

escuela **INTEGRAL** **AUTONOMA** **DE ENSEÑANZA**

“ #” E' ° ~ #

Unidad 6

TRANSFORMADORES

En clases anteriores, hemos dicho que para trans-portal económicamente grandes cantidades de energía eléctrica a distancias considerables, se prefería la corriente alterna.

Podemos anticipar que dicho transporte de energía, se efectúa utilizando voltajes elevados, para ello se utilizan máquinas eléctricas que reciben el nombre de transformadores, pero, ¿qué es un transformador?

Un transformador es una máquina que tiene por objeto modificar los factores de tensión e intensidad de la potencia dada por una fuente alterna sin alterar apreciablemente el valor de dicha potencia. Esta sencilla definición permite deducir que los transformadores no pueden aumentar la potencia eléctrica que reciben, sino que se limitan a modificar la tensión de acuerdo a las necesidades del circuito donde se los ubica. Cuando se aumenta o disminuye el voltaje de un circuito por medio de corriente, tiende a variar en sentido contrario en la misma proporción, de forma tal que la potencia eléctrica se mantiene constante, descontando por supuesto pérdidas inevitables de origen y características que explicaremos más adelante. Concretando: si elevamos el voltaje, se reduce la intensidad de la corriente y si disminuimos el voltaje, se produce un aumento de intensidad.

Por ejemplo: si suponemos un circuito sobre el que se aplica una tensión de 100 Volt y circulan 50 Amperes, entendemos que en el mismo se desarrolla una potencia de 5000 Kw., valor que resulta de multiplicar $E \times I$.

Si por medio de un transformador elevamos el voltaje de este mismo circuito a 1000 Volt, la intensidad de corriente necesaria para desarrollar la misma potencia, es de 5 Amperes.

¿Cómo llegamos a éste resultado? En principio recordemos que en un transformador no puede aumentar la potencia que ese le entrega, por lo tanto si la tensión aumentó diez veces, de 100 a 1000 Volt, la corriente debe reducirse en igual proporción, dado que la potencia debe mantenerse inalterable. Y así ocurre en realidad, ya que la intensidad de corriente bajó de 50 a 5 Amperes.

Es fácil deducir que para las condiciones dadas pueden emplearse conductores de menor sección para transportar 5 Amperes, de los que necesitarían para 50 Amperes, por lo tanto puede transmitirse la misma cantidad de energía por conductores de menor sección cuando se eleva el voltaje.

Este es precisamente el principio utilizado en las modernas líneas de transmisión, lo que permite emplear una cantidad mucho menor de cobre en los conductores agregándose a esto, una menor posibilidad de pérdidas de energía. A título informativo, señalamos un caso real que permite apreciar la ventaja recién mencionada; para transmitir 50000 Kw. con un voltaje de 100000 Volt, puede utilizarse un conductor de cobre de un diámetro aproximado a dos centímetros y medio, pero en caso de transmitir esa misma cantidad de energía con un voltaje de 500 v., sería necesario un conductor de treinta centímetros de diámetro para no superar las pérdidas del caso anterior.

Estos comentarios preliminares hacen evidente la utilidad de los transformadores para transmitir grandes cantidades de energía eléctrica a distancias considerables, elevando el voltaje alterno de la central generadora y disminuyéndolo luego en el punto donde tiene que utilizarse la energía.

Los transformadores son dispositivos eléctricos muy eficientes, ya que poseen un elevado rendimiento. Efectivamente pueden presentar pocas pérdidas por no tener partes móviles sujetas a rozamiento, por esta misma razón necesitan un mantenimiento poco exigente.

Finalizamos estos comentarios, destacando que los transformadores de energía son llamados a menudo, transformadores estáticos, ya que no contienen partes móviles. Hacemos esta simple advertencia ya que con apreciable frecuencia, el lector puede oír llamar en esa forma a un transformador y no saber lo que el término significa.

FUNDAMENTO TEÓRICO DEL TRANSFORMADOR

Los fundamentos de la teoría de los transformadores estáticos de tensión para corriente alterna, no presentan ninguna dificultad para su interpretación,

después de lo mucho que llevamos dicho sobre los fenómenos provocados por la inducción electromagnética.

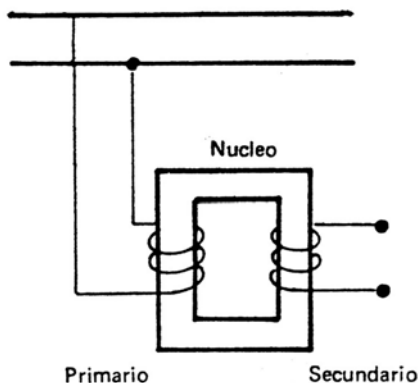


FIGURA 1 - PARTES COMPONENTES DE UN TRANSFORMADOR ELEMENTAL.

En la figura 1, se observa el esquema de un transformador elemental. Éste está formado por dos arrollamientos devanados sobre un núcleo de hierro. El que recibe energía a través de la red, se denomina primario, el otro arrollamiento, se denomina secundario.

Al estar el primario conectado a una fuente de corriente alterna, se establece un campo magnético que no solamente se expande y se contrae, sino que también invierte su sentido en cada semiciclo, siguiendo en todo momento la forma de variación de la corriente que lo produce. Si bien los bobinados primario y secundario están aislados eléctricamente entre sí, las variaciones del campo magnético del primario influyen sobre el bobinado secundario ya que ambos se encuentran acoplados magnéticamente.

Veamos en que consiste la influencia del primario sobre el secundario: si el generador que alimenta al primario entrega una tensión de 200 volt de alterna de una frecuencia de 50 c/s y el arrollamiento tiene un total de 100 espiras, resulta evidente que la tensión aparece distribuida a razón de dos volt por espira.

El campo magnético variable producido por el primario, es encauzado por el núcleo de manera tal que el arrollamiento secundario abarca una cantidad permanentemente variable de líneas de fuerza, lo que determina en el mismo una tensión inducida. Vale destacar que la magnitud de la tensión inducida en el

secundario dependerá del número de espiras de este bobinado. En el caso planteado en líneas anteriores teníamos una tensión primaria (E_p) de 200 V, y un número de espiras en el primario (N_p) de 100; esto equivale a dos volt por espira. Ahora bien, la inducción en el secundario, se establece también a razón de dos volt por espira ya que el campo magnético es común a ambos bobinados.

Esto quiere decir que si en el secundario tenemos por ejemplo 200 espiras, podemos considerar que la inducción entre sus extremos tendrá un valor de 400 volt, ya que se realiza a razón de dos volt por espira. Estas conclusiones nos permiten afirmar que: si el número de espiras del secundario es mayor que el del primario, la tensión secundaria será proporcionalmente mayor.

Precisamente este es el caso de los llamados transformadores elevadores de tensión, por supuesto que los mismos fundamentos técnicos intervienen en la situación inversa, es decir: cuando el número de espiras del secundario es menor que el del primario, la tensión secundaria será proporcionalmente menor. En cuyo caso diremos que se trata de un transformador reductor de tensión.

Por ejemplo, si el secundario tiene la mitad de espiras que el primario, la tensión secundaria también será la mitad de la primaria.

RELACIÓN DE TRANSFORMACIÓN

De acuerdo a lo explicado hasta el momento, es evidente que existe una estrecha relación entre el número de espiras y las tensiones de los bobinados, es decir, si el secundario es más grande que el primario, el transformador es elevador, si el secundario tiene menos espiras es un reductor, esto se indica en la figura 2 donde se utilizan símbolos adecuados a la situación que desea señalar.

La relación mencionada anteriormente entre el número de espiras y las tensiones de los bobinados puede ser indicada en la siguiente forma:

$$\frac{\text{Tensión primario}}{\text{Tensión secundario}} = \frac{\text{Nro de espiras primario}}{\text{Nro de espiras secundario}}$$

que se conoce con el nombre de relación de transformación.

Aplicaremos esta expresión al ejemplo planteado anteriormente a fin de comprobar su cumplimiento.

Siendo:

La tensión primaria (E_p) igual a 200 V.

La tensión secundaria (E_s) igual a 400 V.

El número de espiras en el primario (N_p) igual 100 V.

El número de espiras en el secundario (N_s) igual a 200.

Tenemos:

$$\frac{E_p}{E_s} = \frac{N_p}{N_s} = \frac{200 \text{ V}}{400 \text{ V}} = \frac{100 \text{ espiras}}{200 \text{ espiras}} = 0,5$$

lo que demuestra que se trata efectivamente de una igualdad.

Tomando como base la relación de transformación puede determinarse la cantidad de espiras necesarias en el secundario para lograr una determinada tensión si se conocen los datos restantes para ello basta con aplicar una sencilla fórmula derivada de la anterior.

$$N_s = \frac{E_s \times N_p}{E_p}$$

Si aplicamos dicha fórmula en el ejemplo dado suponiendo desconocer el número de espiras del secundario,

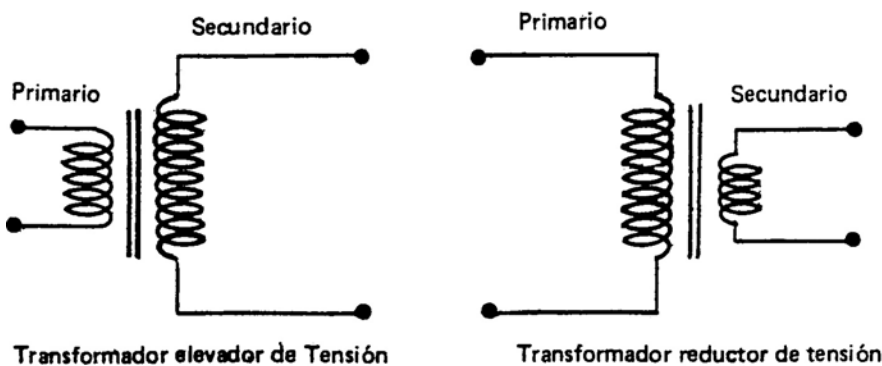


FIGURA 2

dario, podemos comprobar la utilidad de la misma. Para ello es necesario reemplazar cada término por el valor correspondiente, recordando que $E_s = 400$, $N_p = 100$ y $E_p = 200$ nos queda:

$$N_s = \frac{400 \times 100}{200} = 200 \text{ espiras}$$

resultado ya conocido que certifica la validez de la fórmula.

Consideramos interesante comentar un caso práctico referente al empleo de los transformadores en el transporte de una potencia eléctrica a gran distancia. Supongamos la necesidad de llevar una potencia eléctrica equivalente a 200 HP entregando el generador una tensión de 500 volt: conociendo el valor de la tensión entregada por el generador, es necesario saber la intensidad de corriente en la línea para satisfacer la potencia demandada, en nuestro caso, 200 HP.

Se recordará que un HP equivale a 736 watts, por ese motivo es posible indicar la siguiente igualdad.

$$200 \times 736 = 500 \times I$$

Observe que a la izquierda del signo igual el producto 200×736 , representa la potencia eléctrica que se desea transportar, mientras que a la derecha aparece la clásica multiplicación de tensión por intensidad para calcular la potencia eléctrica. El valor de la tensión nos es conocido, 500 v; es nuestro interés por lo tanto saber el valor de corriente necesaria para satisfacer el traslado de los 200 HP.

Partiendo de nuestra igualdad $200 \times 736 = 500 \times I$, para determinar el valor de la corriente bastará con pasar los 500 volt de tensión a la izquierda del signo igual pero realizando la operación inversa, por lo tanto ya que se encontraban multiplicando aparecerán dividiendo, tal como se indica a continuación.

$$I = \frac{200 \times 736}{500} = 292 \text{ amperes}$$

Se trata evidentemente de una corriente de apreciable valor, razón por la cual es fácil suponer que la resistencia de los conductores de línea puede producir apreciables pérdidas de potencia.

Si se pretende reducir las pérdidas habrá que disminuir la resistencia, lo que obliga a utilizar conductores de mayor sección, pero ocurrirá que al emplear cables de sección suficiente para atenuar las pérdidas de potencia, el costo de la línea se hace excesivo.

¿La solución? Supongamos que para transportar la potencia considerada se disponga en el origen de una tensión de 10000 volt; para determinar la corriente necesaria se realizan operaciones similares a las recién explicadas, o sea,

$$200 \times 736 = 10000 \times I$$

e donde

$$I = \frac{200 \times 736}{10000} = 15,7 \text{ amperes}$$

Considerando igual resistencia de los cables de línea que en el caso anterior, es evidente que al circular una corriente mucho menor, las pérdidas se reducen considerablemente. A los efectos comparativos, podemos agregar que si se quisieran tener las mismas pérdidas que en el caso anterior, se puede emplear un cable de sección mucho menor, lo cual reduce considerablemente el precio de la instalación.

Se ve la importancia que tiene producir en la central de origen una tensión muy elevada, pero existen grandes dificultades en la construcción de generadores que provean altas tensiones, debiéndose tener en cuenta además que en general los aparatos de utilización no son construidos para soportar tensiones tan elevadas. Afortunadamente los transformadores permiten solucionar estos inconvenientes, para ello se los dispone en la forma indicada en el esquema de la figura 3. Puede notarse que el generador entrega una tensión de 500 volt por ejemplo, dicho generador está conectado al circuito primario de un transformador cuyo secundario lleva veinte veces más espiras que el

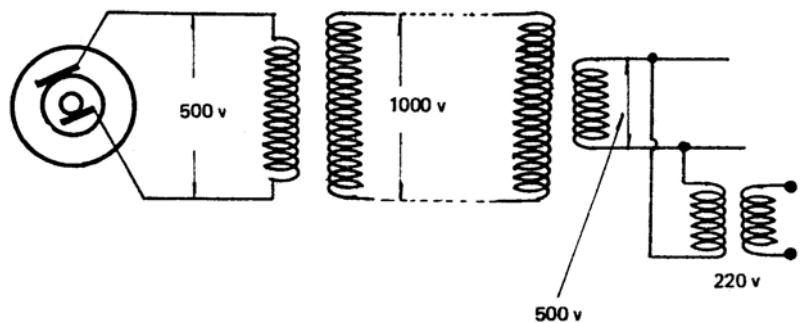


FIGURA 3 - USO DE TRANSFORMADORES PARA ATENUAR PEDIDOS EN EL TRANSPORTE DE ENERGIA ELECTRICA.

primario en consecuencia el voltaje en los bornes del secundario resulta ser $500 \times 20 = 10000$ volt.

Los conductores de línea, están conectados a los bornes del secundario, pero no finalizan directamente sobre los circuitos de utilización, sino que se unen a los extremos del primario de otro transformado que tienen veinte veces más espiras que el secundario, por ese motivo entre los bornes de este último se desarrolla una tensión de 500 v.

Agregamos que al secundario de este transformador se conectan otros transformadores tal como lo señala la figura 3, en el caso de necesitarse una nueva reducción de tensión para proveer energía a la red domiciliaria.

COMPORTAMIENTO DEL TRANSFORMADOR CON CARGA

Hasta el presente hemos considerado los principios de funcionamiento de los transformadores estáticos en forma básica. Ha llegado el momento de analizar como se comporta cuando se le conecta una carga. Previamente veamos que ocurre cuando al secundario no se ha conectado carga alguna.

POTENCIA DISIPADA CON EL SECUNDARIO SIN CARGA

Anteriormente se consideró a un transformador con el bobinado secundario totalmente desconectado, en esa situación el secundario es un elemento prácticamente

inactivo ya que si bien tiene tensión inducida entre sus terminales, esta tensión no es utilizada por hallarse el circuito abierto.

Por ese motivo podemos admitir que en estas condiciones el único elemento activo es el bobinado primario, por encontrarse conectado al generador.

Es importante considerar un aspecto fundamental de los transformadores; sabemos que el generador provee una corriente alterna que provoca la expansión y contracción del campo magnético asociado; en el primer cuarto de ciclo el campo se expande y en el segundo cuarto de ciclo se contrae porque la corriente disminuye, esto se repite en el medio ciclo restante; un detalle de gran interés, es que durante su contracción el campo magnético crea una corriente inducida en el primario que es devuelta al generador, reponiendo así la energía que este entregara en el cuarto de ciclo anterior.

Como resultado de este proceso, admitirse que un transformador con el secundario sin carga no consume potencia. Esta consideración es válida teóricamente ya que en la práctica los arrollamientos poseen una cierta resistencia (propia del alambre) que produce una disipación de potencia en forma de calor. Además, cuando se utilizan núcleos de hierro debe admitirse la existencia de pérdidas en dicho núcleo, que aunque pequeñas, también significan una cierta disipación de potencia en forma de calor. Estas realidades nos hacen modificar en algo el concepto anterior, por lo tanto señalamos que en un transformador con el secundario sin carga, la única potencia consumida del generador proviene de las pérdidas del núcleo y de la resistencia del alambre.

EL TRANSFORMADOR CON CARGA

Con fines prácticos, interesa más ver que sucede al colocar una carga al secundario, por ejemplo, una resistencia, tal como se indica en la figura 4. Recordemos que al trabajar un transformador en vacío, esto es, cuando está conectado a la línea pero no lleva carga en el secundario, se producen pérdidas debido a la circulación de una corriente (llamada magnetizante) cuya intensidad es la necesaria para imantar fuertemente el núcleo.

Mientras el transformador no está cargado, las líneas de fuerza del campo primario producen en dicho arrollamiento una fuerza contraelectromotriz que limita la corriente a un valor comparativamente bajo. Pero apenas se conecta la carga al secundario, la corriente aumentará automáticamente en forma proporcional a la magnitud de la carga conectada. Esta variación automática de la corriente primaria es producida por la influencia del campo magnético secundario sobre el flujo del arrollamiento primario, en efecto, la corriente del secundario establece un campo de sentido opuesto al principio, quien tiende a ser neutralizado.

Al ocurrir esto, disminuye la fuerza contraelectromotriz en el primario permitiendo que circule por él una corriente más intensa. Se tendrá en cuenta que generalmente la resistencia del bobinado primario es pequeña, de modo que la limitación de la corriente primaria se debe fundamentalmente a la fuerza contraelectromotriz en el primario permitiendo que circule por él una corriente más intensa. Se tendrá en cuenta que generalmente la resistencia del bobinado primario es pequeña, de modo que la limitación de la corriente primaria se debe fundamentalmente a la fuerza contraelectromotriz, por ese motivo, si la carga del secundario aumenta hasta el límite en que el campo secundario aumenta hasta el límite en que el campo secundario casi neutraliza por completo al flujo primario, la f.c.e.m. producida en el primario será tan pequeña que permitirá un exceso de corriente capaz de inutilizar el arrollamiento.

Lo recién explicado es un detalle muy importante que conviene tener en cuenta al tratar con los transformadores, ya que nos explica la razón por la cual un transformador puede quemarse si es conectado a una fuente de corriente continua constante, dado que este tipo de corriente no desarrolla f.c.e.m.

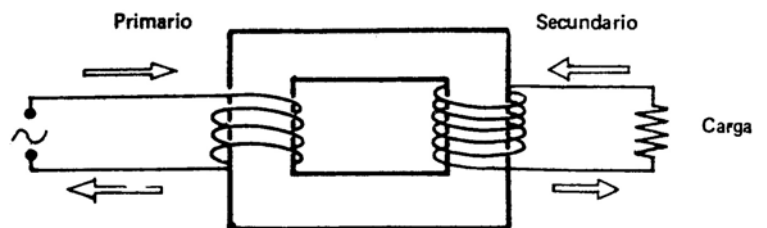


FIGURA 4 - EL TRANSFORMADOR CON CARGA.

Volviendo a la figura 4, podemos decir que la magnitud de la corriente que atraviesa la resistencia de carga depende del valor de ésta y de la tensión presente en el secundario; podemos agregar que la energía del secundario depende de la corriente secundaria circulante y ésta a su vez queda determinada por los valores anteriormente mencionados. En consecuencia bien puede decirse que la potencia del secundario queda reflejada sobre el primario, exigiendo un mayor consumo del generador.

Esto significa que el primario se encargará de transferirle al secundario la potencia que este necesite consumir, si se tratara de un transformador ideal (sin pérdidas), se admitirá que la potencia disipada en el secundario, lo que puede expresarse

$$W_p = W_s$$

De esta sencilla igualdad surge otro aspecto importante de los transformadores, en efecto, decimos que las potencias son iguales y dado que la potencia es el producto de la tensión por la intensidad; la igualdad puede ser indicada también así:

$$E_p \times I_p = E_s \times I_s$$

Si consideramos un transformador que tiene una relación de 1: 1, o sea, la cantidad de espiras en el secundario y en el primario son iguales, es natural que la tensión primaria sea igual a la secundaria, de modo que para cumplir la igualdad indicada más arriba, debe admitirse que las corrientes del primario y secundario también son iguales.

¿Pero qué sucede en el caso de un transformador reductor de tensión? Al ser menor la tensión en el secundario, para mantener la igualdad de potencias debe admitirse que la corriente secundaria es mayor que la primaria es una magnitud que depende de la relación de transformación.

Un caso práctico dejará perfectamente aclarada esta cuestión: en la figura 5, se representa un transformador que posee 1000 espiras en el primario y 500 en el secundario de modo que su relación de transformación es 2:1; automáticamente podemos establecer que la tensión secundaria es 10 volt ya que la tensión secundaria es de 200 volt.

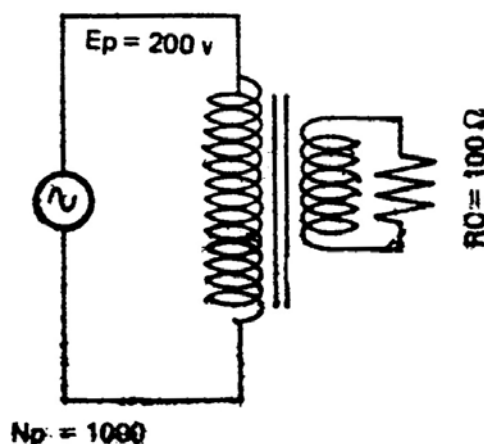


FIGURA 5.

La carga conectada al bobinado secundario es una resistencia de 100 Ohm, de manera que la corriente circulante en el secundario se calcula mediante la simple aplicación de la Ley de Ohm:

$$\text{Intensidad secundario} = \frac{\text{tensión secundario}}{\text{resistencia de carga}} = \frac{100 \text{ v}}{100 \text{ Ohm}} = 1 \text{ A}$$

Conocida la corriente secundaria es fácil determinar la potencia que se desarrolla en ese circuito

$$\begin{aligned} W_s &= E_s \times I_s \\ W_s &= 100 \text{ v} \times 1 \text{ A} = 100 \text{ W} \end{aligned}$$

Esta potencia de 100 Watts disipada en el primario tiene que ser provista naturalmente por el generador que alimenta al primario, ya que la energía que se desarrolla sobre la resistencia de carga no puede salir de la nada, en consecuencia, como las potencias primaria y secundaria son iguales, la intensidad circulante por el primario puede ser determinada por la fórmula

$$\text{Intensidad primario} = \frac{\text{Potencia primario}}{\text{Tensión primario}}$$

$$I_p = \frac{100 \text{ W}}{200 \text{ V}} = 0,5 \text{ A}$$

Se notará que el valor de la intensidad en el primario tiene un valor de la intensidad en el secundario tiene un valor exactamente igual a la mitad de la corriente circulante por el secundario, el resultado es perfec-

tamente lógico ya que por ser iguales las potencias en el primario y en el secundario, es natural que si en el secundario, la tensión es más baja, la intensidad sea proporcionalmente más alta.

No consideramos necesario insistir sobre el tema, el lector deducirá fácilmente que en el caso de tratarse de un transformador elevador de tensión, la corriente secundaria disminuirá proporcionalmente al aumento de tensión del secundario con respecto al primario.

DETALLES CONSTRUCTIVOS DE LOS TRANSFORMADORES

Comentaremos a continuación algunos detalles constructivos de los transformadores, ya que en la práctica se encuentran muy distintas variantes debidas fundamentalmente a la amplia gama de utilización de estas máquinas eléctricas.

TRANSFORMADORES MONÓFASICOS

Como es sabido el objeto del núcleo de un transformador es proporcionar un camino de poca reluctancia al flujo magnético, por lo tanto se construyen con hierro dulce o acero al silicio de calidad especial, formando paquetes de láminas finas. Estas láminas se aíslan unas de otras por medio de una capa de barniz, o bien de óxido que se produce sobre la superficie térmico especial.

Al igual que en el caso de los rotores de máquinas de corriente continua, la construcción laminar de los núcleos de los transformadores permite la reducción de corrientes parásitas, evitando recalentamiento y pérdidas indeseables.

Desde el punto de vista práctico son dos los tipos de núcleo más comunes: de columnas y acorazado. Con referencia al tipo de «columnas», podemos decir que su aspecto físico es el mostrado en la figura 1, o sea, está formado por cuatro lados que suelen llamarse comúnmente ramas, los lados donde se alojan los arrollamientos se denominan columnas, los lados restantes reciben el nombre de culatas. Vale destacar que este tipo de núcleo es poco usado ya que si bien la mayor parte del flujo magnético desarrollado por el

primario se encauza por el núcleo, una parte del mismo se extenderá alrededor de los arrollamientos y también a través del hueco entre las ramas del núcleo. Esto es lo que se llama flujo de dispersión y es bastante apreciable cuando el transformador trabaja a plena carga, dicho flujo puede apreciarse en el esquema de la figura 6.

Con referencia al núcleo acorazado, podemos decir, tal como lo muestra la figura 7, que generalmente está formado por tres columnas encontrándose los arrollamientos primario y secundario en la columna central. Esta disposición permite un mejor aprovechamiento del flujo, disminuyendo por lo tanto el flujo de dispersión, esto se debe evidentemente a que el arrollamiento secundario abarca casi totalmente al flujo primario, quien a su vez encuentra un circuito magnético de baja reluctancia en las columnas laterales.

Con respecto a los arrollamientos de estos transformadores, indicamos que se bobinan con alambre de cobre aislado de sección redonda para los trans-

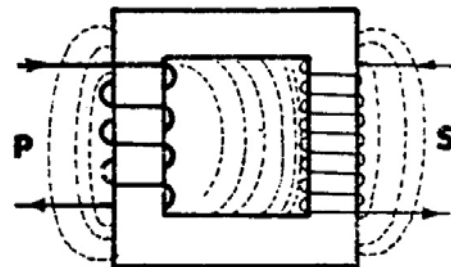


FIGURA 6 - FLUJO DE DISPERSIÓN.

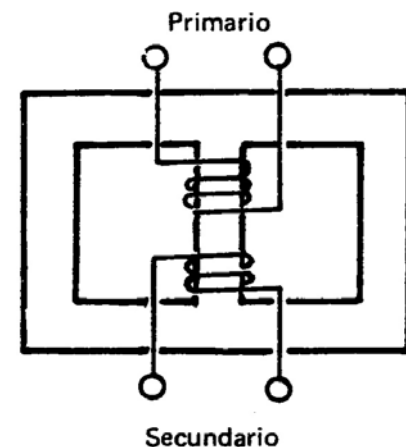


FIGURA 7 - TRANSFORMADOR ACORAZADO.

formadores pequeños y cuadrada o rectangular en los de mediana o alta potencia. En los últimos casos se consiguen bobinados más compactos, lo que permite un mejor aprovechamiento del espacio disponible, lográndose además una facilidad para la evacuación de calor.

Con excepción de los transformadores miniatura, los bobinados no se disponen directamente sobre las columnas, sino que se los realiza sobre moldes de plástico, madera u otro material aislante. Antes de ubicar los arrollamientos en el núcleo se los calienta para quitarles la humedad y se los sumerge en barniz dejándolos luego secar.

Con respecto a la disposición de los devanados son dos las formas más comunes, ellas se ilustran en la figura 8, se trata de los llamados concéntricos y los alternos.

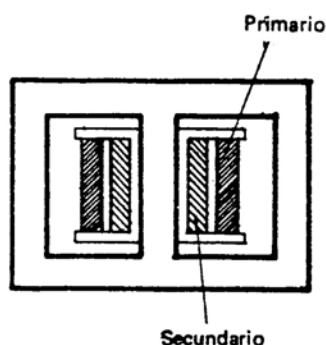


FIGURA 8 - DEVANADOR CONCENTRICO.

Los devanados concéntricos, tal como su nombre lo indica, están dispuestos uno dentro del otro, generalmente el externo es el primario, tal disposición tiene por fin disminuir al mínimo el flujo de dispersión. Por supuesto que entre ambos arrollamientos debe existir adecuada aislación, incluso en ciertos casos se los separa con listones de madera para lograr una correcta ventilación.

En cuanto a los devanados alternos, si bien permiten un mayor flujo de dispersión, por estar dispuestos uno sobre el otro, presentan la ventaja en caso de ocurrir una avería, de quitar solamente el bobinado afectado, cosa que no podía realizarse en el caso de los bobinados concéntricos.

TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS

Comentaremos brevemente las disposiciones constructivas de los transformadores destinados a ser alimentados con corrientes trifásicas, aunque vale destacar que para transformar dichas corrientes también pueden utilizarse transformadores monofásicos.

Este último caso tiene aplicación en redes de distribución de mucha importancia, o cuando por dificultades casi insalvables en su transporte no conviene utilizar un transformador trifásico; se tendrá en cuenta que al tratarse de tres unidades independientes toda avería en una de las fases obligará a reparar o cambiar uno solo de los transformadores.

Con referencia a los transformadores trifásicos, señalamos que sus núcleos generalmente adoptan dos disposiciones, en columnas y acorazados.

DISPOSICIÓN EN COLUMNAS

Es la más difundida, los transformadores trifásicos en columna pueden considerarse como el resultado de la unión de tres núcleos a una columna común, tal como se indica en la figura 9. Dado que en las corrientes trifásicas los tres flujos quedan defasados 120° entre sí, en cada instante su suma equivale a cero, por lo tanto por la columna central no circula flujo alguno, lo que permite suprimirla, tal como se aprecia en la figura 10. Nos queda una disposición en estrella sin columna central, de la cual podemos suprimir las culatas A para obtener la disposición de columnas más utilizadas (figura 11). Al suprimir las culatas A, se produce desde luego un desequilibrio magnético de relativa importancia, que se justifica por la facilidad de construcción que ofrecen estos transformadores.

Otra variante es la mostrada en la figura 12 donde la unión de los tres núcleos se realizó en triángulo y no en estrella como en el caso anterior.

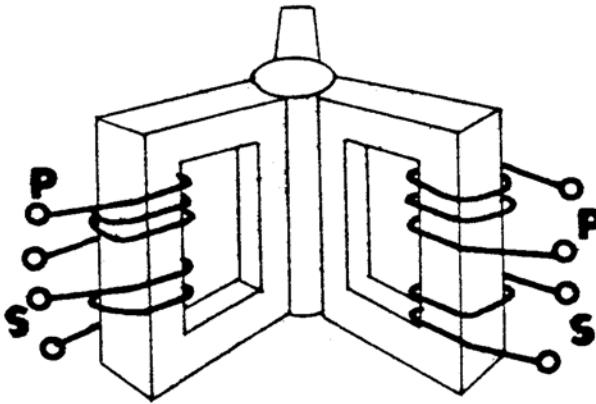


FIGURA 9 - ORIGEN DE LA DISPOSICION DE COLUMNAS.

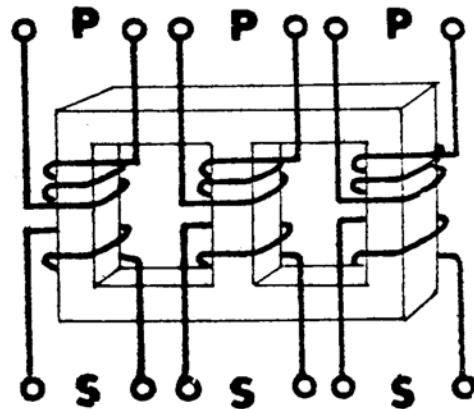


FIGURA 11 - DISPOSICION DE COLUMNAS MAS UTILIZADAS.

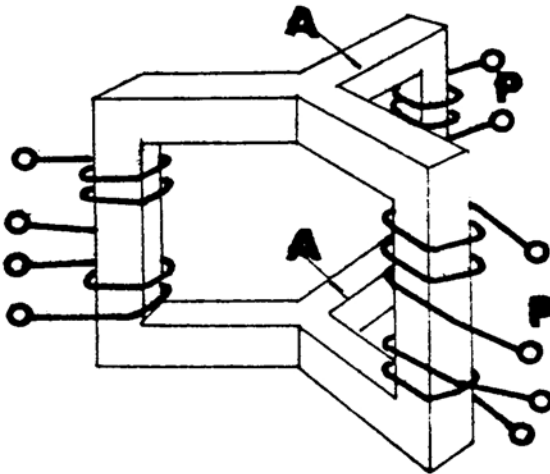


FIGURA 10 - SUPRESION DE LA COLUMNA COMUN.

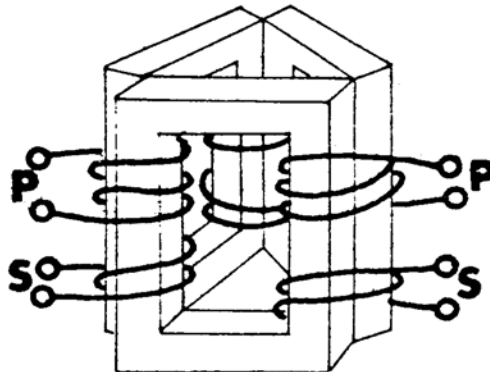


FIGURA 12 - TRANSFORMADOR DE COLUMNAS CON CULATAS EN TRIANGULO.

DISPOSICIÓN ACORAZADA

Los núcleos acorazados guardan similitud con los destinados a corrientes monofásicas, en ellos las columnas extremas se colocan con el fin de disminuir la sección de las culatas, con lo que se logra transformarse de menor altura. Esta disposición se muestra en la figura 13.

CONEXIÓN DE LOS ARROLLAMIENTOS

Dado que la forma constructiva de arrollamientos no difiere de lo indicado para transformadores monofásicos, pasamos a comentar los conexiones más característicos en el caso de los trifásicos, funda-

mentalmente estos conexiones serán del tipo estrella o triángulo.

CONEXIÓN ESTRELLA-ESTRELLA

Tal como se observa en la figura 14, las bobinas del primario y secundario están conectadas en estrella. Este conexionado se utiliza especialmente para las tensiones, ya que la tensión total se reparte entre dos bobinados, cada uno soporta la tensión de fase facilitando de esta manera la aislación. Esta disposición permite utilizar un conductor neutro en el circuito secundario, lo que representa una gran ventaja dado que puede proveerse además de la corriente trifásica, corriente monofásica par uso doméstico.

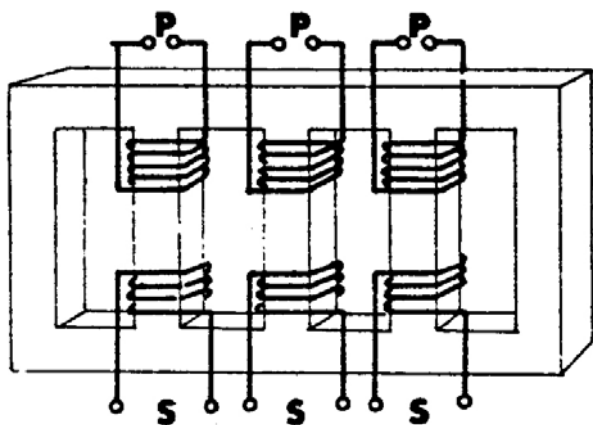


FIGURA 13 - TRANSFORMADOR ACORAZADO.

CONEXIÓN TRIÁNGULO-TRIÁNGULO

Esta disposición se muestra en la figura 15, las bobinas primarias, como así también las secundarias en triángulo, dado que no se puede conectar un conductor neutro es poco utilizada, observe además que cada devanado debe soportar la tensión total. Es fácil notar en el esquema, que en caso de avería de una de las bobinas, sigue toda la red en servicio, pero la capacidad del transformador queda reducida en un 50 % aproximadamente.

CONEXIÓN ESTRELLA-TRIÁNGULO

La disposición estrella triángulo es utilizada cuando se hace necesario reducir la tensión para su posterior distribución. Naturalmente que no resulta útil cuando sea necesario un conductor neutro en el secundario. La disposición estrella-triángulo se indica en la figura 16; podemos agregar que presenta ciertas ventajas ya que por estar conectado el primario en estrella, la tensión total queda repartida en dos bobinados y además, el secundario no deja ninguna fase fuera de servicio, aún en el caso de averiarse uno de los arrollamientos.

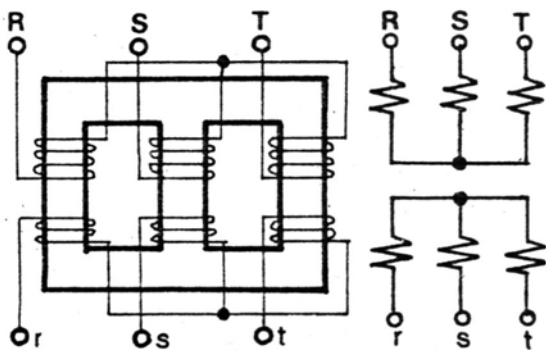


FIGURA 14 - CONEXION ESTRELLA - ESTRELLA.

CONEXIÓN TRIÁNGULO-ESTRELLA

Es mostrada en el esquema de la figura 17, es un caso inverso al anterior, o sea, en el primario tiene la ventaja de la conexión triángulo, si se interrumpe una fase el transformador continúa funcionando y en el secundario la tensión total se reparte entre dos bobinados. Se comprende que a la inversa del caso anterior, este tipo de conexión se utiliza para transformadores destinados a elevar tensión.

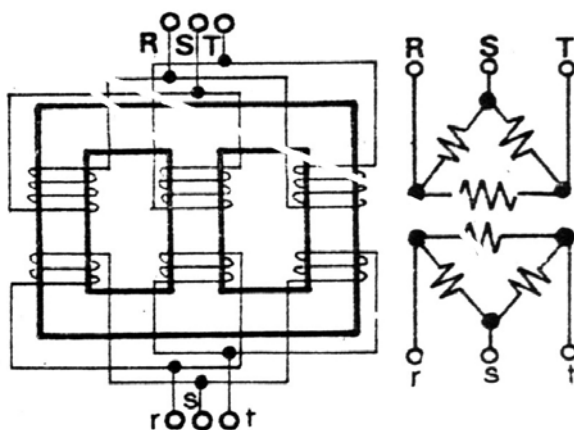


FIGURA 15 - CONEXION TRIANGULO - TRIANGULO.

CONEXIÓN ESTRELLA ZIG - ZAG

Tal como se observa en la figura 18, se trata de un conexionado particularmente interesante, las bobinas del primario se encuentran conectadas en estrella, pero en el secundario el arrollamiento de cada fase se ha dividido en dos partes, cada una de ellas se ha conectado, en serie con otra de la siguiente columna,

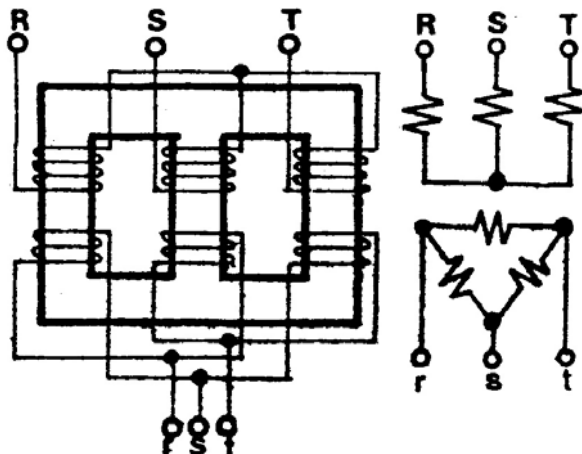


FIGURA 16 - CONEXION ESTRELLA - TRIANGULO.

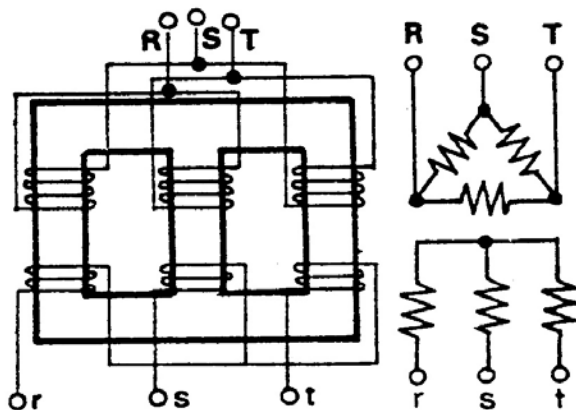


FIGURA 17 - CONEXION TRIANGULO - ESTRELLA.

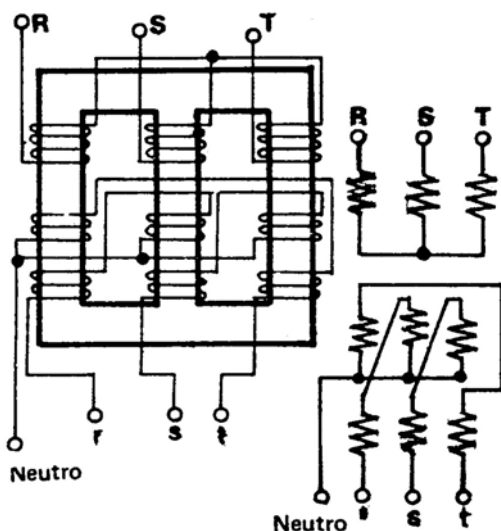


FIGURA 18 - CONEXION ESTRELLA - ZIG-ZAG.

quedando en definitiva las tres series dispuestos en estrella.

Este conexionado permite un conductor neutro en el secundario, por lo tanto puede abastecer energía eléctrica para alumbrado y fuerza motriz. Es de destacar además que si una fase se recarga más que las otras, el transformador no sufre un desequilibrio tan pronunciado, ya que la corriente de cada fase recorre bobinas ubicadas en dos columnas.

AUTOTRANSFORMADORES

Un autotransformador es un transformador en el que se emplea una sola bobina para el primario y el secundario, con una derivación tal como lo indica la figura 19. Destacamos que los autotransformadores utilizan menos cobre que un transformador para las mismas condiciones de trabajo.

Aprovechamos la figura 20 para indicar brevemente los principios de funcionamiento del autotransformador. El bobinado AB es considerado como primario ya que al mismo se conecta la fuente de alimentación, la corriente que circule por dicho primario, inducirá tensión sobre el bobinado CD; suponiendo que el primario tiene un total de 1000 espiras y el bobinado CD 500 espiras, nos encontramos con que las espiras del secundario son realmente 1500 ya que la tensión de salida la estamos tomando entre los puntos B y D donde se obtiene una tensión de 300 volt.

Con un criterio similar podríamos utilizar el mismo autotransformador como reductor, para ello se lo dispone en la forma indicada en la figura 21.

Vale analizar que en la figura 20 se disponen 1000 espiras en el primario, por lo tanto si se tratara de un transformador, para lograr 300 volt en el secundario sería necesario que este tuviera 150 espiras, lo que totaliza entre primario y secundario una cantidad de 2500 espiras. Pero en el caso del autotransformador, como el primario forma parte del secundario, a igual resultado se llega con 1500 espiras, lo que redundará en una apreciable economía en el cobre como ya se anticipó.

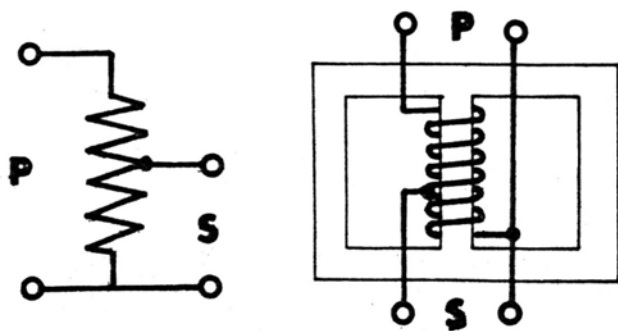


FIGURA 19 - AUTOTRANSFORMADOR.

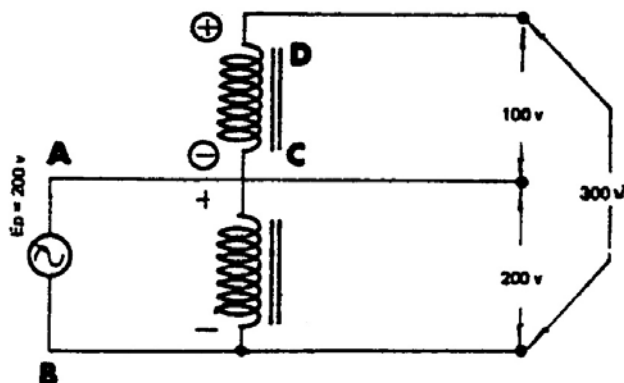


FIGURA 20 - AUTOTRANSFORMADOR ELEVADO DE TENSION.

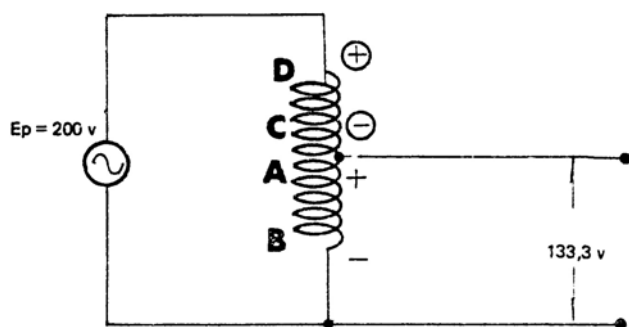


FIGURA 21 - AUTOTRANSFORMADOR REDUCTOR DE TENSION.

El principal inconveniente que presenta un transformador, es la de aislación eléctrica entre el primario y el secundario ya que ambos trabajan en forma conjunta.

REFRIGERACIÓN

En el caso de transformadores que manejan medianas y altas potencias, se hace necesario asegurar una buena refrigeración de los arrollamientos, para ello se los dispone en el interior de una cuba metálica llena de aceite provista de aletas de disipación tal como se puede apreciar en la figura 22.

En la misma figura se puede observar un tanque destinado a recibir el exceso de aceite que escapa de la caja por efectos de la dilatación producida por el calor. En la parte superior de la caja se encuentran los tres bornes de salida de alta tensión que están protegidos con aisladores especiales.

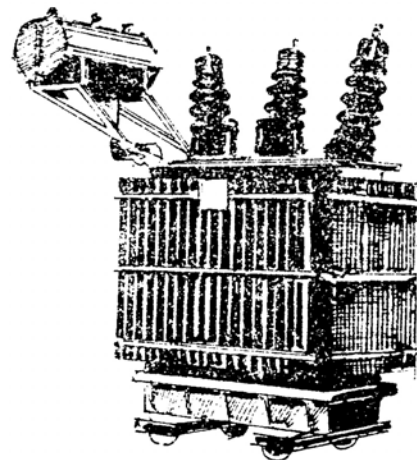


FIGURA 22 - AUTOTRANSFORMADOR CON CAJA DE ACEITE CON ALETAS DISIPADORAS.

PARALELO DE TRANSFORMADORES

Es interesante desde el punto de vista práctico, considerar algunos detalles relativos al acoplamiento de transformadores. Es el caso mostrado en la figura 23, se trata de transferir energía eléctrica desde la línea superior (R-O) a la inferior por medio de dos transformadores (no es esta una cantidad límite). Para realizar dicha operación se deben tener en cuenta algunos requisitos importantes, veamos:

1) Es indispensable que se trate de transformadores fabricados con el fin de ser conectados en paralelo, a los efectos de asegurar que las tensiones obtenidas sobre los arrollamientos secundarios sean iguales. Esto es importante ya que en caso contrario, por no ser las tensiones iguales, un arrollamiento trabajaría como generador para el otro, entregándole una corriente que además de constituir una pérdida, produce una elevación de la temperatura que puede sobrepasar los límites de seguridad de los arrollamientos.

2) Sin conectar carga a los secundarios debe tenerse la certeza de que las tensiones entregadas por estos se encuentren en fase.

3) Es necesario que los transformadores acoplados tengan igual potencia para evitar que unos trabajen sobrecargados con respecto a los otros.

Dado que suponemos que al colocar dos transformadores en paralelo se los ha elegido de igual potencia y características constructivas, uno de los errores más fáciles de cometer es el de no respetar la polaridad. En efecto, en la figura 23, se han representado dos posibilidades de conexión, una incorrecta y la otra correcta. En ambas se supone la misma polaridad instantánea.

En el caso señalado «incorrecto», puede observarse que los terminales de ambos secundarios no fueron dispuestos en forma simétrica; considerando a cada secundario como un generador y disponiendo lámparas de prueba en la forma indicada. Entendemos que las mismas encenderán, ya que descontada la resistencia propia del circuito se opone a la circulación de corriente.

De no haberse colocado las lámparas al conectar incorrectamente los secundarios a la línea, se hubiera establecido un cortocircuito cuya corriente puede dañar los arrollamientos o bien quemar los fusibles.

En la figura 23, el detalle marcado «correcto», señala la misma polaridad instantánea del caso anterior; puede notarse que las lámparas no encienden ya que no puede circular corriente por las mismas. Para interpretar este

último concepto, basta con partir desde uno de los polos, el negativo del secundario izquierdo por ejemplo, y seguir el circuito; se observará que en esa forma llegamos al negativo del secundario derecho, por lo tanto entre polos de igual signo y magnitud no circula corriente.

RENDIMIENTO

Antes de considerar en forma práctica el cálculo de un transformador, haremos una breve referencia al rendimiento. Como sabemos la circulación de corriente por los arrollamientos, representa un gasto de energía que se manifiesta en forma de calor, además en los núcleos también se produce una pérdida de energía por la formación de corrientes de Foucault y la dispersión de líneas de fuerza del campo magnético. Sin entrar en mayores detalles, deducimos que todo transformador sufre una serie de pérdidas de energía y que por lo tanto la potencia en el secundario, siempre será inferior a la potencia presente en el primario. Por ese motivo consideramos como rendimiento de un transformador a la relación

$$\text{Rendimiento} = \frac{\text{Potencia de secundario}}{\text{Potencia del primario}}$$

Es evidente que el resultado de esta relación será siempre inferior a la unidad, pero siempre superior a la unidad, pero de todas maneras los transformadores son máquinas de buen rendimiento ya que considerando frecuencias industriales de 50 c/s y expresando el rendimiento como porcentaje, encontraremos valores que oscilan entre 93 y 99 %.

CÁLCULO PRÁCTICO DE UN TRANSFORMADOR

Mediante datos recopilados de la práctica, puede calcularse un transformador con relativa facilidad, con el fin de ahorrar tiempo. Esos datos se disponen en «tablas de trabajo» similares a las incluidas en nuestra explicación.

Fundamentalmente son tres los detalles a tomar en cuenta para el cálculo de un transformador:

1) Superficie de la sección del núcleo.

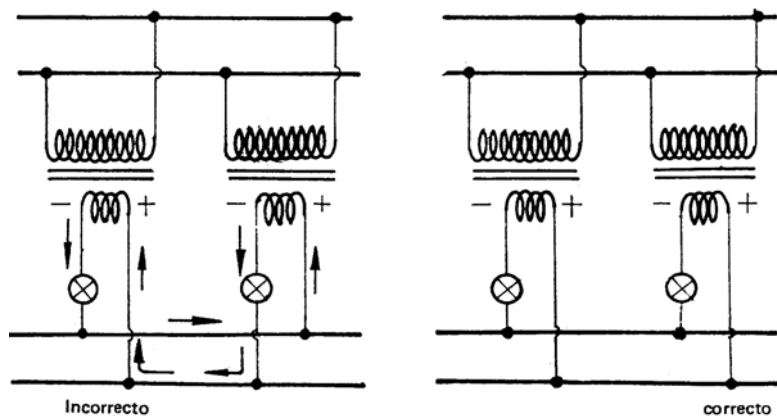


FIGURA 23 - ACOPLAMIENTO DE TRANSFORMADORES.

- 2) Número de espiras del primario y secundario.
- 3) Diámetro del alambre en le primario y secundario.

SUPERFICIE DE LA SECCIÓN DEL NÚCLEO

Para calcularla, necesitamos conocer la Intensidad y la Tensión que debe proporcionar el secundario. Con dichos datos determinamos la potencia que tendremos a la salida del transformador.

A continuación, debemos remitimos al ábaco que se ilustra en la figura 24. Estudiémoslo: en el eje vertical, de abajo hacia arriba, queda indicado el valor de la potencia en Vol-Amper, mientras que en el eje horizontal, desde el valor 1 al valor 100 están los centímetros cuadrados de la sección del núcleo.

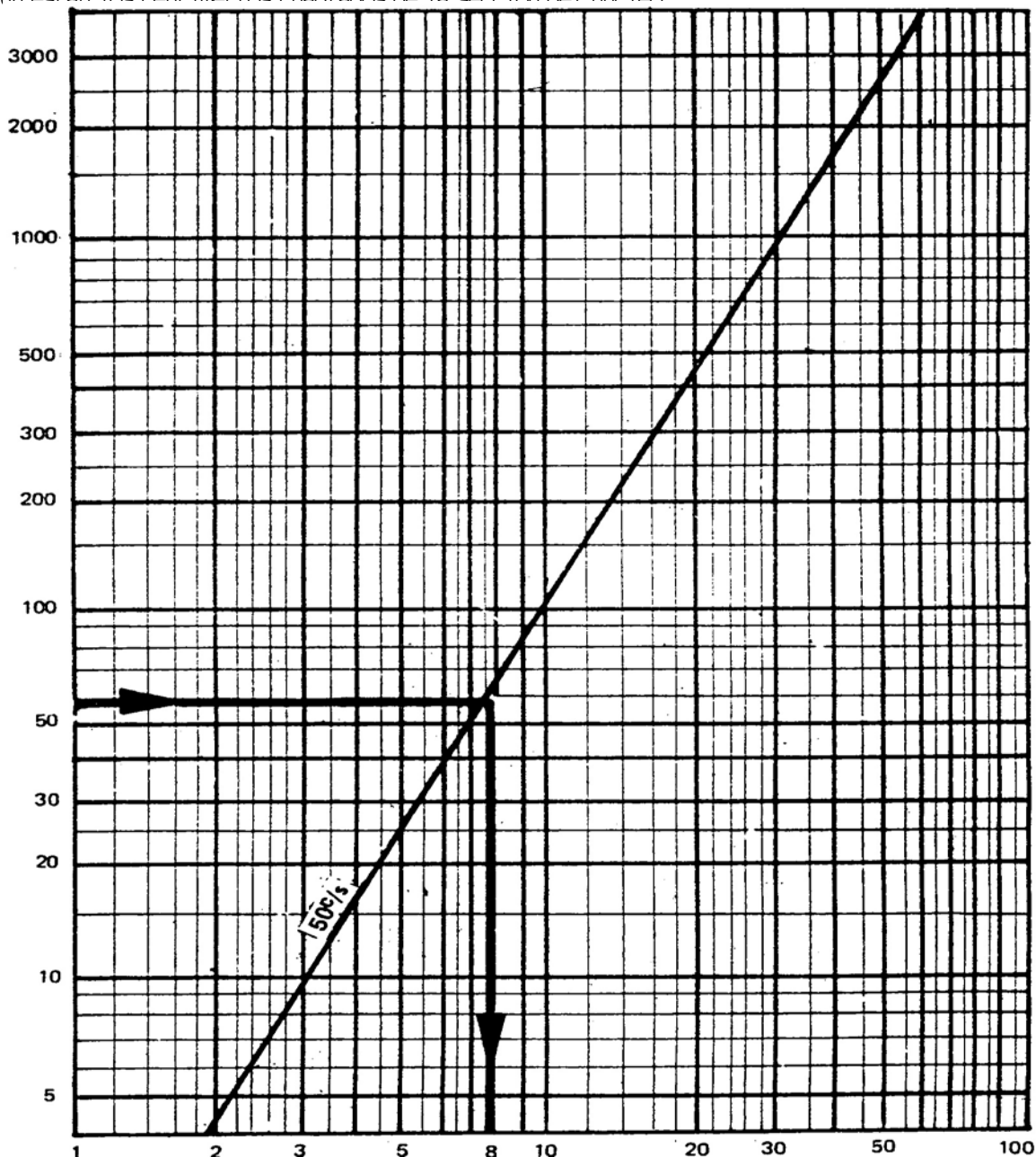


FIGURA 24 - ABACO PARA DETERMINAR LA SECCION DEL NUCLEO.

Situada en diagonal aparece una recta marcada - 50 c/s - que relaciona la potencia y la sección del núcleo que corresponde para un transformador que trabaja con dicha frecuencia.

Supongamos el caso de desear en el secundario de un transformador un a tensión de 20 Volt con una Intensidad de 3 Amperes, lo que corresponde por supuesto a una potencia de $20 \times 3 = 60$ Watt.

Buscamos en el eje vertical el punto que corresponde a una potencia de 60 Watt y partiendo de dicho punto trazamos una recta horizontal hasta cortar la diagonal 50 c/s.

Desde ese punto de «corte», bajamos una vertical hasta cortar el eje horizontal, quedando de esta manera perfectamente aclarado que la sección del núcleo debe ser de 8 cm^2 .

Ahora bien: ¿cómo formar el núcleo para que su sección sea de 8 cm^2 ? Sabemos que el núcleo está formado por chapas cuya forma responde a los distintos tipos de transformadores, la más empleada en los pequeña potencia como en el caso que nos ocupa, es la mostrada en la figura 25, se la denomina E-I por el parecido que se mantiene con dichas vocales.

De acuerdo al valor de sección indicado por el ábaco, pueden utilizarse chapas con las dimensiones indicadas en la figura 26 ya que el ancho del núcleo por la altura de chapas de justamente el valor buscado, o sea,

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

NÚMERO DE ESPIRAS EN EL PRIMARIO Y EN EL SECUNDARIO

Para determinar el número de espiras en el primario y en el secundario acudimos al ábaco que ilustra la figura 26. En el eje vertical tenemos las secciones en cm^2 , mientras que en el eje horizontal se indica el número de espiras por Volt de acuerdo a la inducción magnética (expresada en Gauss) y una frecuencia de 50 c/s.

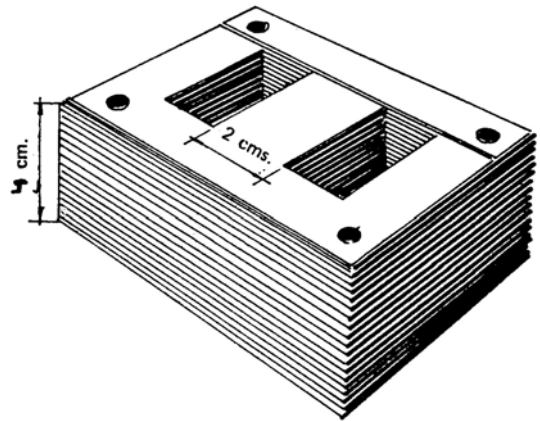


FIGURA 25 - CHAPAS CON FORMA E I DISPUESTAS PARA FORMAR UNA «M» NÚCLEO DE 8 cm^2 DE SECCIÓN.

Con referencia a la inducción, aclaramos que salvo indicación en contrario, se toman valores comprendidos entre 10000 y 11000 Gauss por cm^2 .

Para los valores de nuestro ejemplo, partimos desde el punto marcado 8 en el eje vertical hasta llegar a la recta (inclinada) de 1000 Gauss, en ese punto trazamos una perpendicular que corta al eje horizontal en un valor de 5,5; por lo tanto nuestro transformador debe mantenerse en la proporción de 5,5 espiras por volt, en esa forma tenemos, suponiendo que trabajamos con una tensión de 220 Volt

$$\begin{aligned} \text{espiras del primario} &= 220 \times 5,5 = 1250 \text{ espiras} \\ \text{espiras del secundario} &= 20 \times 5,5 = 110 \text{ espiras} \end{aligned}$$

DIÁMETRO DEL ALAMBRE EN EL PRIMARIO Y SECUNDARIO

Para conocer el diámetro del alambre a utilizar en el primario y el secundario, utilizamos el ábaco que ilustra la figura 27; en el eje horizontal encontramos la escala de Intensidad en Amper y en el eje vertical, el diámetro del alambre de cobre a utilizar. Puede notarse que el ábaco contiene dos rectas paralelas inclinadas, por lo tanto, para cada valor de Intensidad, encontramos dos diámetros distintos. Debe entenderse que serán aceptables los valores comprendidos entre los dos extremos, siendo siempre conveniente elegir el mayor para evitar recalentamiento de los arrollamientos.

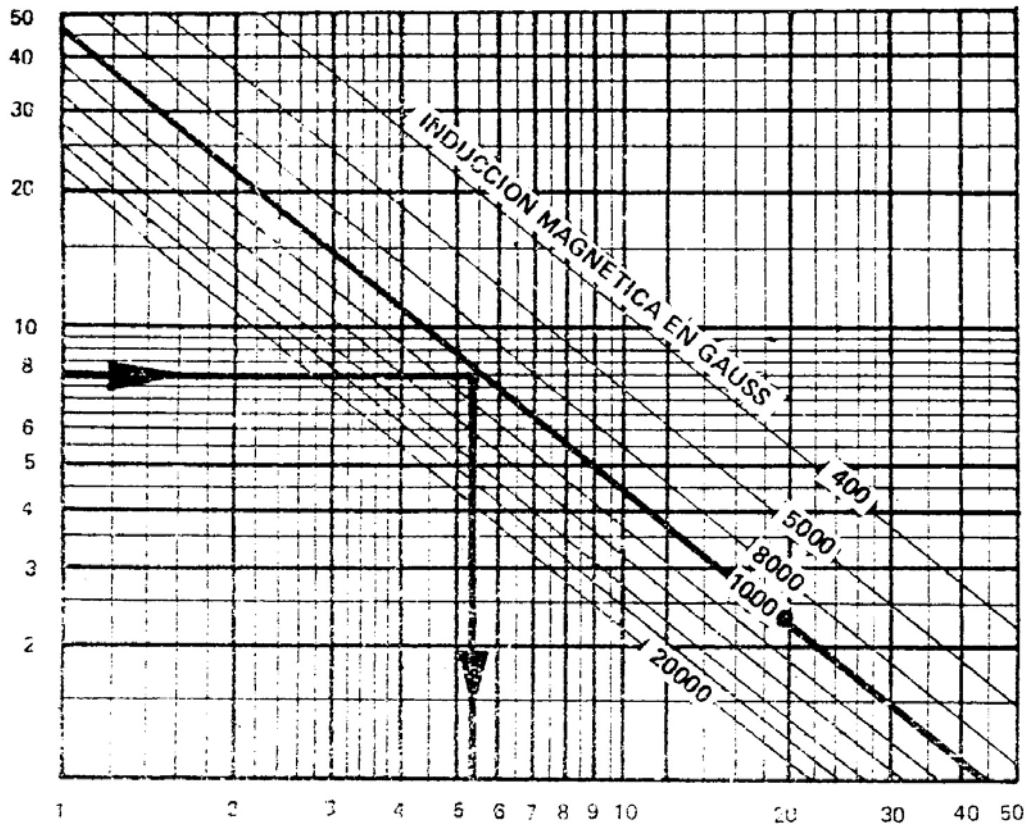


FIGURA 26 - ABACO DE ESPIRAS POR VOLT.

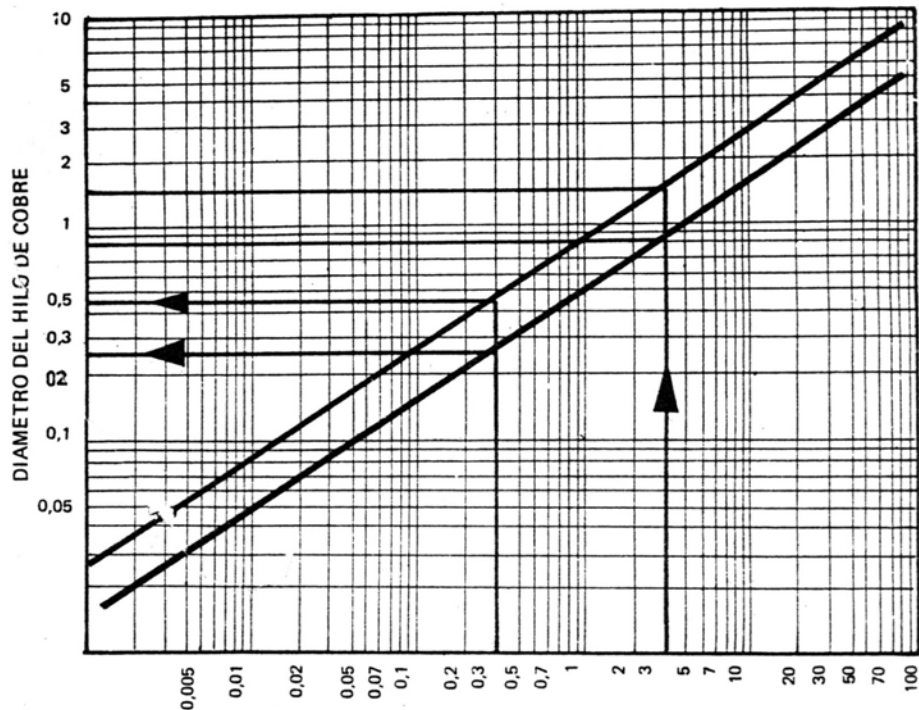


FIGURA 27 - ABACO DE DIAMETRO DE ALAMBRE.

Así en nuestro caso, para 3 Amper en el secundario el diámetro estaría comprendido entre 0,7 mm y 1,5 mm. Con respecto al primario, la intensidad se calcula fácilmente dividiendo la potencia secundaria por la tensión en el primario, o sea, $60/220 = 0,27$ A.

Tomando un valor de Intensidad primaria de 0,3 A, vemos que el ábaco determina aproximadamente valores comprendidos entre 0,28 y 0,45 mm.

EJERCICIOS DE AUTOEVALUACION BOBINADOS

1) Un transformador trabaja con corriente

- a) Continua. ()
- b) Alterna. ()

2) Cuando el secundario tiene más espiras que el primario, el transformador es

- a) Elevador de tensión. ()
- b) Reductor de tensión. ()

3) Si el primario y el secundario de un transformador tiene igual número de espiras la tensión del secundario será

- a) Mayor que la del primario. ()
- b) Menor que la del primario. ()
- c) Igual que la del primario. ()

4) Cuando el transformador es elevador de tensión, la corriente en el secundario será:

- a) Mayor que la del primario. ()
- b) Menor que la del primario. ()
- c) Igual que la del primario. ()

5) En un transformador elevador de tensión, la potencia secundaria sin considerar las pérdidas

- a) Es mayor que la potencia primaria. ()
- b) Es igual que la del primario. ()

6) Los auto transformadores tienen la propiedad de

- a) Presentar aislación eléctrica entre primario y secundario. ()
- a) No presentar aislación eléctrica entre primario y secundario. ()

EJERCICIOS DE AUTOEVALUACION
BOBINADOS
RESPUESTAS

1 - B

2 - A

3 - C

4 - B

5 - B

6 - A