aproximados, no se ha empleado papel milimetrado sino cuadriculado, lo que en la práctica da aproximación suficiente.

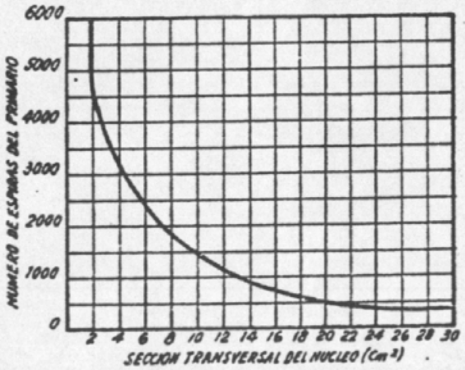

FIG. 97. — Número de espiras del primario para transformadores hasta 200 Watt.

Ahora podemos determinar los números de espiras de los secundarios, pues conocemos las tensiones que ellos deben dar. Para cada secundario aplicamos la expresión:

$$N_2 = \frac{E_2\, N_1}{E_1}$$

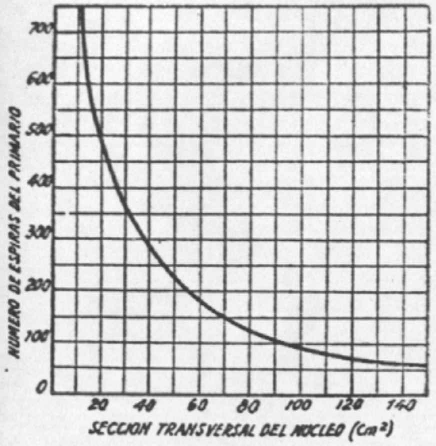

FIG. 98. — Número de espiras del primario para transformadores de 200 hasta 1000 Watt.

Siendo las letras E las tensiones y las N los números de espiras, y correspondiendo el subíndice 1 al primario y el 2 al secundario.

Para las secciones de los alambres a emplear en los distintos bobinados podemos hacer el cálculo de sus secciones, pues conocemos las intensidades de cada secundario, dato del problema, y la densidad admisible, 2 A/mm². Pero el resultado de las operaciones debe contemplar la existencia de alambres, por lo que hemos creído interesante dar la tabla adjunta, que nos da todo el problema resuelto:

Diámetros y secciones de los alambres

Corriente Amper	Diámetro mm	Sección mm²
0,015	0,10	0,0078
0,020	0,11	0,0095
0,025	0,12	0,0113
0,035	0,15	0,0176
0,050	0,18	0,0254
0,065	0,20	0,0314
0,075	0,22	0,038
0,100	0,25	0,050
0,130	0,28	0,062
0,150	0,30	0,070
0,190	0,35	0,096
0,250	0,40	0,126
0,320	0,45	0,160
0,400	0,50	0,196
0,450	0,55	0,238
0,550	0,60	0,283
0,650	0,65	0,332
0,750	0,70	0,385
0,850	0,75	0,442
1,000	0,80	0,503
1,130	0,85	0,567
1,270	0,90	0,636
1,600	1,00	0,785
2,250	1,20	1,13
3,500	1,50	1,77
5,000	1,80	2,54
6,500	2,00	3,14
10,000	2,50	4,91

DIMENSIONADO DE TRANSFORMADORES PEQUEÑOS

El dimensionado del núcleo puede hacerse siguiendo el procedimiento explicado en páginas anteriores, pero en el caso de los transformadores pequeños, resulta mucho más rápido adoptar ciertas normas prácticas. La figura 99 da las dimensiones típicas del núcleo, las que están relacionadas entre sí por las siguientes condiciones prácticas:

$$g = 1{,}5\ a$$
$$e = 0{,}5\ a$$
$$b = 1{,}5\ c$$

Y notamos que las dimensiones b y c están vinculadas al espacio que necesitan los bobinados, por lo que no podemos calcularlas todavía. Los bobinados se hacen en capas, y cada capa necesita un espesor determinado, más la aislación entre capas. Sumando todo eso llegamos a la medida c. Una fórmula práctica que permite calcular el espesor que ocupará un bobinado de N espiras, si se lo hace con alambre de un diámetro d (mm), y es:

$$\text{espesor} = 0{,}1\ d\ \sqrt{N}$$

Resultando el espesor de cada bobinado, directamente en cm. Sumando los espesores de todos los bobinados obtenemos la medida total c, si se han agregado los espesores de aislación entre capas y contra el núcleo.

Lógicamente, puede tabularse el cálculo precedente, para simplificar la tarea del proyectista, o, mejor aún, podemos ofrecer una tabla que nos da la cantidad de espiras por cm² transversal de bobinado, según los espesores de aislación de cada tipo de alambre. Si conocemos las cantidades totales de espiras de cada bobinado y la sección o el diámetro del alambre, la tabla nos da la superficie transversal de ventana que necesita cada bobinado. Sumando la correspondiente a todos ellos, tenemos el producto bc en la figura 99. Como ellos están relacionados por el factor 1,5 es fácil dimensionar la ventana.

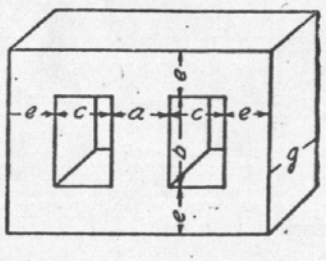

FIG. 99. — Indicación de las dimensiones del núcleo del transformador.

Resumiendo, la tabla adjunta por doble entrada nos da la superficie de ventana para el bobinado, en cm². Sumaremos todos los bobinados y agregaremos el espacio que ocupan las aislaciones entre bobinados y contra el núcleo. Luego, si llamamos *s* a la superficie total necesaria para la ventana, tendremos las dos condiciones mencionadas:

$$s = bc$$
$$b = 1{,}5\ c$$

de donde es fácil. por simple reemplazo algebraico llegar a:

$$c = \sqrt{\frac{s}{1{,}5}}$$

con lo que calculamos b y nos queda la ventana dimensionada, y con ello todo el núcleo.

Número de espiras por cm² transversal

Diámetro (mm) alambre desnudo	Esmaltado			Forrado			
	Simple	Esmalte y forro		Rec. seda		Rec. algodón	
	Esmalte solo	Esmalte y seda	Esmalte y algodón	1 capa	2 capas	1 capa	2 capas
0,05	27556	12321		15625	10000		
0,06	20500	10000		12300	8270		
0,07	15600	8270		8270	5050		
0,08	12300	6900		6900	4350		
0,09	10000	5920		5920	3850		
0.10	7569	4096	3025	5041	3481	2500	1089
0,11	6400	3600	2700	4480	3020	2210	1020
0.12	5476	3481	2500	3844	2704	2025	961
0,15	3480	2500	1849	2704	2025	1600	784
0,18	2500	1850	1440	2030	1600	1290	675
0,20	2025	1600	1225	1681	1369	1024	625
0.22	1720	1370	1090	1440	1160	960	575
0,25	1600	1090	900	1160	960	780	483
0,28	1140	900	728	960	780	675	440
0,30	961	784	625	841	675	530	400
0,32	840	675	530	730	625	483	360
0.35	710	575	483	625	530	400	325
0.38	610	183	435	530	440	380	300
0,40	529	475	380	492	433	330	279
0,45	440	380	330	400	350	279	235
0,50	361	320	279	331	296	237	204
0,55	303	268	237	275	252	204	176
0.60	253	216	204	237	204	177	156
0,65	215	187	176	204	176	156	139
0,70	188	163	156	177	156	137	123
0,75	164	144	137	156	137	119	110
0,80	144	128	123	137	123	106	92
0,85	128	114	110	123	110	96	83
0,90	114	104	100	110	100	86	75
0,95	106	94	90	100	90	79	70
1,0	92	82	79	90	82	54	64
1,2	65	59	56	64	59	42	47
1.4	47	44	39	47	43	36	37
1.5	41	39	32	41	38	26	31
1,8	29,2	28	27	29,2	27	21.4	23,5
2 00	23.8	22.8	22,3	23,8	22.8	14.1	19.8

EJEMPLO DE CÁLCULO GRÁFICO DE UN TRANSFORMADOR

Sea un transformador pequeño, que tenga tres secundarios, uno para 700 V a 100 mA; otro para 5 V a 3 A, y un tercero para 6,3 V a 4 A. El primario es para 220 V. Se trata de un modelo común en receptores radioeléctricos. Calcularemos sus dimensiones.

Primero, determinamos la potencia total secundaria:

$$\begin{aligned} 700 \times 0{,}1 &= 70 \text{ W} \\ 5 \times 3 &= 15 \text{ W} \\ 6{,}3 \times 4 &= 25 \text{ W} \\ \text{total} \quad & \overline{110 \text{ W}} \end{aligned}$$

cifra, que, para tener en cuenta el rendimiento, debe incrementarse aproximadamente en un 20 %. Nos resulta una potencia total de 130 W. Con esta cifra vamos a la curva de la figura 95, obteniendo una sección del núcleo de:

$$S = 16 \text{ cm}^2 = 3 \text{ cm} \times 5{,}3 \text{ cm}\,.$$

Con cuyo dato pasamos de inmediato a la figura 97 que nos da el número de espiras del bobinado primario:

$$N_1 = 750 \text{ espiras}$$

Ahora calculamos los números de espiras de los tres secundarios:

$$N_2 = \frac{750 \times 700}{200} = 2400 \text{ espiras}$$

$$N'_2 = \frac{750 \times 5}{220} = 17 \text{ espiras}$$

$$N''_2 = \frac{750 \times 6{,}3}{220} = 22 \text{ espiras}$$

Y ahora determinamos los diámetros de los alambres con ayuda de la tabla de página 140.

para N_2 ; 0,1 A necesita 0,25 mm

N'_2 ; 3 A necesita 1,5 mm

N'''_2 ; 4 A necesita 1,8 mm

Y el bobinado primario, cuya corriente se calcula dividiendo la potencia total corregida por la tensión aplicada a ese bobinado:

para N_1 ; $I_1 = \dfrac{130}{220} = 0{,}6$ A necesita 0,6 mm

Con cuyos datos pasamos a determinar la superficie de ventana, con ayuda de la tabla de página 142:

para N_1 :	253 esp/cm² ;	750/253	= 3 cm²
para N_2 :	1600 esp/cm² ;	2400/1600	= 1,5 cm²
para N'_2 :	41 esp/cm² ;	17/41	= 0,5 cm²
para N''_2 :	29,2 esp/cm² ;	22/29,2	= 0,8 cm²
		Total...	5,8 cm²

Que debe ser aumentado para contemplar el cartón de aislación, hasta

$$8\ \text{cm}^2 = 2\ \text{cm} \times 4\ \text{cm}$$

Y queda dimensionada la ventana, y con ello todo el transformador.

TRANSFORMADORES PARA VIBRADORES

Uno de los casos particulares de aplicación de transformadores pequeños es el de los convertidores de tensión continua en alternada mediante vibradores. En principio, el esquema está representado en la figura 100, y consiste en un interruptor vibrante que abre y cierra el circuito por el cual una batería alimenta al primario de un transformador. El régimen de funcionamiento es constantemente transitorio, pues los fenómenos de autoinducción ocurren cada vez que se abre y se cierra el circuito, pudiendo decirse que no llega a producirse el régimen permanente, en el cual la corriente en el primario alcanzaría un valor:

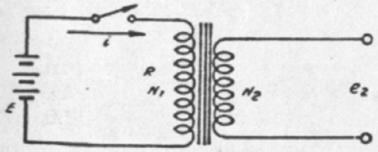

FIG. 100. — Principio de aplicación de un transformador para vibrador.

$$I = \frac{E}{R}$$

Siendo E la tensión de la batería y R la resistencia total del circuito primario. Puede determinarse el valor de la f.e.m. de autoinducción tanto para el primario como para el secundario, si se conoce la ley de variación del flujo magnético que abraza a ambos bobinados y los respectivos números de espiras. Esas ff.ee.mm. valen:

$$e_1 = -\frac{N_1\,\Delta\,\Phi}{\Delta\,t}$$

$$e_2 = -\frac{N_2\,\Delta\,\Phi}{\Delta\,t}$$

Y relacionando estas dos expresiones entre sí se llega a la condición funda-

mental de los transformadores, ya conocida, puesto que las variaciones del flujo magnético son comunes a ambos bobinados:

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{N_1}{N_2} = k$$

La corriente en el primario no se establece en forma instantánea al cerrar el interruptor, ni se extingue de golpe al abrirlo, sino que sigue en ambos casos una ley exponencial que está representada en la figura 101. El valor máximo de esa corriente, que hemos llamado I, se alcanza si el interruptor permanece cerrado un tiempo suficiente. En la práctica, no se alcanza tal valor, pero puede diseñarse el interruptor vibrante de modo que la intensidad llegue a una cifra cercana a I.

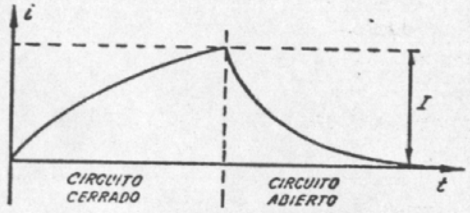

FIG. 101. — Régimen transitorio de la intensidad de la corriente en el bobinado primario.

Para diseñar el transformador debemos conocer la relación que hay entre la tensión E de la batería y la f.e.m. primaria e_1. Para ello estudiemos la ecuación del estado instantáneo referida a las tensiones en juego en el circuito primario:

$$E = R\,i + e_1$$

De donde se deduce de inmediato que la f.e.m. primaria vale:

$$e_1 = E - R\,i$$

Y deducimos en seguida que el valor máximo de la f.e.m. se produce para el instante en que la corriente primaria vale cero, lo que se deduce también intuitivamente. Ese valor máximo es:

$$E_1 = E$$

Y si no entramos en consideraciones de orden teórico, podemos establecer que el transformador puede ser diseñado partiendo de los datos conocidos, es decir, suponiendo que la tensión primaria es la de la batería E, y la secundaria es la que necesitamos en los bornes del bobinado secundario para el circuito de utilización. Resulta así que la relación k entre los números de espiras es la misma que la que hay entre esas dos tensiones.

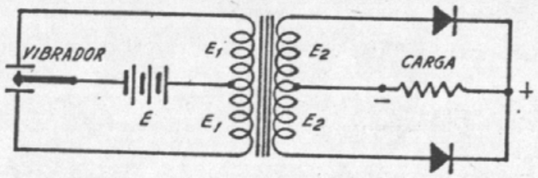

FIG. 102. — Circuito completo del transformador para vibrador, que tiene dos ramas iguales en cada bobinado.

En la práctica, los transformadores para vibradores se construyen con dos ramas iguales en cada bobinado, según lo ilustra el esquema de la figura 102, y se colocan en el secundario dos rectificadores de media onda, sean de óxido metálico, de válvulas termoiónicas, o del tipo mecánico a lengüeta vibrante solidaria con la lengüeta que interrumpe el circuito primario. En los cálculos intervendrán las tensiones de la batería, para el primario, y la del circuito de utilización, para el secundario, E_1 y E_2 en la figura, pero los números de espiras serán dobles de los necesarios para cada bobinado, por llevar dos secciones iguales cada uno. Si se aplican los métodos de cálculo de transformadores vistos anteriormente, debe tenerse en cuenta este detalle.

CÁLCULO DE AUTOTRANSFORMADORES ELEVADORES DE TENSIÓN

El problema de las fluctuaciones de la tensión de la línea de canalización en zonas o ciudades donde la distribución eléctrica no puede atender el servicio en forma normal, presenta inconvenientes para cierto tipo de artefactos de consumo que no admiten la tensión baja. La solución más generalizada es el empleo de autotransformadores elevadores de tensión, por resultar más económicos que los transformadores, según ya se ha demostrado. Se coloca entonces un autotransformador entre la línea y el artefacto, y hay una serie de derivaciones que van a los topes de una llave selectora, según se ve en la figura 103. El artefacto de consumo se conecta directamente entre topes finales del bobinado y la selectora se va girando según las lecturas en el voltímetro, tratando de que la tensión aplicada al artefacto sea siempre la normal.

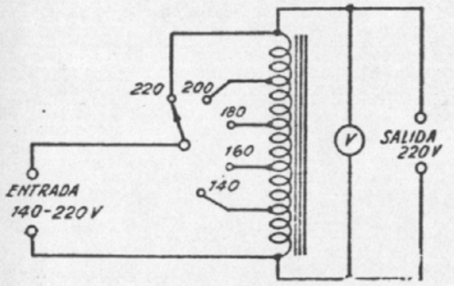

FIG. 103. — Disposición de un autotransformador con topes en el bobinado para suministrar una tensión constante.

Para calcular el autotransformador, lo primero que debe conocerse es la potencia que tiene el artefacto o circuito de consumo W_a. Como es sabido, la potencia con que se calcula el núcleo es menor que la cifra señalada, y está vinculada a ella por la relación de tensiones. Si llamamos E_M a la tensión máxima de línea (generalmente 220 V) y E_m al valor más bajo de la tensión en el lugar en que se ha de usar el autotransformador, la potencia con que se calcula éste vale:

$$W_n = \frac{E_M - E_m}{E_M} W_a$$

Cuya deducción puede verse en el capítulo IV. Para el cálculo se toman las potencias en Watt como el producto de las tensiones en V por las corrientes en A, sin tener en cuenta el factor de potencia.

Una vez obtenida la potencia real del autotransformador, podemos obtener

la tensión específica, o sea la cantidad de Volt por espira, mediante la expresión simplificada:

$$V_e = 0{,}03 \sqrt{W_n}$$

y esa cifra nos da en seguida la cantidad de espiras del bobinado:

$$N = \frac{E_1}{V_e}$$

en cuya expresión E_1 es la tensión máxima teórica, que en la mayoría de los casos vale 220 V. Para calcular las derivaciones, se pone en lugar de 220 para E_1, los sucesivos valores que corresponden a los distintos puntos de la llave selectora, y que pueden estar previstos de 5 en 5 Volt, o de 10 en 10, etcétera.

Con lo hecho, podemos calcular la sección transversal del núcleo, que vale, simplificando las expresiones conocidas:

$$S = 40\, V_e$$

resultando directamente en cm^2. En la figura 104 se dan las dimensiones proporcionadas del núcleo, para cuya determinación se reparte la superficie S en dos cantidades que multiplicadas entre sí dan S y que guarden entre sí la proporción 1,5, como se ha visto en ejemplos anteriores. La tabla de cantidad de espiras por cm^2 de ventana nos permitirá dimensionar la ventana, para lo cual necesitamos el diámetro del alambre, pero éste se determina conociendo la intensidad de corriente en el bobinado. Aquí hay que tener en cuenta un detalle interesante, y es que el aparato de consumo estará conectado a una tensión máxima, y la intensidad vale:

$$I = \frac{W_a}{E_1}$$

con cuya cifra, y adoptando 2 A/mm^2, se determina directamente la sección del alambre, o, en la tabla dada anteriormente, sacamos directamente el diámetro del mismo, y luego, en la otra tabla que le sigue, las dimensiones de la ventana.

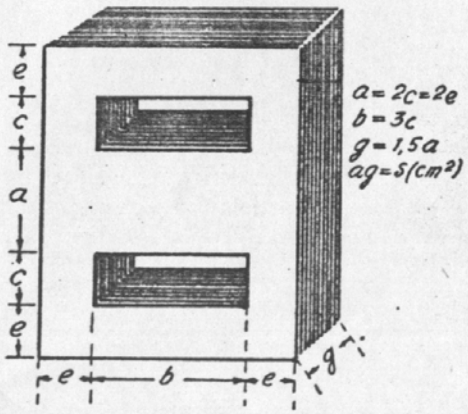

FIG. 104. — Dimensiones relativas del núcleo del autotransformador.

EJEMPLO DE CÁLCULO DE UN AUTOTRANSFORMADOR

Sea un autotransformador elevador de tensión, a topes, para el siguiente caso: Tensión de línea, mínima 160 V; tensión en la carga 220 V. Potencia a conectar 1.000 W. Se desean topes cada cada 10 V.

Lo primero que hacemos es calcular la potencia que estará en juego en el autotransformador, que vale:

$$W_a = \frac{220 - 160}{220} \, 1000 = 275 \text{ W}$$

y de inmediato podemos obtener la tensión específica:

$$V_e = 0{,}03 \sqrt{275} = 0{,}5 \text{ V/esp.}$$

Esta cifra nos permite calcular el número total de espiras del bobinado:

$$N = \frac{220}{0{,}5} = 440 \text{ espiras}$$

Que como lleva derivaciones desde 160 hasta 220 V, y corresponden dos espiras por Volt, haremos derivaciónes cada 20 espiras a partir de la de orden 320.

La sección del núcleo vale:

$$S = 40 \times 0{,}5 = 20 \text{ cm}^2$$
$$S = 4 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$$

El alambre a emplear tendrá un diámetro adecuado a la intensidad de corriente, que es igual a la potencia dividida por la tensión del consumo, es decir:

$$I = \frac{1000}{220} = 4{,}5 \text{ A}$$

a la cual corresponde un diámetro de 1,8 mm. Para este diámetro, en la tabla de la página 142, con alambre forrado de algodón, tenemos 21,4 espiras por cm². Luego, necesitamos en total unos 21,5 cm², que elevamos a 24 cm² para tener en cuenta los cartones. Luego la ventana tendrá:

ventana: 3 cm $\times$ 8 cm

CAPÍTULO IX

ESTUDIO TÉRMICO DEL TRANSFORMADOR

GENERALIDADES

En todo lo que hemos visto sobre diseño de transformadores, sólo nos hemos ocupado de calcular las dimensiones, en lo que al núcleo se refiere, y la cantidad de espiras y sección de los conductores, respecto de los bobinados. Pero es lógico que se debe tener en cuenta un detalle de mucha importancia, como es el de la cantidad de calor que debe disiparse al ambiente. Y tenemos dos fuentes de calor de importancia: el cobre y el hierro.

Las pérdidas en el cobre son producidas por la circulación de las corrientes en los bobinados que tienen cierta resistencia óhmica, y la ley de Joule especifica bajo qué condiciones se realiza la transformación de esa energía eléctrica en calor. Resulta muy cómodo referirse a la potencia eléctrica que se desarrolla en tal transformación, y que es conocida, sea por cálculo o por medición. La potencia que se medía en el ensayo en cortocircuito no era otra que las pérdidas en el cobre del transformador, de manera que esa potencia será la que debemos transmitir al ambiente, desde los bobinados.

Las pérdidas en el hierro se deben a los fenómenos de histéresis y a las corrientes que se inducen en el núcleo, por efecto de estar sometido a un campo magnético alternado. Estas pérdidas también están evaluadas como una potencia, que sabemos cómo determinarla. El ensayo en vacío suministra el valor de las pérdidas en el hierro, por ambos conceptos, histéresis y corrientes parásitas, y esta potencia debemos transmitirla desde el núcleo hacia el ambiente.

Si bien es cierto que las dos potencias mencionadas son de valor pequeño comparadas con las potencias transferidas desde la red al circuito secundario de carga, no debe dejarse de lado que esa cantidad de calor debe disiparse en el ambiente, y representa unos cuantos Watt. Ambas potencias son del mismo orden, y según hemos visto, pueden ser iguales, si se trata de transformadores de servicio permanente; para servicio intermitente son mayores las pérdidas en el cobre.

Otro detalle que conspira contra la disipación de calor en los transformadores, es que no hay piezas en movimiento que producen una ventilación forzada. En las máquinas eléctricas rotativas, se dispone de una excelente ventilación en las partes móviles, lo que permite dejar de lado el problema de la disipación. No sucede lo mismo en las partes fijas, pero como están muy próximas a las móviles, éstas sirven de ventiladores a aquéllas, con lo que siempre se tienen condiciones ventajosas si se compara el caso con el de los transformadores.

Resulta así que el problema de la refrigeración adquiere una gran importancia en los transformadores, y muchas veces obliga a modificar los cálculos de las dimensiones, por haber resultado un tamaño muy pequeño como para disipar la cantidad de calor producido. Obsérvese que mencionamos el tamaño relacionándolo con la disipación de calor; eso es evidente, pues si se debe transmitir al ambiente una cantidad de calor determinada, esa transmisión se hará a razón de una fracción por unidad de superficie disipante. Y aparece ya como cantidad de singular importancia, la superficie que servirá para disipar el calor.

Esto quiere decir que tanto en el bobinado como en el núcleo, no interesará más que la parte exterior, la superficie envolvente, para considerar la aptitud de esas dos partes para disipar la cantidad de calor que expresan sus pérdidas. Dicho en otras palabras, en la verificación de las condiciones térmicas de trabajo, lo primero que se debe conocer son las superficies exteriores del núcleo y del bobinado, para determinar con ellas la cantidades de calor por unidad de superficie que debemos disipar al ambiente.

Y con ello aparece ya la unidad de referencia, es decir, potencia a disipar por cada centímetro cuadrado de superficie disipante, o sea W/cm^2. Esta cifra se calcula dividiendo la potencia total a disipar por la superficie capaz de transmitir ese calor al exterior. Para el cobre, se calculará dividiendo las pérdidas en los bobinados por la superficie externa de todo el devanado terminado, descontando las partes que, por estar apoyadas en el núcleo, no sirvieran para disipar calor. Para el núcleo, se dividirán las pérdidas en el hierro por la superficie útil disipante que presente contacto con el ambiente, descontando las partes que estuvieran en contacto con el bobinado, por ejemplo.

De lo que antecede, se deduce que lo primero que debemos hacer es calcular las superficies de disipación del cobre y del hierro, pues las pédidas en ambos elementos se conocen o se miden por ensayos en cortocircuito y en vacío, respectivamente. Es lógico que, si se está calculando un transformador, no podemos aún hacer ensayos con él, de modo que casi siempre estos cálculos serán verificaciones a hacer con las dimensiones que resultan de la teoría. Y entonces hay que conocer las pérdidas en el cobre y en el hierro por cálculo.

El cálculo de las pérdidas en el cobre se hace cuando se conoce la densidad de corriente, pues hemos visto que la pérdida por Kg de cobre estaba dada por:

$$p_c = 2{,}25\,\delta^2$$

Y como el peso total de cobre lo sabemos calcular, por lo que se vió en el capítulo VII, podemos conocer la cifra total de pérdidas en el cobre,

en Watt. Luego se calculará la superficie de disipación en la forma que veremos en seguida, y se llega a la cifra de disipación unitaria.

Pasemos entonces a ver cómo se calculan las superficies de disipación del bobinado y del núcleo, en función de las dimensiones que resultaron del cálculo del transformador. Desde luego que se trata de un problema de Geometría, pero es conveniente disponer de fórmulas simples, para evitar los cálculos laboriosos que podrían conducir a resultados erróneos. Una simple expresión bastará en cada caso para determinar la superficie emisora del bobinado, y otra para la del núcleo.

SUPERFICIE DE ENFRIAMIENTO DEL BOBINADO

En un transformador, el bobinado terminado forma un cilindro que envuelve a cada rama del núcleo, y se evita el contacto directo en la parte interior usando separadores entre la bobina y el hierro. En el núcleo en anillo, lo común es colocar dos cilindros, uno en cada rama, a fin de aumentar la superficie de disipación, pero, como a veces se tiene un solo cilindro, determinaremos el valor de la superficie en los dos casos. En el núcleo acorazado, siempre se superponen los dos bobinados, de manera que puede compararse este caso con el de anillo de un solo cilindro y usar así la misma expresión.

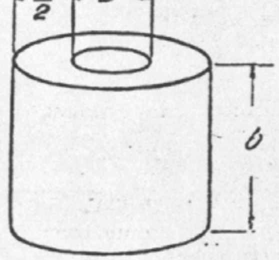

FIG. 105. — Vista esquemática del bobinado del transformador.

En los transformadores trifásicos siempre se tienen tres cilindros iguales, mientras que en los monofásicos, puede haber uno o dos, de acuerdo con lo que hemos dicho más arriba. Por tal motivo, habrá que utilizar dos expresiones distintas para los monofásicos y una más, distinta también, para los trifásicos.

El bobinado forma un cilindro como el que ilustra la figura 105. El diámetro interno D, es el del círculo en el cual queda inscripta la sección del núcleo, y es un dato obtenido en el cálculo del transformador, o se determina multiplicando por 1,4 al ancho a del núcleo, si tiene forma cuadrada. La altura del bobinado es b, que coincide aproximadamente con el alto de la ventana. El espesor del cilindro hueco puede variar, y hay dos casos:

Vale $\frac{c}{2}$ para transformadores trifásicos o para monofásicos con núcleo en anillo, y bobinado repartido en dos secciones.

Vale c para transformadores trifásicos o para monofásicos con núcleo encimados.

Este ancho interviene en las fórmulas, de modo que debemos contemplar su valor en el desarrollo que sigue. Observando la figura 105, calcularemos la superficie de disipación, que es la suma de cuatro partes: un cilindro interno, uno externo, y dos coronas circulares, que son las bases de la figura. Calculemos esas cuatro superficies separadamente, y después las sumamos. Primero tomaremos un solo bobinado, y luego consideraremos los restantes.

La superficie del cilindro interno es:

$$\pi D b$$

La superficie del cilindro externo es:

$$\pi b (D + c)$$

La superficie de las dos bases o coronas circulares vale:

$$\frac{2\pi}{4} [(D + c)^2 - D^2]$$

Y ahora debemos sumar esas tres expresiones, con lo que obtenemos, después de simplificar:

$$\pi [2 D b + c b + D c + 0{,}5 D^2]$$

Donde todas las medidas se toman en cm. Hay que aclarar que la superficie obtenida corresponde a un cilindro solo, y cuando el espesor del mismo es el indicado en la figura 105. Veamos ahora cómo se contemplan los distintos casos que hemos mencionado anteriormente.

Si se trata de transformadores monofásicos a núcleo acorazado, o núcleo anillo pero bobinados superpuestos, la superficie emisora tiene un valor:

$$S_e = 2\pi (D b + c b + D c + c^2) \qquad [1]$$

Dada en cm^2, y como es fácil deducir por el mismo camino anterior, pero tomando como diámetro del círculo mayor $(D + 2 c)$ en lugar de tomar $(D + c)$.

Si se trata de transformadores monofásicos con núcleo anillo, pero bobinados en las dos ramas del núcleo, la superficie emisora es el doble de la que tenemos más arriba, pues hay dos cilindros como el de figura 105:

$$S_e = 2\pi (2 D b + c b + D c + 0{,}5 c^2) \qquad [2]$$

Y si se trata de transformadores trifásicos, habrá tres bobinas como la ilustrada, en lugar de dos, de modo que la fórmula es la misma, pero con factor 3:

$$S_e = 3\pi (2 D b + c b + D c + 0{,}5 c^2) \qquad [3]$$

Y en todas las fórmulas se toman las dimensiones en cm, para obtener el área S_e, llamada superficie emisora del cobre, en cm^2. Hay un caso más a tener en cuenta, y es el de los bobinados pegados al núcleo, sin espacio de ventilación entre ellos y el hierro, pues la aislación interpuesta es maciza. En tales casos, la superficie de disipación se reduce, pues hay que eliminar el cilindro interno como sumando en las expresiones anteriores. Las tres fórmulas que dan S_e sufren una ligera modificación. La primera de ellas

se cambia así: el primer factor del paréntesis debe ser dividido por 2, es decir que, en lugar del término D b, se tendrá la mitad de ese producto. En otras dos expresiones basta eliminar el 2 que multiplica al término: D b, para que ya quede modificada la fórmula. No vale la pena hacer los desarrollos que corresponden, pues se trata de un simple problema geométrico.

En resumen, con la fórmula que corresponda al transformador que se está calculando, se podrá calcular la superficie total disipante que tienen sus bobinados. Y se debe calcular la total, porque las pérdidas en el cobre se dan para todo el bobinado, tanto primario como secundario, y tanto de una fase como de todas. El cociente entre la potencia perdida en el cobre y la superficie emisora suministra la potencia unitaria a disipar.

SUPERFICIE DE ENFRIAMIENTO DEL NÚCLEO

Para el hierro debemos hacer análogas consideraciones, y calcular la superficie exterior capaz de transmitir calor al ambiente. Tomemos primeramente un núcleo en anillo, monofásico, con sección neta en cruz, y luego generalizaremos las expresiones que resulten. La figura 106 da el croquis de un núcleo como el propuesto, con las principales dimensiones indicadas.

La distancia *c'* no es la *c* ya conocida como ancho de ventana, por lo que hemos visto anteriormente, en la figura 91, sino que es algo mayor. La altura de ventana la llamamos *b* como de costumbre, y D será el diámetro del círculo en el que está inscripta la cruz que forma la sección del núcleo. La altura *g* la hemos calculado antes, y tenía un valor tal, que la sección de esa parte del núcleo sea igual a la de la cruz, pero el ancho debía mantenerse con valor *a*. Resultó que:

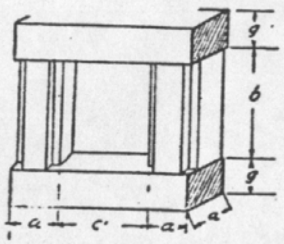

FIG. 106. — Vista esquemática del núcleo de un transformador monofásico.

$$g = 0{,}925\, D\, k_f = 0{,}925 \times D \times 0{,}7 = 0{,}65\, D$$

Que es el valor que tomaremos en los cálculos subsiguientes.

Luego, tenemos dos prismas de área lateral aproximada *4 a b*. que hacen un total:

$$8 a b$$

Y otros dos prismas de área lateral que se calcula con los siguientes datos la base es un rectángulo de lados *a* y *g*, o lo que es lo mismo, 0,85 D y 0,65 D pues esas son las equivalencias respectivas. La altura de esos prismas vale

$$c' + 2 a = c + (D - a) + 2 a = c + D + a$$

Y a esos prismas hay que restarle las cuatro caras de contacto con los núcleos verticales, y sumarle las cuatro bases. Luego, el área lateral de cada prisma vale:

$$2 (0{,}85 D + 0{,}65 D) (c + D + a)$$

Donde se puede reemplazar *a* por su valor 0,85 D. Las bases tienen una superficie, cada una, de:

$$a\,g = 0{,}85 \times 0{,}65\ D^2$$

Y las partes en contacto a descontar, tienen, cada una, un área: a^2, aproximadamente. Y si hacemos operaciones, sumando las áreas de todos los prismas, y descontando lo que corresponde, se llega, después de varios pasos sucesivos, a:

$$S_h = D\,(6{,}8\,b + 6{,}1\,c + 10{,}4\,D) \qquad [4]$$

Donde S_h es la superficie emisora del hierro, y las dimensiones aparecen en la figura 106, debiendo tomarse en cm. El ancho de la ventana, c, no está indicado en la figura, pero es conocido (no confundirlo con c').

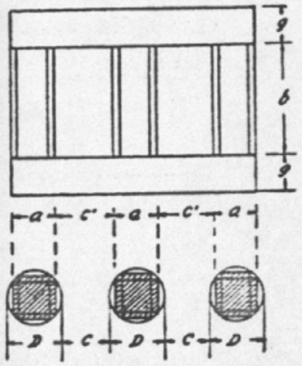

Fig. 107. — Vista esquemática del núcleo de un transformador trifásico.

Esta última fórmula dijimos que era deducida para transformadores monofásicos, con núcleo en anillo, según ilustración de la figura 106. Veamos la superficie emisora para un transformador trifásico, cuyo croquis aparece en la figura 107. Por de pronto, tendremos tres prismas centrales, en lugar de dos, como antes. Y además, los dos prismas horizontales tienen mayor longitud, aunque iguales bases. La longitud de estos prismas es:

$$2\,c + 2{,}85\ D$$

Como es fácil deducir de la figura y de la relación etnre *a* y D. Si calculamos minuciosamente el área lateral de esos prismas, le descontamos seis caras de contacto con las partes verticales, y le sumamos las cuatro bases de ellos, se llega a la expresión final del área total de emisión:

$$S_h = D\,(10\,b + 12\,c + 15\,D) \qquad [5]$$

Donde las tres letras están aclaradas en la figura 107, se toman en cm, y el área en cm^2.

Para los casos en que la parte interna del bobinado está en contacto íntimo con el núcleo, la superficie de disipación es menor, pues deben eliminarse las dos o las tres ramas verticales, según se trate de monofásicos o trifásicos, respectivamente. Para tener en cuenta este detalle, basta eliminar el sumando 6,8 b en la fórmula de transformadores monofásicos, y el sumando 10 b en la de trifásicos. Pero hay que hacer notar que sólo en las unidades de pequeña potencia se encuentra que no hay refrigeración de todo el núcleo, pues resultará un mal aprovechamiento del transformador, dado que habrá que aumentar las dimensiones.

Si el núcleo tiene sección cuadrada, en lugar de cruz, pueden usarse las mismas fórmulas vistas, con la única salvedad que, en tal caso, el diámetro D que va a las fórmulas hay que calcularlo mediante el producto:

$$D = 1{,}4\,a$$

Es decir, que se considera que el núcleo tiene la misma superficie de disipación que el de forma de cruz, pues la diferencia se presenta en muy pequeña proporción, ya que las partes de gran superficie son las mismas. De manera que no se requiere deducir expresiones especiales para tales casos.

Pero si se trata de un transformador monofásico acorazado, poco frecuente en los de gran potencia, hay que tener en cuenta ese detalle. Lo más práctico, para simplificar los cálculos, es suponer que es trifásico, pero como sus laterales y sus dos ramas horizontales son de menor ancho, para tener en cuenta tal detalle se puede suponer una magnitud D, ficticia, que tiene un carácter simbólico, pero que sirve para obtener resultados buenos. Tal diámetro ficticio es:

$$D' = 0{,}8\,D$$

Donde D es el diámetro en que se inscribe el cuadrado de la rama central del núcleo. Las demás medidas son las del croquis.

De lo que se ha expresado, puede entenderse que el valor de la superficie del núcleo puede ser calculada con suficiente precisión en todos los casos. Y como las pérdidas en el hierro del transformador están dadas en curvas, según se ha visto, es fácil determinar la disipación por unidad de superficie, es decir, la cifra de Watt/cm^2. Llegamos así a dos cifras de disipación unitaria, una del bobinado y otra del núcleo.

TRANSMISIÓN DEL CALOR PRODUCIDO

Las pérdidas en el cobre y en el hierro se transforman en calor, el cual debe ser transmitido al ambiente o al elemento refrigerante. Cuando recién se conecta el transformador, está a la temperatura ambiente, y durante un período más o menos largo, sufre una elevación gradual de la temperatura, hasta que se llega a un equilibrio entre la cantidad de calor producido y la cantidad que se transmite. Ese estado de equilibrio se produce a un nivel térmico determinado, cuya temperatura debe estar dentdo de límites que fijan las normas, y que han sido citados en el capítulo segundo, en ensayo de transformadores.

Si la superficie a través de la cual se realiza la transmisión es insuficiente, la cantidad de calor producido será mayor que la que absorbe el aire o el flúido refrigerante, con lo que se producirá una elevación inadmisible de la temperatura. Si esa superficie es demasiado grande, la transmisión se realiza en condiciones ventajosas, y la temperatura del transformador es menor que la especificada, pero este detalle debe interpretarse como que los dimensiones son mayores que las normales, pues en la práctica de construcción resultan siempre cifras de una gran similitud entre todos los transformadores. Cualquier diferencia notable en la temperatura de trabajo, ya sea en exceso o en defecto, es índice de que las dimensiones no se hallan dentro de lo normal.

Resulta así que es muy conveniente estudiar detalladamente la forma como se transmite el calor hacia el ambiente, a fin de determinar las proporciones que guardan entre sí las diferentes porciones que corresponden a las distintas clases de transmisión.

Distinguimos tres formas distintas de transmisión del calor: por conducción, por convección y por radiación. La transmisión por conducción es la que se realiza dentro de la masa sólida o líquida, o entre dos substancias de la misma naturaleza; en el transformador se cumple entre las partes internas del núcleo y las externas, por ejemplo, o entre las diversas espiras del bobinado. También encontramos conducción del calor a través de la masa líquida del refrigerante, sea agua o aceite.

La transmisión por convección se cumple entre un sólido y un flúido en movimiento, y es el caso del núcleo o el bobinado, en contacto con el aire, o con el aceite de enfriamiento. Asimismo, la caja que contiene al transformador está en contacto con el ambiente, de modo que se realiza una transmisión por convección.

La radiación de calor se cumple siempre que un cuerto está a una temperatura mayor que el ambiente. Todo el transformador irradia calor. Es el tipo de transmisión que se cumple entre el sol y la tierra, por ejemplo, y que explica por qué hay más calor bajo los rayos solares que a la sombra, pese a que ambos lugares pueden estar muy cerca uno de otro, tanto como para que entre ellos se transmita calor por conducción directa.

Estudiaremos separadamente las cantidades de calor que se pueden transmitir en las tres formas distintas, ya sea desde el punto de vista de la temperatura que adquiere el transformador o la parte afectada cuando hay que transmitir una cantidad dada de calor, o simplemente, calculando la cantidad que se puede emitir con una superficie dada. Y es lógico que se parta de dos cantidades fijas, como lo son la cantidad de calor o la potencia eléctrica de pérdidas, y la superficie de transmisión, porque esas dos cantidades ya están fijadas al haber calculado el transformador. Todo lo que estamos haciendo es verificar si las dimensiones resultantes son suficientes, para aumentarlas en caso de no serlo, o por lo menos, tratar de mejorar el sistema refrigerante, en caso de no poder alterar las medidas. Se trata de un problema de tanteos, que muchas veces se resuelve aplicando un empirismo puro, basado en estadísticas de fabricación.

TRASMISIÓN POR CONDUCCIÓN

En el interior del núcleo se produce calor, por efecto de la histéresis y de las corrientes parásitas. Ese calor debe ser conducido a la zona externa, para que sea absorbido por el aire o por el aceite. Si la sección de pasaje

no es suficiente, sucederá que habrá una diferencia de temperatura entre la parte interior del núcleo y su contorno. Puede calcularse la cantidad de calor que se transmite por conducción a través de cualquier masa, sea líquida, sólida o gaseosa, aunque esta última no se comporta siempre como conductora del calor, pues la transmisión se hace casi totalmente por convección. Esa cantidad de calor es proporcional a la superficie de pasaje normal a la dirección de la conducción, y a la diferencia de temperatura entre la parte caliente y la parte fría; además, será inversamente proporcional a la distancia que debe recorrer el calor, y a la resistividad térmica del material, o dificultad que oponga a la transmisión del calor.

Todo ello puede ser expresado mediante una relación, pero conviene más referirse a la diferencia de temperatura que habrá entre la parte caliente y la parte fría cuando se debe transmitir una cantidad de calor dada. Tenemos así que la diferencia de temperatura entre la parte más caliente y la fría será:

$$\theta = \frac{W\,L\,\beta}{S}$$

Donde W es la potencia a transmitir en Watt; L es la longitud que debe recorrer el calor, en cm; β es la resistividad térmica del material que conduce el calor, dado en las tablas; S es la superficie a través de la cual se transmite el calor, medida perpendicularmente a la dirección en que se realiza la transmisión, y tomada en cm^2.

Resistividad térmica de materiales

Material	β	Material	β
Aceite de transformadores	620	Hierro laminado	1,3
Agua	180	Laminación de acero en el sentido de las chapas	6
Aire	4400	Laminación de acero a través de las chapas	65
Aluminio	0,75	Mica	280
Cartón prensado	1100	Porcelana y cemento	100
Cartón prensado aceitado	700	Tela barnizada	600
Cobre	0,28		
Hierro fundido	2,5		

Por ejemplo, si la parte más interna del núcleo de un transformador dista 5 cm del contorno exterior, la potencia de pérdidas es de 500 W, la superficie qué atraviesa la transmisión es la que se calculó con la fórmula que vimos al principio de este capítulo, en el tema: superficie de enfriamiento del núcleo, y mide 6500 cm^2, debemos considerar lo siguiente: si el núcleo es de laminación, vemos en la tabla que el coeficiente de resistividad es muy distinto según se tome en el sentido de esa laminación, o perpendicular a la misma. Para ponernos en las peores condiciones, calcularemos con el valor 65,0. Lo mismo, al suponer que la longitud a recorrer por todo el calor es de 5 cm, estamos en un terreno hipotético, pues el calor se produce en toda la masa, y no solamente en la parte más interna; de toda la masa del núcleo se transmite calor al exterior, y si se toma para los cálculos la mitad del espesor del núcleo, en su sección más gruesa, esa es la distancia máxima a recorrer, con lo que estamos en las peores condiciones. Haciendo operaciones, se tiene, de acuerdo con la fórmula anterior:

$$\theta = \frac{500 \times 5 \times 65}{6500} = 25^{\circ}\,C.$$

Es decir, que el exceso de temperatura de la parte más interna del núcleo y su contorno será siempre menor de 25° C., lo que es aceptable. Esta cifra será difícilmente alcanzada, dado que la mitad de la transmisión se cumple con resistividad diez veces menor, según vemos en la tabla, pues más o menos la mitad de la masa del núcleo puede considerarse en sentido de la laminación.

TRASMISIÓN POR CONVECCIÓN

Todas las partes metálicas del transformador, como el núcleo, el bobinado, la caja metálica, etc., están en contacto con el aire o con el aceite de refrigeración, y como cualquiera de los dos flúidos toma calor al paso, se produce la convección de que hemos hablado. Para que tenga lugar la transmisión en el sentido del sólido al flúido, es menester que el primero esté a mayor temperatura, lo que se cumple siempre en transformadores.

Debido a la dirección del movimiento de los flúidos, cuando ellos reciben un incremento de temperatura, la transmisión es de distinto monto en planos horizontales que en verticales. En efecto, un flúido al calentarse pierde densidad, y sube, de modo que la aptitud para tomar calor al paso será mayor si el plano que se lo entrega está en posición horizontal. Haremos dos distingos, entonces, según la posición del plano que está en contacto con el flúido. Para planos verticales, la potencia que se puede disipar, dada por la cantidad de Watt por cm² está dada por:

$$W = 2{,}2 \times 10^{-4}\,\theta^{k}$$

En cuya expresión el exponente k del exceso de temperatura sobre el ambiente θ tiene valores comprendidos entre 1,0 para bobinados en contacto con el aire, hasta 1,5 para inmersión en aceite. En valores medios, puede tomarse para k el valor 1,25. Si las superficies no son planas, hay que afectar a la expresión anterior de un coeficiente correctivo. El exceso de temperatura sobre el ambiente θ, se toma en °C.

La expresión anterior vale para cierta presión atmosférica, pues es lógico que la altitud del lugar en que se halla el transformador tiene influencia en la transmisión. A fin de generalizar la fórmula, se la afecta de un coeficiente δ, que se da en función de la altura sobre el nivel del mar a que se halla el transformador. La tabla adjunta da los valores de ese coeficiente, y la fórmula queda así:

$$W = 2{,}2 \times 10^{-4}\,\delta\,\theta^{k}$$

Coeficiente correctivo por efecto de la altitud

Altura sobre el mar (m)	δ	Altura sobre el mar (m)	δ
0	1,000	2500	0,87
500	0,975	3000	0,84
1000	0,950	3500	0,81
1500	0,922	4000	0,78
2000	0,895	5000	0,72

La fórmula que da la potencia a transmitir por cm² de superficie de contacto con el flúido, puede ser invertida, a fin de calcular el exceso de temperatura sobre el ambiente, cuando se tiene la cifra de W/cm². Para ello no hay más que tomar logaritmos de la expresión anterior. Pero resulta más cómodo hacer una curva, como la que se ve en la figura 108, que da en abscisas la potencia de pérdidas a transmitir por cm², y en ordenadas el exceso

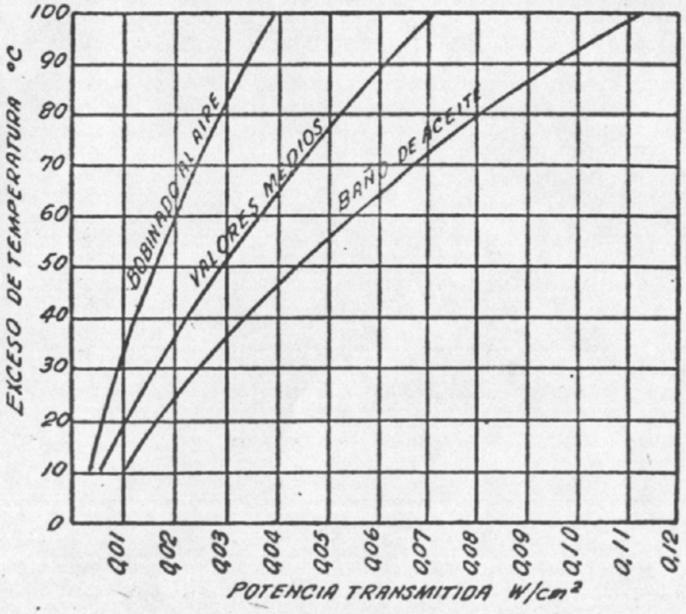

FIG. 108. — Transmisión del calor por convección en superficies verticales al nivel del mar. La curva da el exceso de temperatura sobre el ambiente.

de temperatura sobre el ambiente, en °C. Esa curva, lo mismo que la fórmula dada antes, valen para superficies verticales, que son las que dan las peores condiciones térmicas. Para superficies horizontales la potencia puede aumentarse en un 15 % a 20 %, en cifras medias.

La figura 108 da los valores de la potencia para el nivel del mar. Sabemos que si hay una altura importante, debe aplicarse un factor correctivo que es menor que la unidad. Si lo que se está buscando es la temperatura, se la divide por ese factor. Así, por ejemplo, para el caso que se deban transmitir 0,043W/cm², por convección, el exceso de temperatura, si se trata de un transformador en aceite, al nivel del mar, y de superficies verticales, será de 50° C. Si se trata de considerar las superficies horizontales, la potencia puede ser un 20 % mayor, o, lo que es lo mismo, la temperatura resultará un 20 % menor, es decir, 40° C, de exceso sobre el ambiente. Si ese transformador está a 3500 m sobre el nivel del mar, se aplica un coeficiente que vale, en la tabla, 0,81. Se debe multiplicar la potencia por él, o dividir la temperatura. Como queremos obtener el exceso de temperatura, lo dividimos por el coeficiente: 50/0,81 = 62° C. En las tablas de página 166 se dan los excesos admisibles de temperatura para distintas condiciones de trabajo.

TRASMISIÓN POR RADIACIÓN

Un cuerpo caliente irradia calor, en cantidad que depende de una serie de factores. La ley de transmisión de calor por radiación fué establecida por Stefan-Boltzmann, y establece que la cantidad de calor radiada es proporcional a la cuarta potencia de la temperatura absoluta del cuerpo, y a un coeficiente que depende del estado, color y naturaleza de la superficie del cuerpo emisor.

En el caso de los transformadores, hay que considerar todos esos factores, pues se tienen diversos materiales calientes, y cada uno de ellos tiene sus superficies exteriores de distinto aspecto, tanto en el estado como en el color, todo lo cual influye en la cantidad de calor radiada.

Si el flúido que rodea al cuerpo emisor tiene una temperatura dada, que es lo común, ya que no es posible suponer que estará a 0° K, es decir, a —273°C, hay que hacer la diferencia entre las cuartas potencias de las temperaturas absolutas del cuerpo radiante y del flúido. Las temperaturas absolutas, con relación a las temperaturas comunes, dadas en ° C., se calculan así:

$$T = t + 273$$

Es decir, sumando 273° C. a la temperatura expresada en° C., resultando la cantidad de ° K (grados Kelvin).

La expresión que permite calcular la potencia que se puede radiar desde un cuerpo que está a una temperatura absoluta T_a, hacia un flúido que está a una temperatura absoluta T_b, está dada por la expresión:

$$W = 5{,}8 \times 10^{-12}\, e\, (T_a^4 - T_b^4)$$

Donde la potencia W se da en Watt/cm² de superficie emisora, y el factor *e* es el *coeficiente de emisión del calor*, y su valor se da en la tabla adjunta, en función del tipo de material o de la capa que lo cubre. Si el material está pintado debe tomarse el valor que corresponda a la pintura y no al mismo material. Nótese la gran diferencia que resulta en el aluminio, por ejemplo, al pintarlo de color gris. Ésta es la razón por la que siempre se pinta de ese color la caja de los transformadores. También puede ser verde o negra.

Coeficiente de emisión de calor

Material emisor	e	Material emisor	e
Acero oxidado	0,70	*Pinturas:*	
Aluminio pulido	0,08	De aluminio	0,55
Amianto	0,95	De bronce	0,80
Bronce pulido	0,60	Esmalte blanco	0,95
Cobre	0,15	Laqué blanco	0,95
Cobre oxidado	0,60	Color gris	0,95
Hierro moldeado	0,18	Color verde	0,95
Níquel	0,12	Negro brillante	0,90
Zinc pulido	0,05	Negro de humo	0,95

La aplicación de la fórmula resulta un poco molesta, debido a las operaciones con las potencias de la temperatura absoluta. Por tal motivo se han trazado las curvas de la figura 109, que dan en abscisas las potencias de radia-

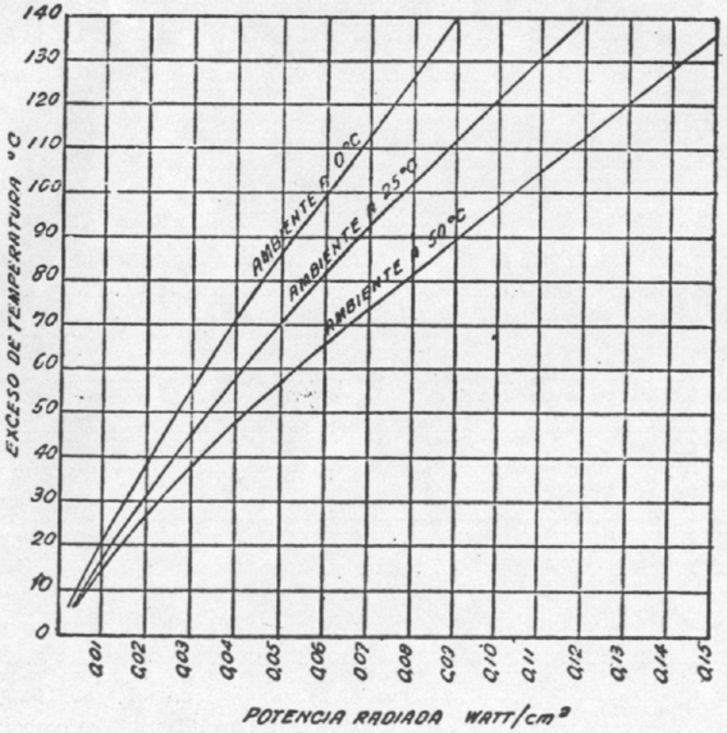

FIG. 109. — Transmisión del calor por radiación. La curva da el exceso de temperatura sobre el ambiente según la potencia radiada por el transformador.

ción, en Watt/cm² para tres temperaturas distintas del ambiente. En ordenadas se leen los excesos de temperatura sobre el ambiente, en ° C., directamente. Si la temperatura del ambiente no coincide con ninguna de las tres curvas, es sencillo hacer una interpolación gráfica, pues las curvas están bastante próximas. Todas las curvas de la figura 109 han sido trazadas tomando como base un coeficiente de emisión de valor 0,95, que es el común, pues las cajas de los transformadores están pintadas, y con colores verde, gris o negro. En caso de desear calcular la potencia a transmitir por radiación con distinto coeficiente de emisión, la corrección es simple, pues dicho coeficiente aparece en la fórmula como factor directo. Luego, no habrá más que establecer una proporción entre los dos coeficientes, el real y 0,95, que es el que vale en las curvas, y multiplicar a la potencia que se lea en las abscisas por ese resultado, que será siempre menor que la unidad, con lo que tendremos una potencia menor para irradiar, lo que es evidente. No debe aplicarse ese factor de corrección al eje de ordenadas, porque la ley de las curvas sigue una cuarta potencia.

TRANSMISIÓN POR CONVECCIÓN Y RADIACIÓN SIMULTÁNEAS

En los transformadores, no se puede hablar de una transmisión neta por una de las dos formas tratadas últimamente. El bobinado o el núcleo, ya estén en contacto con el aire, o sumergidos en aceite, comunican a cualquiera de los dos flúidos el calor que contienen, y lo hacen simultáneamente por convección y por radiación. Puede estimarse el porcentaje o fracción que corresponde a cada tipo de transmisión, pero el proceso analítico resulta largo y poco exacto, pues hay que adoptar una serie de coeficientes numéricos que intervienen en las expresiones correspondientes.

Así, por ejemplo, se ha visto que la transmisión por convección depende de la altitud sobre el nivel del mar, de la posición de las superficies, y del tipo de flúido que rodea a la superficie caliente (aire o aceite). En cambio, la transmisión por radiación depende solamente de la temperatura del cuerpo calinte y del estado y color de la misma.

Si se calcula separadamente la potencia a disipar por unidad de superficie en función de un exceso dado de temperatura sobre el ambiente, que casi siempre está fijado por las normas, se podrá apreciar cual fracción sobre el total, que será la suma de las dos cifras obtenidas, corresponde a una forma o a la otra de la transmisión.

Así, por ejemplo, si se fija un exceso de temperatura sobre el ambiente de 50° C. y el ambiente está a 25° C., se tiene, para superficies verticales sumergidas en aceite:

Potencia a disipar por convección	(fig. 108)	0,043 W/cm²
Potencia a disipar por radiación	(fig. 109)	0,034 W/cm²
Total		0,077 W/cm²

Y se ve en seguida que del total transmitido, corresponde un 56 % a la convección y un 44 % a la radiación. Se hace notar que se ha supuesto un coeficiente de emisión de 0,95, pues las curvas de la figura 109 lo toman como base. En la práctica, ello no es desacertado, pues el tanque está pintado de color gris, verde o negro.

EJEMPLO NÚMERICO

Veamos cómo se aplican las fórmulas y curvas que hemos tratado últimamente. Para ello, tomemos un transformador cuyos datos sean conocidos, por ejemplo el que se calculó en el capítulo 7, cuyas dimensiones y pérdidas eran:

$$D = 13{,}5 \text{ cm}$$
$$b = 29 \text{ cm}$$
$$c = 7{,}3 \text{ cm}$$

$$\text{pérdidas en el cobre} = 350 \text{ W} = \text{pérdidas en el hierro}$$

Y con estos datos calcularemos las potencias a disipar por unidad de superficie. La superficie de disipación del bobinado, para transformadores monofásicos, era, (fórmula 2):

$$S_c = 2\pi\,(2\,D\,b + c\,b + D\,c + 0{,}5\,c^2)$$
$$S_c = 6{,}28\,(2 \times 13{,}5 \times 29 + 7{,}3 \times 29 + 13{,}5 \times 7{,}3 + 0{,}5 \times 7{,}3^2)$$
$$S_c = 7000 \text{ cm}^2$$

Con lo que la cifra de disipación por unidad de superficie, si la potencia a disipar por el cobre es 350 Watt, será:

$$\frac{350}{7000} = 0{,}05 \text{ W/cm}^2$$

La superficie del núcleo de hierro, para transformadores monofásicos, valía, (fórmula 4):

$$S_h = D(6{,}8\,b + 6{,}1\,c + 10{,}4\,D)$$
$$S_h = 13{,}5(6{,}8 \times 29 + 6{,}1 \times 7{,}3 + 10{,}4 \times 13{,}5)$$
$$S_h = 5200 \text{ cm}^2$$

Y con esto, la cifra de disipación por unidad de superficie, para el hierro, si tenemos 350 Watt de pérdidas, será:

$$\frac{350}{5200} = 0{,}07 \text{ W/cm}^2$$

Ahora utilizaremos las curvas que dan la potencia a disipar en función del exceso de temperatura. Supongamos primero que se trata de un transformador con núcleo y bobinados al aire, y en la figura 108 se obtienen los datos para convección y en la 109 para radiación. Pero se debe adoptar un exceso de temperatura sobre el ambiente. Las normas fijan un máximo de 55° C. para ese caso, de acuerdo con la temperatura del ambiente. Tomaremos un exceso:

$$\theta = 50° \text{ C.}$$

Y con esa cifra vamos a la figura 108, donde obtenemos, para el nivel del mar y superficies verticales, que es nuestro caso:

$$\text{para bobinados al aire: } 0{,}016 \text{ W/cm}^2$$

Y en la figura 109 obtenemos los valores correspondientes a la radiación, para lo cual suponemos que nuestro transformador trabajará en un ambiente a 25° C. de exceso de temperatura; se tiene:

$$\text{para ambiente a } 25^\circ \text{ C: } 0{,}034 \text{ W/cm}^2$$

Luego, en total se puede transmitir la suma de ambas cifras, por convección y por radiación:

$$0{,}016 + 0{,}034 = 0{,}05 \text{ W/cm}^2$$

Y volviendo a nuestros datos, vemos que tenemos cifras mayores para transmitir, lo que exige buscar de aumentar la superficie disipante, o mejorar las condiciones de la transmisión.

Para aumentar la superficie disipante se puede abrir el núcleo en secciones, separando sus partes con trozos de madera, de modo que al aire tenga acceso a sus partes más internas. Para el bobinado, se puede separar en secciones, con el mismo objeto. Se consigue así aumentar la superficie de contacto con el aire. Pero veamos si la solución de sumergir el transformador en aceite no es más acertada. Tomemos en la figura 108 las cifras máximas, válidas para bobinados o núcleos en baño de aceite, y tenemos:

$$\text{para baño de aceite: } 0{,}044 \text{ W/cm}^2$$

Cifra que sumada a la transmisión por radiación, da un total bastante mayor que el anterior:

$$0{,}044 + 0{,}034 = 0{,}078 \text{ W/cm}^2$$

Y se ve en seguida que esta cifra no es superada por la transmisión real, ni por el bobinado ni por el núcleo, que disiparán 0,05 y 0,07 W/cm² respectivamente. Luego, se construirá el transformador sumergido en baño de aceite.

En la realidad puede ser necesario abrir el núcleo con separadores, y no el bobinado, o viceversa, por haberse sobrepasado la cifra de disipación por unidad de superficie en uno o en el otro caso. La solución correcta está dictada, en toda circunstancia, por el factor técnico-económico.

REFRIGERACIÓN FORZADA EN TRANSFORMADORES

Los transformadores de gran potencia requieren generalmente refrigeración adicional, porque la natural es insuficiente. En efecto, el volumen del transformador no aumenta linealmente con la potencia, sino que lo hace en menor grado. Con ello, la superficie exterior de núcleos y bobinados aumenta menos aún, por razones geométricas. Luego, como la cifra de pérdidas totales se mantiene aproximadamente proporcional a la potencia, resultará que para

potencias grandes siempre se tendrá una superficie insuficiente de enfriamiento.

Para aumentar la superficie en contacto con el aire, en transformadores sumergidos en aceite, se recurre a alabear las paredes del tanque, que en lugar de tener forma cilíndrica o prismática regular, adquieren así un aspecto aleteado. Se consigue de esta manera aumentar mucho la superficie de contacto con el aire exterior, con lo que se mejora la transmisión por convección y por radiación, especialmente si esas aletas se pintan de color gris o negro, por su efecto sobre la radiación.

Pero todas estas soluciones llegan a su límite, y sucede que todavía resulta insuficiente la superficie exterior, o la de contacto entre el aceite y el núcleo o los bobinados. Para que el aceite pueda tomar más calor por contacto con éstos, se lo hace circular mediante bombas, enfriándoselo en un circuito externo por medio de ventiladores o serpentinas sumergidas en agua fría. Para que el tanque sea enfriado más eficazmente, se recurre al agua circulante.

Hemos visto que dentro de la masa del bobinado y del núcleo, el calor se transmite por conducción, y se puede calcular la cantidad transmitida.

En el bobinado se limita la máxima diferencia entre sus partes más calientes y más frías en 10° C., aproximadamente, de modo que se debe verificar si se cumple tal condición. Dentro del núcleo la tolerancia es mayor.

Además, considerando ya la transmisión por convección, tenemos dos saltos de temperatura: el exceso del núcleo o del bobinado sobre el aceite, y el exceso del aceite sobre el ambiente. La temperatura límite para las diversas partes del transformador, a que se hizo referencia en el capítulo 2º, vale para la cantidad total, es decir, fija la temperatura del bobinado o del núcleo, y restando a esa cifra la temperatura del ambiente, se obtiene el exceso total permitido.

En todos los casos que se obtenga una temperatura mayor que la máxima fijada, se emplea refrigeración forzada. La cantidad de agua necesaria se puede calcular con una fórmula empírica, que la da en función de la potencia de pérdidas y del exceso de temperatura que se desea tener sobre el agua refrigerante. Si llamamos P a la potencia de pérdidas totales del transformador, en KW y t_e tal exceso de temperatura del transformador sobre el agua, que se quiere obtener, la cantidad de agua necesaria, en litros/min. vale:

$$A = \frac{14{,}4\,P}{t_e}$$

Con la temperatura dada en °C. Esta cifra permite diseñar el circuito de circulación del agua.

Es interesante notar que variando la cantidad de agua de refrigeración, se varía también el exceso de temperatura del aceite sobre el ambiente, en forma inversamente proporcional, según se desprende de la última fórmula. Por ejemplo, si se tiene un exceso de temperatura del aceite sobre el agua dado, y se produce un aumento de 10° C. en ese exceso por sobrecargas u otros motivos, se duplica la cantidad de agua y ese aumento se reducirá a la mitad, bajará a 5° C. Como se aprecia, no resulta económico rebajar la temperatura actuando sobre la cantidad de agua. Y todavía se debe tener en cuenta que el exceso de temperatura del bobinado sobre el aceite no variará en forma sensible.

Se pueden resumir en un cuadro todos los efectos citados anteriormente, tanto para transformadores a refrigeración natural como forzada. Para ello tendremos en cuenta tres cifras características, que son: la relación de pérdidas

Capacidad máxima de carga en % de la normal, para transformadores autorrefrigerados, con bobinados a 85° C máx.

Temperatura ambiente °C	Relación: pérdidas cobre/pérdidas hierro								
	1 : 1			2 : 1			3 : 1		
	t_a = 35	40	45	35	40	45	35	40	45
	t_b = 20	15	10	20	15	10	20	15	10
50	63	58	53	69	67	62	71	70	69
40	83	81	79	86	85	84	88	87	86
30	100	100	100	100	100	100	100	100	100
20	114	116	117	112	113	114	110	111	112
10	128	130	132	125	126	127	123	124	125
0	141	143	147	136	137	140	135	136	138
10	153	156	160	146	149	151	144	146	148

t_a = exceso de temperatura del aceite sobre el ambiente.
t_b = exceso de temperatura del bobinado sobre el aceite.

Capacidad máxima de carga, en % de la normal, para transformadores enfriados por agua, con bobinas a 80° C máx.

Temperatura del agua de entrada °C	Relación: pérdidas cobre pérdidas hierro								
	1 : 1			2 : 1			4 : 1		
	t_a = 30	35	40	30	35	40	30	35	40
	t_b = 25	20	15	25	20	15	25	20	15
35	84	82	80	85	84	83	87	86	85
25	100	100	100	100	100	100	100	100	100
15	114	116	117	113	114	115	112	113	114
0	134	137	140	131	133	135	129	131	133

t_a = exceso de temperatura del aceite sobre el ambiente.
t_b = exceso de temperatura del bobinado sobre el aceite.

en el cobre y en el hierro, que sabemos puede ser la unidad o mayor; el exceso de temperatura del aceite sobre el ambiente, y el del bobinado sobre el aceite. Para estos dos últimos datos tomaremos las cifras permisibles.

En los dos cuadros, uno para refrigeración a aire y otro para refrigeración a agua, se dan las cifras de porcentajes de carga que admite el transformador,

respecto de la normal, para diversas temperaturas del ambiente. Como se notará observando los cuadros, se considera temperatura normal, para la cual la carga puede ser el 100 %, la de 30° C. en transformadores al aire, y la de 25° C, en transformadores enfriados a agua.

CAUSAS QUE AFECTAN AL ENFRIAMIENTO

En primer lugar, ya hemos observado que la altitud del lugar en que se halla el transformador tiene influencia en la transmisión por convección. La radiación, en cambio, no está afectada por este detalle, de manera que se tendrá en cuenta en la proporción que estén las dos formas de transmisión. En realidad, interesa especialmente en los transformadores enfriados a aire, o en aquellos en los cuales el agua refrigerante se enfría en piletas descubiertas, en contacto con el aire.

En la fórmula de transmisión por convección se tuvo en cuenta el efecto de la altitud sobre la transmisión, afectando a la potencia con un coeficiente menor que la unidad, el cual dependía de la altitud sobre el nivel del mar. Para altitudes menores de 1000 metros, no es necesario tener en cuenta esa corrección.

Otra causa importante de influencia sobre el comportamiento térmico del transformador, es el color de su tanque. Sabemos que el color de la superficie exterior afecta a la transmisión por radiación solamente, de manera que el efecto será más notable en tanques lisos que en los alabeados, debido a que en los primeros la mayor cantidad de calor se transmite por radiación y no por convección.

Sin embargo, no hay que dejar de lado un detalle muy importante, y es que en los transformadores expuestos a los rayos solares, el color del tanque influye en la absorción de calor solar. Como los colores que tienen alto coeficiente de emisión, también tienen un elevado coeficiente de absorción, estaríamos en presencia de propiedades divergentes; por un lado, conviene aumentar la radiación, por lo que se pinta el tanque de color conveniente, pero, por el otro lado, ese color produce un aumento de la absorción de calor solar. Y se debe tener en cuenta que el sol actúa sobre una sola parte del transformador, mientras que la radiación es por todas sus partes. También debe considerarse que los rayos solares sólo inciden durante una parte del día, y no todos los días, de manera que se suele dejar de lado su efecto, pues sólo produce un aumento de 5° C. a 10° C. en la temperatura exterior del transformador.

En las consideraciones sobre el tipo de pintura a usar, si se observa la tabla de coeficientes de emisión, se notará que la pintura de aluminio tiene un valor de 0,55, mientras que la negra tiene 0,90. Esto quiere decir que si se pinta de negro el transformador se radiará mayor cantidad de calor; con aluminio sólo se irradia un 61 % de la cifra para pintura negra. Pero no hay que olvidar que no toda la transmisión es por radiación, pues gran parte se cede al ambiente por convección. De modo que la cifra comparativa no será el 61 %, sino que para toda la transmisión completa resulta un 80 %, aproximadamente.

Y esta cifra es variable, pues depende de la proporción de transmisión en una y otra forma. A título informativo, en transformadores pequeños, con pocos radiadores, la pintura de aluminio provoca un 12 % más de temperatura que la negra, pero en transformadores grandes ese exceso es sólo de 6 %.

En resumen, las pinturas metálicas, por su mayor conservación podrían preferirse, pero se tienen en todos los casos ventajas con las de color, dado que tienen mayores coeficientes de emisión; en transformadores con máxima transmisión por convección, esas diferencias son menos notables.

CAPÍTULO X

DETALLES CONSTRUCTIVOS

Hasta aquí se ha considerado los detalles teóricos del funcionamiento de los transformadores, su cálculo, y el análisis térmico en lo que atañe al dimensionado de sus partes. Se ha visto que el diseño de un transformador parte de la cifra de potencia aparente, pues de acuerdo con ella se emplea uno de los procedimientos de cálculo. Para los de mayor tamaño conviene el método general completo, que puede emplearse también para los más pequeños, pero no es indispensable. A medida que se trate de potencias más y más reducidas, hay procedimientos simplificados al extremo de que, para los de menos de 1 Kilovoltamper puede determinarse directamente la sección del núcleo, en primera aproximación.

También se ha visto que en los transformadores muy chicos, casi no había problema térmico, pues las dimensiones no se reducen en forma proporcional a la potencia, sino que siguen una ley aparentemente exponencial. Luego, los transformadores de potencia inferior al Kilovoltamper tendrán casi siempre suficiente superficie de enfriamiento natural. En los grandes, se vió la necesidad de sumergirlos en un baño de aceite para mejorar la transmisión de calor por convección. Hasta apareció la conveniencia de pintar al tanque con determinados colores, a fin de aumentar la radiación del calor.

Y es posible, bajo determinadas condiciones, que la superficie del núcleo o del bobinado, aun cuando estén en baño de aceite, no sea suficiente para disipar el calor producido, y se deberá recurrir a formar conductos dentro de los mismos, para aumentar la superficie de contacto entre ambos y el aceite. Desde luego que tal contingencia se presenta frecuentemente en los transformadores de gran potencia, en los que, además de las condiciones normales de trabajo, hay que prever estados de sobrecarga. Esta última circunstancia no debe alarmar, pues el rendimiento eléctrico se mantiene dentro de sus cifras máximas a plena carga y con sobrecargas que no excedan las condiciones térmicas impuestas por las normas.

Los detalles constructivos que interesan, en el transformador, son los que atañen al núcleo, a sus bobinados, los accesorios de éstos: terminales, aisladores, etcétera, el aceite, el tanque, y, como detalle importante para la instalación, las dimensiones exteriores, peso, etcétera.

Muchos de ellos no pueden separarse netamente, como para hacer una descripción aparte, pues forman un todo compacto. En otros casos desaparece una o varias partes, como es el caso de los transformadores pequeños, para rectificadores, en los que no hay aceite, ni aisladores, ni tanque, pues los terminales se sujetan a una pieza aislante que sirve a la vez para aislar el bobinado del núcleo. En estos tipos, las dimensiones exteriores no pueden tabularse, pues hay mucha disparidad entre diferentes procedencias. En cambio, en transformadores grandes pueden especificarse dimensiones generales, ya que no habrá grandes diferencias entre varias fábricas de origen.

Veremos algunos detalles referentes a cada una de esas partes, a fin de completar el estudio práctico. Muchos de los datos constructivos son simples referencias a normas generalizadas, pues como se deben especificar para determinadas condiciones de trabajo y en cifras comparativas, la única manera de uniformar criterios es mediante la estipulación de normas.

NÚCLEOS

Referente al núcleo de hierro del transformador, poco hay que agregar a lo dicho en los capítulos de diseño y estudio térmico. Las chapas utilizadas

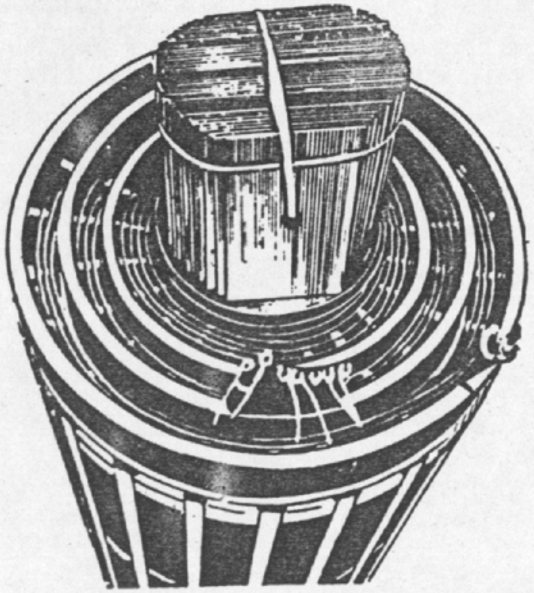

Fig. 110. — Vista de conjunto de la colocación del núcleo dentro del bobinado en un transformador ASEA de gran potencia

son generalmente de acero al silicio, en proporciones de 2 % a 4 % de este último. Primitivamente se usaba el acero Martin-Siemens, pero actualmente se fabrican chapas especiales para núcleos de transformadores, en las que

interviene un laborioso proceso de orientación de los cristales magnéticos. Esto quiere decir que las aristas de los cubos elementales quedan paralelas entre sí y en el sentido del laminado, lo que ha permitido aumentar la densidad magnética. Dicho en otras palabras, se eleva el codo de la curva de magnetización casi un 30 %. Ejemplo típico de ese proceso moderno de elaboración es el material denominado "Hipersil" de la Armco y la Westinghouse. Los espesores varían entre 0,3 y 0,5 mm, para frecuencias de 50 ciclos por segundo. En frecuencias de 25 ciclos que aún se encuentran en servicios especiales puede usarse chapa de 0,8 mm de espesor. Entre chapas debe haber aislación eléctrica, lo que se consigue de diversas maneras: con una capa de barniz aplicado a una sola de sus caras, con una hoja de papel muy delgado encolado sobre una cara de la chapa, o, para material más económico, produciendo una oxidación superficial con vapor de agua.

Según el tipo de aislación se tienen diferentes efectos sobre el costo de la chapa y sobre la reducción de la sección neta de hierro. Para chapas de 0,35 a 0,50 mm de espesor, puede estimarse que la reducción de sección neta con aislación de barniz o papel, es de un 10 por ciento.

La forma del núcleo es variable según el uso y potencia, pues sabemos que entre los monofásicos se encuentran los de forma anillo, o los acorazados, según se ha visto anteriormente. Entre los trifásicos, hay el modelo simétrico o el anillo. En transformadores pequeños se colocan las chapas una a una, alternando las juntas, para dar más solidez al conjunto, y evitar piezas de unión entre partes del núcleo. En los grandes, las dos cabezas quedan separadas, y deben sujetarse con pernos roscados.

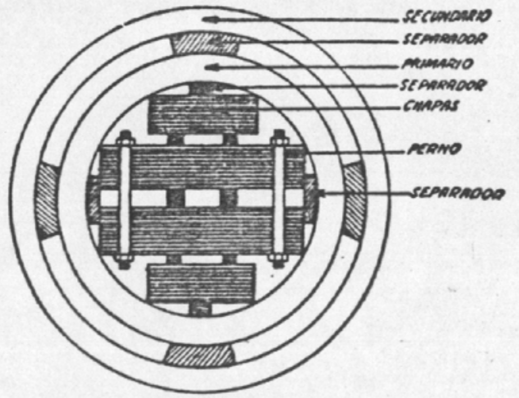

Fig. 111. — Disposición de los separadores en el núcleo y en el bobinado del transformador.

En los transformadores de gran potencia suele ser necesario formar conductos de refrigeración en la masa del núcleo, para aumentar la superficie de disipación del calor. Se colocan entonces separadores aislantes, de espesor conveniente para circulación del aceite. La figura 110 muestra una vista de un transformador en el que puede verse el núcleo con sus separadores. Además, se observará que las chapas tienen diversas formas, para llenar lo más posible una sección transversal de forma circular. Esto quedó justificado en el capítulo 7. En la misma figura se pueden observar los separadores para el bobinado, que tienen el mismo objeto que los del núcleo. Otro detalle de interés, es que la primera y última chapa de cada paquete es más gruesa, para sujetar a las centrales.

La figura 111 aclara la colocación de los paquetes de chapas de un núcleo a sección en cruz, con los pernos sujetadores, los separadores de núcleo y bobinado, de acuerdo con las normas constructivas en uso. El conjunto debe formar un block rígido, con conductos longitudinales sin obstrucción para la circulación del aceite de enfriamiento. La forma circular de la sección transversal presenta ventajas en ese sentido, pues con menor tamaño da mayor uniformidad en la disipación, ya que carece de aristas que concentrarían la irradiación en zonas determinadas.

BOBINADOS

Hay dos formas típicas de bobinados para transformadores: cilíndricos y planos. Los núcleos, con su forma, son los que determinan la elección de uno u otro tipo, salvo que se requieran propiedades especiales, como ser baja capacidad distribuída, para usos en telecomunicaciones u otros. Los

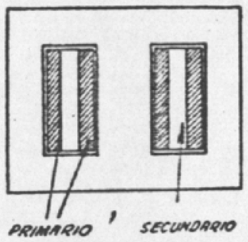

Fig. 112. — Separación del bobinado primario para colocar el secundario en el medio, en los tipos cilíndricos.

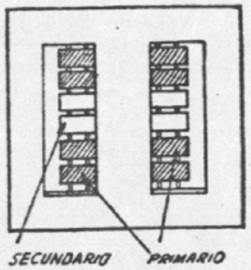

Fig. 113. — Separación del primario en capas, para la colocación del secundario en el centro, en los tipos planos.

núcleos en anillo llevan generalmente devanados planos, y los otros cilíndricos.

Los dos bobinados, primario y secundario, rara vez se apartan en dos simples grupos de espiras, encimándolos; generalmente se separan en dos partes o más, sea para mejorar la refrigeración o para evitar el número de lugares con buena aislación. Así, en la figura 112 se ve que el primario se ha dividido en dos mitades que envuelven al secundario. Tal disposición se emplea cuando el secundario es para alta tensión, porque así sólo hay que aislar bien la separación entre ambos bobinados, despreocupándose de la separación entre el bobinado y el núcleo, ya que el primario es de baja tensión. En el caso de la figura 112 no se ha indicado la separación del bobinado en capas, con separadores para circulación de aceite, porque suponemos que ello se hará si fuera necesario, y es asunto que no tiene nada que ver con la aislación entre bobinados.

La figura 113 muestra una distribución en bobinas planas, formando una pila. Nótese que también en este caso, cuando el secundario es para alta tensión, se subdivide al primario en dos partes, colocando el secundario entre ellas, por las mismas razones expuestas anteriormente. En este caso se han

dibujado separadores entre cada parte de los bobinados, y aun entre las dos mitades en que se ha dividido a cada sección. En la práctica, la subdivisión puede ser mayor, disponiéndose varias capas.

Los materiales aislantes para el bobinado, o para colocar entre capas, son: papel barnizado, fibra, micanita, cinta impregnada, algodón impregnado, etcétera, para transformadores con bobinados al aire, y para los sumergidos en baño de aceite, los mismos materiales sin impregnar; debe evitarse el uso de caucho en los transformadores en baño de aceite, pues éste lo ataca, y tiene efectos nocivos también sobre la micanita, y aun sobre los barnices.

Las piezas separadoras entre bobinados, secciones, o entre éstas y el núcleo pueden ser de madera, previamente cocida en aceite, aunque actualmente se prefieren los materiales duros a base de papel o similares (pertinax, etcétera). Si se usa madera, no debe interpretarse como que se dispone de aislación, sino solamente de un separador.

En cuanto a los conductores para hacer las bobinas, su tipo depende de la sección, pues hasta 6 mm² pueden usarse alambres, y más arriba de ese límite se usan cables de muchos hilos, o bien cintas planas, para facilitar el bobinaje. La aislación para los conductores puede ser algodón, que luego se impregnará si no se emplea baño de aceite. Para transformadores de soldadura, que trabajan con tensiones muy bajas y corrientes muy fuertes, se suelen colocar las cintas de cobre sin aislación, pues la resistencia de contacto entre ellas es suficiente para evitar drenajes de corriente. Esa situación mejora aún debido a la oxidación superficial del cobre.

Los bobinados suelen tener derivaciones cerca de uno de sus extremos, a fin de poder variar un poco la relación de transformación, de acuerdo con el estado de carga. Así, en la figura 114, se ve cómo se hacen derivaciones en los tres devanados de un transformador trifásico, y la selección se hace mediante una pieza cilíndrica rotativa. Generalmente estas derivaciones están en el lado de mayor tensión, y debe desconectarse el bobinado para cambiar la posición de la manija selectora. La figura 115 muestra una manija selectora de bobinado, con un panel indicador, y sus piezas de sujeción y aislación colocadas. Si se trata de transformadores trifásicos con conexión en estrella, las derivaciones se hacen en el extremo de cada bobina correspondiente al neutro, para evitar efectos perjudiciales.

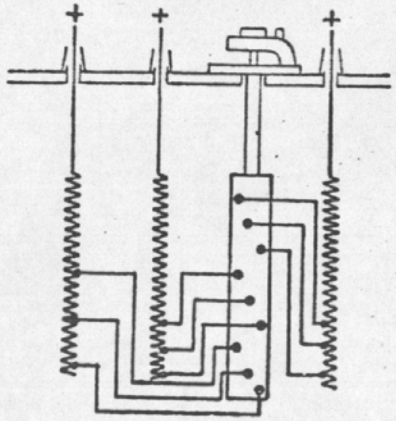

Fig. 114. — Esquema de conexiones del selector de tensiones en un transformador trifásico.

En lo que respecta al potencial instantáneo de trabajo, es fácil comprender que si en el primario de alta tensión, por ejemplo, uno de los extremos presenta una elevada tensión contra tierra, aparecerá otra del mismo orden en el secundario, lo que representa peligro para el operador. También debe contemplarse la posibilidad de un contacto accidental entre el primario y el secundario, lo que presenta el mismo inconveniente señalado. La forma más segura de evitar esos peligros, es conectar a tierra el secundario, sea en uno de sus extremos, o en su punto medio. También el núcleo y la caja metálica deben ser conectados a tierra, para conjurar los posibles peligros mencionados.

Una vez construído un bobinado, debe procederse a secarlo, para eliminar

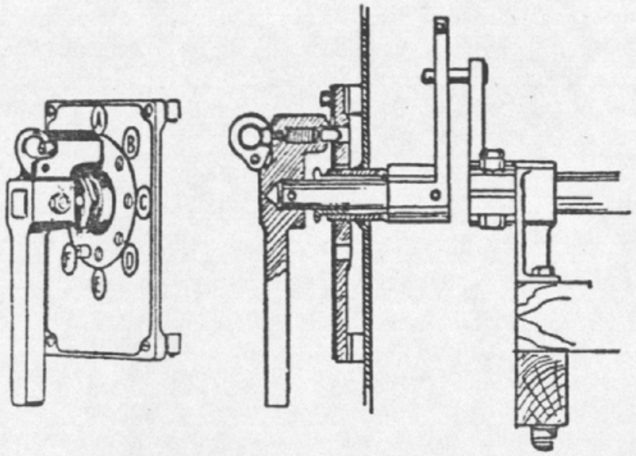

Fig. 115. — Disposición del selector en la parte superior del transformador.

la humedad absorbida por su aislación. Hay dos procedimientos: con aplicación de calor interno, y con calor externo. Para aplicar calor interno, se hace pasar por el bobinado una corriente suficiente para calentarlo, y se le deja al aire, sin el aceite de refrigeración que impediría la evaporación de la humedad. Es usual conectar el secundario en cortocircuito, y aplicar al primario una tensión alternada reducida, que oscila entre la quinta y la décima parte de la normal. Se controla la temperatura para mantenerla dentro de los 70° C. a 80° C. Se cuidará de correr el selector de tensiones al extremo final, para que la corriente circule por el bobinado completo, pues en caso contrario quedarán algunas espiras fuera del circuito.

Para el método por calor externo, se coloca el transformador en un recinto ventilado, en el cual se coloca una fuente productora de calor, sea a resistencias o a lámparas de arco. La ventilación es necesaria para disipar el vapor de agua que se producirá. Hay que hacer que el aire caliente pase por todos los conductos de ventilación que tenga el transformador, de manera que se tratará de dar al recinto las dimensiones mínimas; puede cubrirse todo el conjunto durante un tiempo, para dar lugar a que el aire penetre en los conductos. La forma más rápida de secar transformadores es la de combinar los dos métodos, el interno y el externo, de manera que ese es el procedimiento más conveniente. Se evita el uso de corriente continua, pues la resistencia del bobinado es muy baja, y salvo precauciones especiales

se tendría una intensidad demasiado elevada. El tiempo que dura la operación oscila entre unas 48 horas hasta tres semanas, según el tipo y el estado del transformador, y el clima del lugar. En ambientes saturados se emplea más temperatura y más tiempo.

En todos los casos, se prescriben temperaturas máximas de 85° C., cuando la aislación está formada por materiales fibrosos, que se destruyen a temperatura mayor que ese límite. Para poder verificar el cumplimiento de tal condición, se deben instalar varios termómetros, hasta encontrar el punto de máxima temperatura. Después puede dejarse el que indica la máxima.

BORNES, AISLADORES Y CONEXIONES

Los principios y fines de bobinas, así como las derivaciones para el selector de tensiones, se hacen con trozos de alambre macizo, y sin aislación. No debe en ningún caso colocarse alambre aislado con algodón o materiales fibrosos, pues el aceite se correría por ellos hacia arriba, por capilaridad, saliendo afuera. En caso de querer aislar esos terminales, se usan cuentas de material vítreo o refractario. Si el transformador es con bobinado al aire, no existe el efecto de capilaridad mencionado, de modo que puede usarse cualquier aislación.

Los aisladores a los que se sujetan los terminales de conexión, están sobre la tapa o a un costado. Su tamaño y tipo depende de la tensión de trabajo del bobinado, o, más correctamente, de la tensión entre bornes. Prácticamente pueden emplearse aisladores cuya altura sobre la tapa del transformador está dada por:

$$H = \frac{2\ V}{1000}\ [\mathrm{cm}]$$

Donde V es la tensión entre bornes, en Volt. Así, para 10000 Vot de servicio, se emplearán aisladores de 20 cm de altura, etcétera.

El tipo de aislador difiere mucho en transformadores para uso en interior de locales y para intemperie. En este segundo caso debe contemplarse el efecto de las lluvias, nieve, etcétera. Para esos casos, se especifica la tensión a que se deberán probar, y que se da en función de V, tensión de servicio (Volt):

$4\ V + 1000$ para tensiones menores de 1000 Volt.

$3\ V + 5000$ para tensiones hasta 10000 Volt.

$2\ V + 15000$ para tensiones entre 10000 y 30000 Volt.

$1{,}5\ V + 30000$ para tensiones mayores de 30000 Volt.

ACEITE PARA TRANSFORMADORES

El aceite en que se sumerge el transformador es de origen mineral, con tratamiento especial para mejorar sus condiciones dieléctricas y disminuir su tendencia a producir depósitos fangosos. En ningún caso el aceite debe llenar completamente el tanque, pues hay que dejar una cámara de expansión, en previsión del aumento de volumen por el calentamiento; ese aumento de volumen es fácilmente calculable. En muchos modelos, el depósito de expansión se hace aparte, comunicado con el tanque por un conducto. Se colocará en todos los casos un indicador de nivel para el aceite, sea en el tanque o en el depósito de expansión, según el caso.

Un detalle muy importante, es que el aceite no debe contener agua, por lo cual se debe cuidar el efecto de la condensación. Cuando se lo cambia de envase, se debe cuidar mucho el detalle de la perfecta limpieza de los mismos. Para conocer de inmediato la presencia de agua en suspensión, se prueba la rigidez dieléctrica, pues una disminución en ese valor acusa la presencia de substancias extrañas. Para probar la rigidez dieléctrica del aceite se emplean máquinas electrostáticas a frotamiento, con las que se producen altos potenciales haciendo rozar discos de ebonita o cristal contra cepillos metálicos. Sumergiendo los electrodos de la máquina con el aceite en estudio, se les va acercando hasta que se produce la descarga entre ellos. En curvas suministradas por la fábrica de las máquinas, o determinadas experimentalmente, se encuentra el valor de la diferencia de potencial entre los dos electrodos en el momento de la descarga. Es sabido que la rigidez dieléctrica se mide por la tensión que produce la descarga a un centímetro de distancia, de modo que reduciendo la tensión medida a distancia de un cm, se encuentra la cifra buscada. Hay aparatos de prueba que tienen dos discos a distancia fija, y se va aumentando la tensión hasta obtener la descarga. Un indicador da la cifra del potencial en el momento de la chispa. Normalmente, la rigidez no debe ser menor de 10000 Volt por cm, a temperatura de prueba comprendida entre 20° C. y 30° C., que son las normales en el ambiente.

Para hacer este ensayo se debe cuidar la limpieza del recipiente donde se coloca el aceite, y agitarlo durante un rato para uniformar su viscosidad. Además, se cuidará que el aceite cubra con exceso los dos electrodos, dejar reposar antes de comenzar el trabajo y verificar la no existencia de burbujas de aire en la masa líquida. Cuando se observe la descarga, se agita un poco el aceite, se elimina el aire en forma de burbujas, y el carbón que ha formado el aceite quemado, para poder hacer nuevas lecturas, lo menos cinco, y tomar promedio de los resultados.

Es interesante conocer algunas de las normas empleadas para aceptar aceites para transformadores, como las V.D.E., por ejemplo, que entre otras cosas dicen:

"El peso específico de aceite para transformadores, a 20° C., no debe ser superior a 0,92. En el caso que no haya instalación especial de calefacción, no excederá el valor 0,895.

"La viscosidad con respecto al agua a 20° C. no debe pasar los 8° Engler, cuando el aceite está a esa misma temperatura. El punto de inflamación, a crisol abierto debe ser por lo menos 145° C. y el punto de solidificación no debe ser mayor de — 15°C. Cuando no haya instalación especial de calefacción, este punto debe ser inferior a — 40° C., en cuyo caso el punto de inflamación puede bajar hasta los 120° C.

"El contenido de ácidos orgánicos no debe ser superior a 0,05 con respecto al grado de acidez; la riqueza en ceniza no será superior al 0,01 % y el coeficiente de alquitrán será inferior a 0,1 %.

"Para aceites nuevos, la rigidez dieléctrica debe ser como mínimo 80 KV/cm, y una vez cocido y preparado para introducirlo en el transformador, acusará cifras mínimas de 125 KV/cm.

De lo que antecede se deduce la extrema rigidez de las prescripciones para aceites de transformadores, lo que pone en evidncia la importancia que tiene el cuidado y calidad de este elemento para el funcionamiento y seguridad de todo el transformador. Cualquier impureza, agua en suspensión, etcétera, debe ser eliminada de inmediato. Hay varios procedimientos: los filtros estáticos, los separadores centrífugos, etcétera. Los filtros están hechos de material que absorbe el agua en suspensión, al mismo tiempo que retiene el fango. Cuando hay mucha agua, como ella tiene mayor peso específico que el aceite, quedará en el fondo junto con el fango, de modo que puede ser eliminada por trasvasamiento. Los separadores centrífugos son aptos para eliminar las partículas en suspensión que sean más pesadas que el aceite.

DETALLES PRÁCTICOS

A fin de ilustrar sobre tipos clásicos de transformadores que se fabrican actualmente, daremos algunas referencias en lo que respecta a sus dimensiones, forma de los tanques, cantidad de aceite necesaria, etcétera. Los bobinados tienen un diseño que depende mucho de la tensión de servicio, pues casi nunca se permite que la tensión entre bobinas sobrepase los 5000 Volt. La tensión entre capas del devanado debe mantenerse inferior a los 350 Volt, dentro de lo posible, y entre espiras de una capa no se pasará en ningún caso de 100 Volt. De acuerdo con estas prescripciones, se deberá distribuir el bobinado en forma conveniente.

La figura 116 muestra el aspecto de un transformador terminado, para tensiones de servicio del orden de los 2500 Volt. Nótese la forma del núcleo, los terminales y los puentes entre los mismos. A los costados de los terminales hay dos anillas, para poder elevar el conjunto mediante un aparejo y colocarlo dentro del tanque. Se trata de una unidad monofásica.

La figura 117 muestra un transformador similar al anterior pero para tensión de servicio mayor, unos 7000 Volt. Nótense las bobinas separadas en dos partes en cada rama del núcleo, a fin de mejorar el enfriamiento. En la parte superior se ve el selector de tensiones, con una manija de maniobra. Los terminales de alta tensión salen dentro de tubos de material aislante.

La figura 118 muestra un transformador de construcción bastante distinta a los anteriores. Corresponde a un tipo de 20000 V primario a 70000 V en

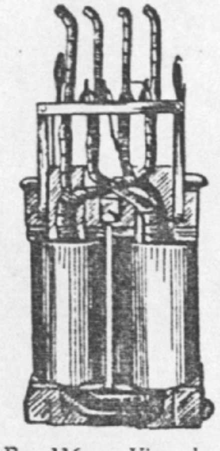

Fig. 116. — Vista de un transformador tipo Allis Chalmers para 2400 V.

Fig. 117. — Vista de un transformador tipo Allis Chalmers para 7200 V.

el secundario, para potencias del orden de los 200 KVA. Los aisladores del lado de alta tensión tienen la altura requerida, y todos los terminales salen dentro de tubos aislantes, en la forma conocida.

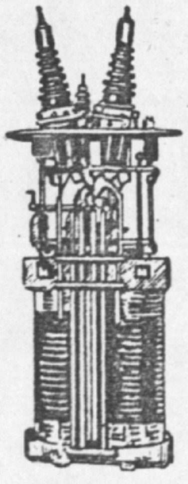

Fig. 118. — Vista de un transformador tipo Allis Chalmers para 70000 V.

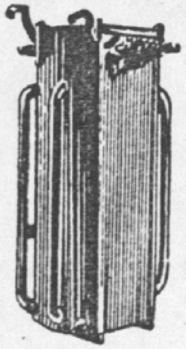

Fig. 119. — Tanque para transformadores del tipo de 2400 V.

Los tanques que contienen a los transformadores ilustrados en las figuras anteriores son de formas adecuadas al fin que se destinan. Así, en la figura 119

se ve el tipo de tanque adecuado para transformadores de tensiones entre 2000 y 5000 Volt. Los terminales salen por el costado del mismo, aunque éste es un detalle que no se ha generalizado. Los conductos para circulación de aceite comunican la parte inferior con la superior del tanque por el exterior. Otros modelos tienen sus tanques con paredes alabeadas o aleteadas, para aumentar la superficie de contacto con el aire.

En la figura 120 se ve un modelo para tensiones entre 7000 y 13000 Volt de servicio en el lado de alta. Los aisladores ya son de forma pilar, de acuerdo con lo visto anteriormente. En los demás detalles no se diferencia substancialmente del modelo anterior, y los hay con conductores externos para el aceite y con tanques aleteados.

El tanque que se ve en la figura 121, pertenece a un transformador de

Fig. 120. — Tanque para transformadores del tipo de 7200 V.

Fig. 121. — Tanque para transformadores del tipo de 70000 V.

alta tensión, comprendida entre 20000 y 70000 Volt. Está provisto de numerosos conductos de circulación para aceite, en el exterior. En todas las figuras anteriores se han omitido los detalles accesorios, como son las conexiones, niveles de aceite, reguladores, etcétera, por ser considerados como partes de la instalación y no del transformador.

Otros tipos de transformadores, de diferente origen de fabricación, tienen depósito de expansión de aceite en la parte superior que se reconoce por afectar la forma de un tanquecito cilíndrico horizontal, conectado al principal mediante un conducto. En equipos para grandes potencias, se suministra también la bomba para el circuito externo de refrigeración, que sabemos se hace forzada, con circulación continua. También se encontrará el aparato indicador de temperatura del agua de enfriamiento, indicadores térmicos del aceite, aparatos protectores contra sobrecargas y elevaciones bruscas de temperatura, etcétera. Todos esos accesorios se consideran formando parte de la instalación.

DIMENSIONES TÍPICAS DE TRANSFORMADORES

Según el tipo y potencia del transformador, se guardan ciertas proporciones que la estadística demuestra que son más o menos las mismas para todas las fábricas de origen. La tabla adjunta da alguno de estos datos, que pueden tomarse como cifras medias:

Tensión kV	Potencia KVA	Aceite (litros)	Dimensiones (mm) A	B	C	D	Figura N.°
2	37 — 50	10	1300	700	600	1300	122
a	75 — 100	20	1500	800	750	1500	122
13	150 — 200	30	1900	900	900	1900	122
20	37 — 50	20	2200	1000	700	1800	123
a	75 — 100	30	2400	1100	800	1900	123
40	150 — 200	30	2500	1200	900	2000	123
40	37 — 100	50	3000	1200	1000	2200	124
a							
70	150 — 200	100	3500	1400	1100	2500	124

En la tabla se consignan las tensiones de trabajo, que son las que determinan el tipo de transformador, según se ha visto. En la última columna está el número de figura, para consultar las dimensiones indicadas. La cantidad de aceite, como se ve, depende de la potencia del transformador.

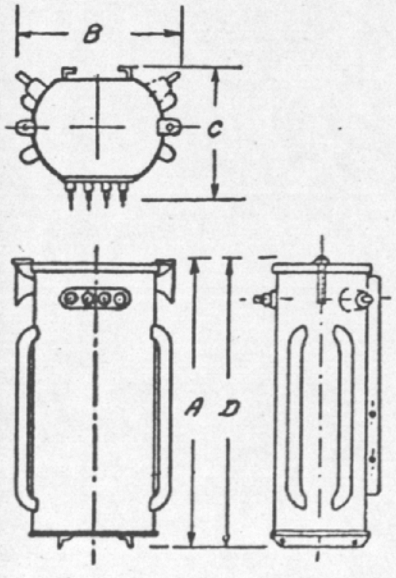

Fig. 122. — Indicación de las dimensiones en transformadores de 2 a 13 kV.

Obsérvese un detalle interesante, y es que las dimensiones, para un tipo determinado, aumentan poco con la potencia, encontrándose en cambio, bastante diferencia cuando la tensión de servicio es distinta. Y ello es debido a que la tensión de servicio determina el tipo de aislación, la separación entre bobinados, piezas para terminales, aisladores, etcétera, mientras que, dentro de un tipo de transformador para una tensión dada, el aumento de potencia sólo requiere un aumento de la sección del núcleo y de la de los bobinados, mientras que los demás detalles quedan en la misma forma.

Las figuras 122, 123 y 124 esquematizan el aspecto del tanque y accesorio

exteriores de los transformadores que se ilustran en figuras anteriores. Es evidente que, en la práctica, no todos tendrán el mismo aspecto, pero en lo que respecta al tamaño y proporción de dimensiones, podemos afirmar otra cosa.

En efecto, hemos visto en el capítulo de cálculo de transformadores, que todas las dimensiones estaban ligadas a la potencia por relaciones matemáticas,

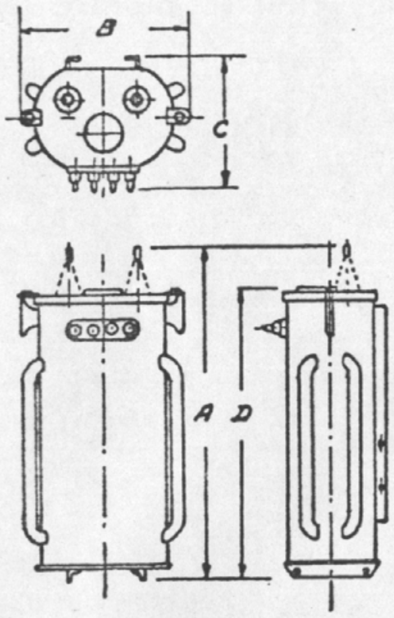

Fig. 123. — Indicación de las dimensiones en transformadores de 20 a 40 kV.

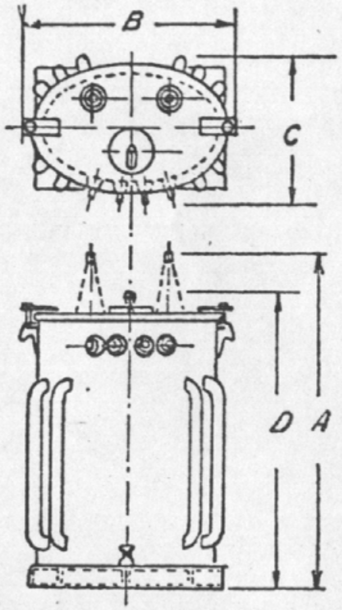

Fig. 124. — Indicación de las dimensiones en transformadores de 40 a 70 kV.

de modo que no hay razón para que se produzcan grandes diferencias al actuar distintos proyectistas.

Claro está que no hay que dejar de lado el detalle de la tensión de servicio, que puede afectar las dimensiones por causa de necesitarse mayores espacios de aislación. Por eso se dan en el cuadro cifras para tres grupos típicos de tensiones de trabajo. Y si bien los números expuestos no son de carácter universal, permiten fijar ideas y proporciones.

ASPECTOS MODERNOS DEL PROBLEMA DE DISEÑO

La técnica actual de la fabricación de transformadores contempla factores que si bien no eran desconocidos, no se les asignó antes la importancia que tienen. A medida que se construyeron transformadores para mayores tensiones de servicio comenzó a preocupar el campo eléctrico, el efecto corona, las sobretensiones y el comportamiento del material aislador, que pasa a comportarse como dieléctrico.

La distribución del potencial está ligada a las características propias del bobinado, resistencia, inductancia y capacitancia. La primera no puede salirse del marco que le imponen los datos de trabajo y resulta dada por la sección de los alambres y longitud de los mismos. Pero la inductancia del bobinado y las capacitancias entre ellos y contra masa puede modificarse mediante un diseño adecuado.

Admitido ya que los bobinados de alta tensión se hacen en galletas, la figura 125 nos muestra la manera cómo se distribuyen éstas para mejorar la distribución del campo eléctrico. En efecto, hay que distinguir dos capacitancias inevitables: una aparece entre secciones de los bobinados, y se denomina: "capacitancia serie" y la otra entre los bobinados y el núcleo, que se llama: "capacitancia a tierra". Para tener en cuenta los problemas de aislación, hay que reducir la tensión entre bobinados, aumentando su capacitancia serie, y admitir una mayor capacitancia a tierra, pues la aislación contra el núcleo no presenta problemas de importancia. En la figura antedicha, todos los pequeños capacitores C_c indicados corresponden a la capacitancia serie, y los C_g a la capacitancia a tierra. Haciendo las galletas con su frente de menor dimensión contra el núcleo se consigue el efecto antedicho.

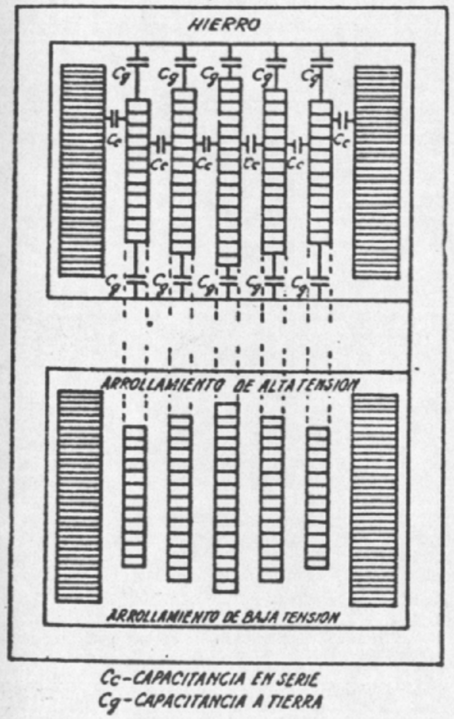

FIG. 125. — Distribución de las capacitancias serie y a tierra en los arrollamientos de un transformador.

Otro detalle a tener en cuenta se plantea en la figura 126, donde puede verse que la distribución del campo eléctrico entre bobinados tiene zonas de concentración hacia los bordes externos de las galletas. Si las últimas galletas de alta tensión, cerca del bobinado de baja tensión son de menor diámetro, cambia la forma del campo eléctrico, como se ve en la segunda parte de la misma figura y se evitan puntos o zonas de elevado gradiénte de potencial en los que la falla de aislación es más probable.

Este problema debe extenderse a todos los puntos que, por presentar aristas, configuran un campo eléctrico con alto gradiente de potencial. Por ese motivo, los terminales, electrodos, contactos de selectores, y demás piezas sometidas a potencial elevado se construyen con sus bordes redondeados, lo que conduce a una configuración del campo eléctrico similar a la de la

segunda parte de la figura 126, en lugar de la correspondiente a la primera parte de esa misma figura.

El estudio de la configuración del campo eléctrico ha llegado más allá, y determina que las capas de aislación entre bobinados y entre ellos y el núcleo deben disponerse de manera que queden paralelas a las líneas de fuerza del campo eléctrico, o, lo que es lo mismo, perpendiculares a las superficies equipotencias de dicho campo. Estas condiciones que nunca habían

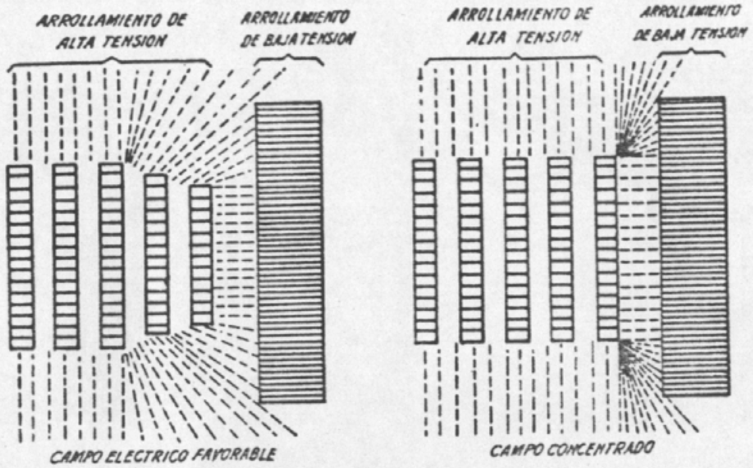

FIG. 126. — Modificación del campo eléctrico entre bobinados al reducir el diámetro de algunas galletas de alta tensión.

preocupado a los fabricantes de transformadores hacen aparecer a los materiales aislantes como envolturas de los bobinados en galleta, lo que puede traer problemas de índole térmica, que se tienen en cuenta previendo la circulación adecuada del aceite por orificios practicados en las láminas aislantes. Como se ve, se están dando grandes pasos en esta materia, y recientemente un fabricante de transformadores anunció un modelo en el cual las galletas no eran planas sino de menor espesor en los bordes que en la parte central, de modo que en las zonas donde el campo eléctrico acusa su mayor gradiente de potencial puede colocarse mayor espesor de aislación. Esto y las galletas cóncavas en lugar de planas, son algunas de las soluciones a los problemas creados por la tensiones cada vez más altas a que se hacen trabajar los transformadores.