



## **Tema 5**

### **Transformadores y autotransformadores**



## TEMA 5

# Transformadores y autotransformadores, ensayos en vacío y verificación

## Índice

1. Aplicación de los transformadores	1
2. Principio de funcionamiento de un transformador	3
3. Constitución general de un transformador	4
4. Sentido de arrollamiento	10
5. Transformadores trifásicos	12
6. Circuitos magnéticos de transformadores trifásicos	12
7. Conexión de transformadores trifásicos	13
8. Formación de un banco trifásico	16
9. Grupo de conexiones	19
10. Comprobación de transformadores	19
11. Autotransformadores	21
12. Constitución general de un autotransformador	24
13. Testeo y verificación de transformadores	26
14. Bornes correspondientes de un transformador monofásico	27
15. Acoplamiento en paralelo de transformadores monofásicos	29
16. Comprobación experimental antes de la puesta en servicio	30
17. Ensayo para determinar la posibilidad de acoplamiento en paralelo de transformadores trifásicos	31
18. Ensayo en vacío	33
19. Ensayos en carga	36
20. Diagrama vectorial de Kapp	39
21. Dispositivo de regulación de tensión	44
22. Rendimiento del transformador	45
23. Chapa de características de los transformadores	46

## TEMA 5

## Transformadores y autotransformadores, ensayos en vacío y verificación

### 1. APLICACIÓN DE LOS TRANSFORMADORES

Los transformadores estáticos son máquinas eléctricas que permiten **modificar los factores de la potencia, tensión e intensidad de corriente**, con el fin práctico de que éstos tomen los valores mas adecuados para el transporte y distribución de la energía eléctrica, pero sin cambiar su forma.

La utilidad práctica de los transformadores estáticos se deriva de la **economía resultante al efectuar el transporte de la energía eléctrica** a tensiones elevadas en razón a que la sección de conductor necesaria en una línea es inversamente proporcional al cuadrado del valor de la tensión adoptada para el transporte de la electricidad.

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{V_2^2}{V_1^2}$$

---

Expresión que dice: «**la sección** y por tanto el peso del conductor necesario en una línea, para transmitir una determinada potencia eléctrica, **está en razón inversa del cuadrado de la tensión** empleada para el transporte».

---

Este razonamiento explica la conveniencia del empleo de muy elevadas tensiones en el transporte de la energía eléctrica. Ahora bien, en los generadores se presentan fuertes inconvenientes para obtener f. e. ms. elevadas por ser difícil conseguir aislamientos seguros. Por esta razón, en corriente alterna **resulta más práctico generar en el alternador una tensión de 6.000 a 13.000 voltios y elevarla luego en un transformador al valor deseado para el transporte.**

El empleo de transformadores estáticos resuelve también un segundo problema, cual es el que se presenta en los lugares de utilización de la energía eléctrica. Los receptores eléctricos deben trabajar a tensiones bajas, de acuerdo con lo reglamentado oficialmente. Ello exige que **las tensiones elevadas empleadas en el transporte de la electricidad sean rebajadas a valores no peligrosos para las personas** encargadas de manejar los aparatos eléctricos.

Según su función, los transformadores pueden ser de dos tipos distintos:

- < **Elevadores.** Son transformadores colocados en las centrales productoras de energía eléctrica, cuya función consiste en **eleva la tensión generada en el alternador** hasta el valor deseado para el transporte. En la figura 1 el transformador **T<sub>1</sub>** eleva la tensión de 6.600 a **132.000** voltios.

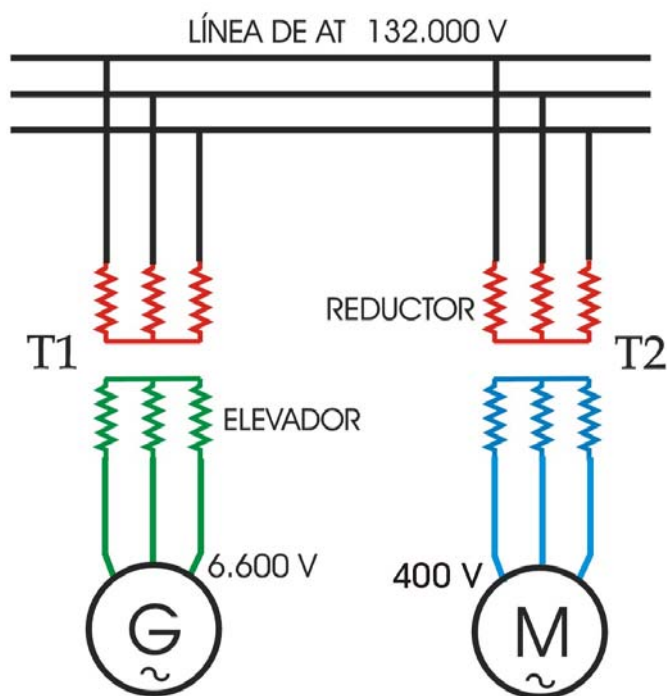


Figura 1 ESQUEMA DE TRANSPORTE DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA

- < **Reductores.** Son transformadores colocados en los lugares de utilización de la energía eléctrica, cuya función consiste en **reducir la tensión de la red a un valor aceptable para su empleo práctico**. En la figura 1 el transformador **T<sub>2</sub>** reduce la tensión de 132.000 a **400 voltios**. En la práctica, la reducción total desde la tensión de transporte hasta la de utilización se efectúa en escalones de tensión intermedios, mediante sucesivos transformadores reductores.

## 2. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE UN TRANSFORMADOR

Para adquirir una idea clara del funcionamiento de un transformador estático, vease la construcción más elemental. Sea (figura 2) un circuito magnético simple, constituido por dos columnas y dos culatas, en el que han sido arrollados dos circuitos eléctricos: uno, constituido por una bobina de  $N_1$  espiras, es conectado a la fuente de energía eléctrica de corriente alterna y recibe el nombre de **bobinado primario**. Un segundo bobinado, llamado **secundario**, constituido por  $N_2$  espiras, permite conectar a sus dos extremos libres a un circuito eléctrico de utilización, al que cede la energía eléctrica absorbida por el bobinado primario.

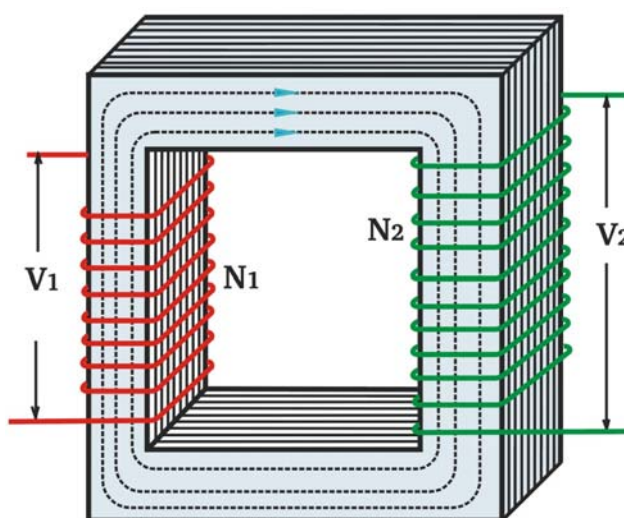


Figura 2 TRANSFORMADOR MONOFÁSICO

En primer lugar, se deduce que **un transformador puede ser considerado, desde el punto de vista del bobinado primario, como un receptor de corriente**, mientras que **desde el lado del bobinado secundario es un verdadero generador eléctrico**.

El efecto combinado de **ambos bobinados recorridos por sus respectivas corrientes, determina una fuerza magnetomotriz que da lugar a que se establezca un flujo de líneas de fuerza alterno senoidal en el circuito magnético del transformador**.

Este flujo, que es común para los dos bobinados, sirve para transmitir la energía eléctrica de uno a otro. Por otra parte, **por ser un flujo variable, hace que en ambos bobinados, se genere una fuerza electromotriz inducida**. Ahora bien, **la f. e. m. generada en el bobinado primario, al igual que en un motor, es una verdadera fuerza contraelectromotriz**, mientras que la que se genera en el bobinado secundario es aprovechada en el circuito exterior de utilización.

### 3. CONSTITUCIÓN GENERAL DE UN TRANSFORMADOR

#### Circuito magnético

- < **Núcleo.** En los circuitos magnéticos de los transformadores se emplea **chapa magnética extra-superior con alta proporción de silicio (2 al 4 %) y pérdidas por histéresis muy bajas**. Por otra parte, al objeto de reducir las pérdidas por corrientes parásitas, la chapa magnética es **de 0,35 mm. de espesor**, siendo **esmaltada cuidadosamente con un barniz especial**.
- < **Sección de hierro neta.** Por dos motivos distintos: uno el esmaltado de las chapas y otro el apilado de todas las que constituyen el núcleo, la sección útil de hierro para el paso de las líneas de fuerza resulta menor que la sección geométrica del núcleo. Se admite que **la sección neta  $S_n$  ofrecida al paso de las líneas de fuerza es el 86 % de la sección geométrica  $S_g$  del núcleo**. Así, pues, se puede poner la expresión

$$S_n = 0,86 S_g$$

**Formas del circuito magnético.** Desde el punto de vista de la forma del circuito magnético, los transformadores monofásicos pueden ser de dos clases: **de columnas** y **acorazados**.

- < **De columnas** o de circuito magnético simple (figura 3) es el formado por **dos columnas iguales y dos culatas**. En cada columna va arrollada **la mitad de las espiras de cada bobinado**, tanto de alta como de baja tensión.

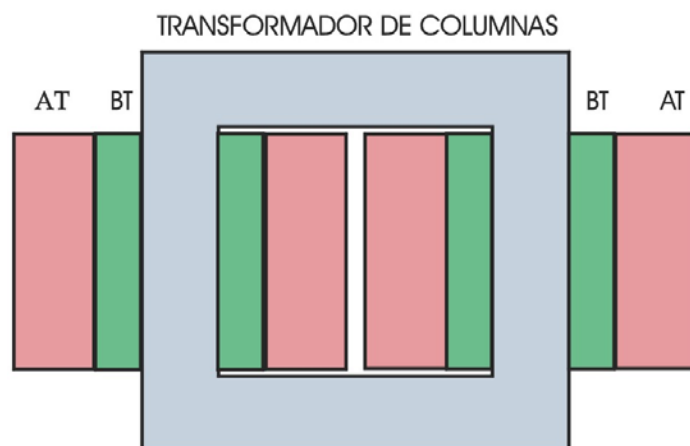


Figura 3 TRANSFORMADOR SIMPLE O DE COLUMNAS

- < **Acorazado** o de circuito magnético doble (figura 4) es el formado por **dos culatas** y **tres columnas**. **La columna central tiene doble sección de hierro que las dos laterales**, para que así resulte igual la inducción, ya que en la columna central se establece el flujo total del transformador, mientras que en **las laterales sólo existe la mitad de ese flujo total**.

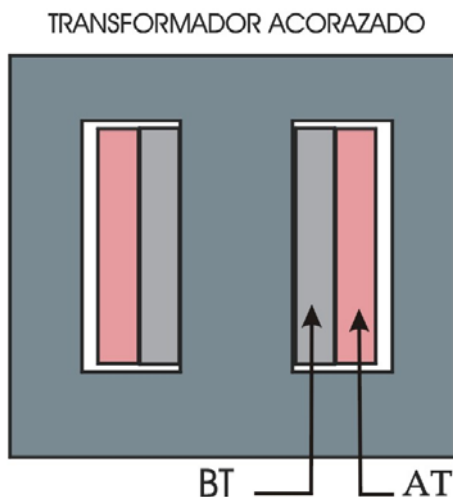


Figura 4 TRANSFORMADOR DOBLE O ACORAZADO

En estos transformadores los dos bobinados tienen **todas sus espiras arrolladas en la columna central**. Los transformadores acorazados son de aplicación muy limitada, **sólo para muy pequeñas potencias**, empleándose casi exclusivamente en radio y aplicaciones similares.

- < **Disposición de las columnas**. Las columnas de los transformadores pequeños (hasta **50 KVA**) son construidas de sección transversal rectangular (figura 5).



Figura 5 NÚCLEO DE TRANSFORMADOR RECTANGULAR

En cambio, en **los transformadores de más potencia**, conviene aprovechar todo lo posible los materiales activos, lo que se consigue activando hasta el máximo la refrigeración del circuito magnético. Con este objeto, se adopta en las columnas secciones transversales de **perímetro escalonado** (figura 6), construcción que aumenta la superficie del núcleo en contacto con el medio refrigerante.

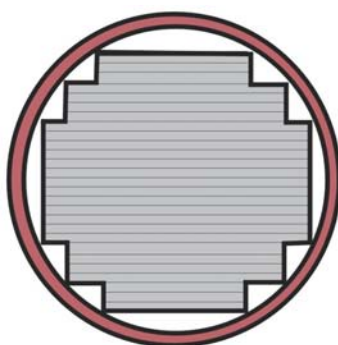


Figura 6 NÚCLEO DE TRANSFORMADOR ESCALONADO

Con transformadores de muy elevada potencia es preciso aumentar aún más la **superficie de refrigeración del núcleo**, por lo que, además de adoptar columnas escalonadas, se dejan canales de ventilación en la masa de los núcleos (figura 7).



Figura 7 NÚCLEO DE TRANSFORMADOR CON CANALES DE REFRIGERACIÓN

< **Juntas entre columnas y culatas.** Las juntas entre columnas y culatas pueden ser ejecutadas de dos maneras distintas: **a tope** y **encajadas**.

La **junta a tope** se obtiene por simple contacto de ambas partes. Siendo importante disminuir la reluctancia del circuito magnético, es preciso alisar perfectamente las superficies de contacto. A pesar de que **tienen la gran ventaja de facilitar el desmontaje y reparación de los bobinados**, en la práctica está casi totalmente abandonada esta clase de junta.



La **junta encajada** se realiza **entrelazando las chapas de las columnas y culatas**, para lo cual se forman paquetes (cada uno constituido por tres o cuatro chapas), que se disponen alternativamente en las posiciones indicadas por la figura 8. Esta forma de realizar las juntas **es la adoptada generalmente**, debido a que reduce la reluctancia del circuito magnético y **permite una sujeción más perfecta del conjunto** del mismo.

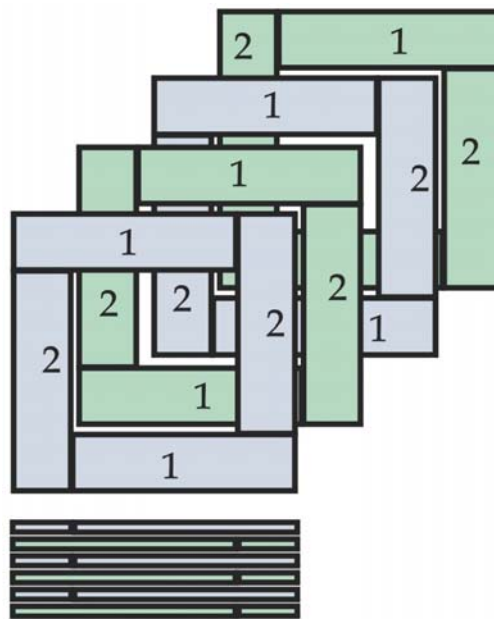


Figura 8 DISPOSICIÓN ENCAJADA DE LAS CHAPAS

- < **Aprieto del núcleo.** Los núcleos magnéticos deben ser rígidamente sujetos. En los transformadores pequeños la sujeción de las columnas se efectúa arrollando varias capas de cinta de algodón. En los núcleos más grandes se efectúa el aprieto de las columnas mediante espárragos **E** de acero roscados y tuercas **T** (figura 9).

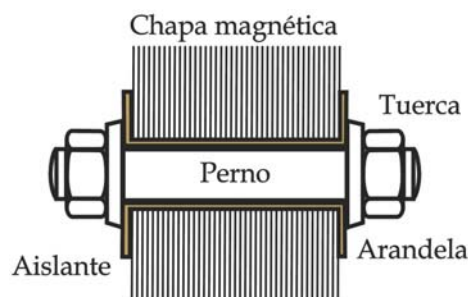


Figura 9 APRIETE DEL NÚCLEO DE UN TRANSFORMADOR

A fin de evitar que los espárragos y las chapas en contacto con ellos formen circuitos cerrados, en los que se generarían f. e. ms. que darían lugar a corrientes de circulación en chapas y espárragos, es necesario **aislar estos tornillos cuidadosamente**, para lo cual van enfundados en un tubo de papel baquelizado. Además, arandelas del mismo material o de **cartón presspan** separan las chapas de las arandelas de acero sobre las que se apoyan las tuercas.

### Circuitos eléctricos

Los dos circuitos eléctricos de un transformador, tanto el primario como el secundario, ejercen funciones similares y **la construcción de ambos es esencialmente igual**.

Los transformadores monofásicos acorazados van provistos de una sola bobina por cada circuito eléctrico, estando colocadas **las dos bobinas de la máquina en la columna central** del circuito magnético.

En los transformadores monofásicos de circuito magnético simple, ambos circuitos eléctricos, tanto el primario como el secundario, están divididos en dos partes iguales, cada una de las cuales contiene la mitad del número de espiras del circuito. En cada columna del circuito magnético se dispone una de las dos mitades de cada bobinado.

La disposición de las bobinas de bobinados primario y secundario de una misma columna puede ser efectuada de dos maneras diferentes: **concéntrica** y **alternada**.

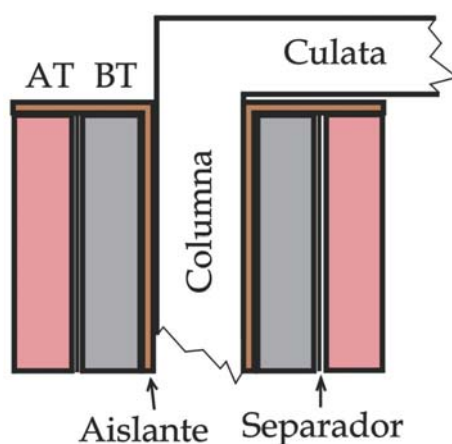


Figura 10 BOBINADOS CONCÉNTRICOS

- < **La disposición Concéntrica**, que es **la más empleada**, consiste en colocar concéntricamente las dos bobinas correspondientes a una misma columna (figura 10). Al objeto de dar seguridad al aislamiento, **la bobina de baja tensión es colocada junto al núcleo de hierro** y exterior a ella, y separada por un cartón aislante, va dispuesta la bobina de alta tensión.

Esta disposición ofrece además una apreciable ventaja cuando hay que reparar **el bobinado de AT**, que **es el más propenso a averías**.

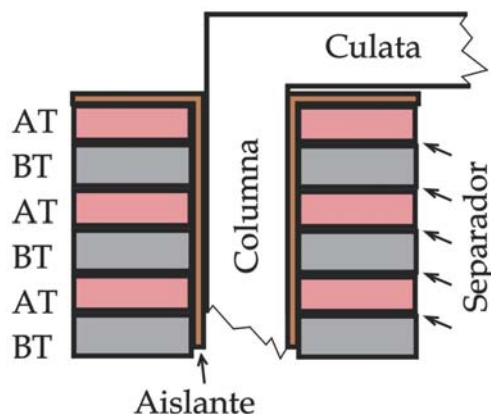


Figura 11 BOBINADO ALTERNADOS DE PRIMARIO Y SECUNDARIO

- < **La disposición alternada** de los bobinados **se emplea raramente, sólo en transformadores de muy elevada potencia** y fuertes corrientes. En esta disposición se subdivide cada bobinado en varias bobinas parciales que tienen forma de disco y se colocan alternativamente a lo largo de cada columna (figura 11), separando las de alta y baja tensión mediante arandelas de papel baquelizado. Por otra parte, **con el fin de dar más seguridad al conjunto del bobinado, se hace que las dos bobinas elementales situadas en los extremos de la columna sean de baja tensión**, para lo cual llevan éstas la mitad del número de espiras que las otras bobinas del mismo bobinado de BT.

### Construcción de bobinas

Las bobinas de transformadores se construyen aparte. Su ejecución ha de ser muy cuidadosa, procurando que resulten de **elevada rigidez dieléctrica y gran solidez mecánica**. Para conseguir estos resultados se arrollan las espiras sobre tubos de papel baquelizado.

Generalmente, la bobina de alta tensión contiene un elevado número de espiras, por lo que **se subdivide en varias bobinas elementales de poca altura**. Esta subdivisión hace que **la tensión entre dos capas de espiras consecutivas se mantenga dentro de un valor prudencial**.

En algunos casos en que el bobinado llamado de baja tensión es también de tensión elevada, se construye como los de alta tensión, dividiendo cada bobina en varias bobinas elementales.

En cambio, **cuando el bobinado de baja tensión tiene pocas espiras, el conductor empleado es de gran sección, y para formar la bobina se arrolla de manera continua de principio a fin de cada capa.**

### Sujeción de los bobinados

Entre las espiras de los bobinados de un transformador **se desarrollan esfuerzos mecánicos de repulsión** tanto en sentido radial como axial, cuando aquéllas son recorridas por corrientes eléctricas.

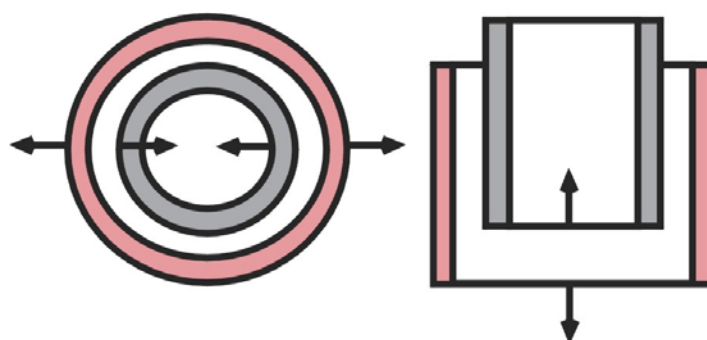


Figura 12 ESFUERZOS DE REPULSIÓN ENTRE BOBINADOS

Estos esfuerzos alcanzan valores considerables con las corrientes de plena carga y serían peligrosísimos en el caso de producirse un corto circuito en el bobinado secundario.

Los esfuerzos mecánicos de repulsión entre bobinados tienen dos sentidos, uno radial y otro axial. En la figura 12 se indica el sentido de las fuerzas radiales, y las axiales, que desarrollan un esfuerzo de tracción en los conductores de la bobina exterior y otro de compresión sobre el tubo aislante del bobinado interior, al mismo tiempo, aparecen los sentidos de las fuerzas axiales, las cuales tienden a desplazar los bobinados.

Los esfuerzos axiales son muy peligrosos, y para evitar sus perjudiciales efectos es necesario sujetar de manera eficaz las bobinas, **disponiendo tacos de madera entre bobinas** por un lado y culatas y **bridas de sujeción** por otro.

## 4. SENTIDO DE ARROLLAMIENTO

Para el estudio de los transformadores resulta muy interesante conocer el sentido de arrollamiento de las bobinas, el cual depende de la manera como hayan sido arrolladas las espiras al ser ejecutadas las bobinas en el torno de bobinar.

En **un torno de bobinar** (figura 13), se toman como referencias el plato y el punto; por otra parte, el sentido de giro del torno es siempre el de las agujas del reloj mirando del punto al plato, y el mandril sobre el cual se arrollan las espiras del bobinado queda sujeto entre el punto y las mordazas del plato.

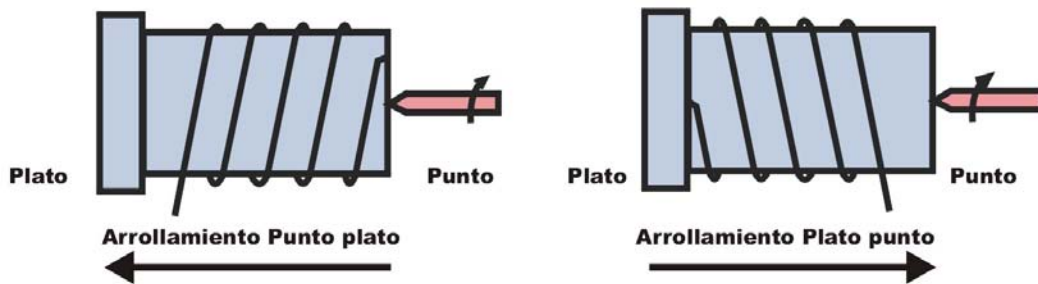


Figura 13 SENTIDO DE ARROLLAMIENTO DE LA BOBINA

La primera bobina resulta de **punto a plato**, si al construirla, la primera espira que se arrolla sobre el mandril es la más próxima al punto, avanzando luego el arrollamiento hacia el plato (figura 13).

Cuando la bobina resulta de **plato al punto**, si al construirla, la primera espira que se arrolla sobre el mandril es la más cercana al plato y luego avanza el arrollamiento hacia el punto (figura 13).

En una bobina ya construida se determina con gran facilidad el sentido del arrollamiento. Para ello es suficiente observar la inclinación de las espiras. Cuando la bobina es de «**plato a punto**», **la inclinación hacia abajo de las espiras va de derecha a izquierda** (figura 14), mientras que si la bobina es de «**punto a plato**» la **inclinación hacia abajo es de izquierda a derecha**.

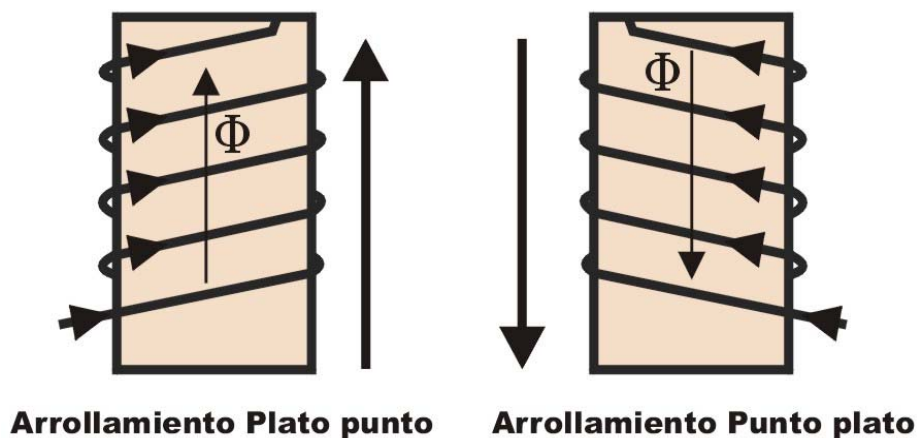


Figura 14 SENTIDO DEL ARROLLAMIENTO

Es evidente que en una bobina **el sentido del flujo resultante depende de la forma en que ha sido arrollada**, lo que puede ser comprobado en las figuras 14, en las que a pesar de que la corriente se mantiene constante, avanzando del punto al plato, resulta que **cuando la bobina es de “plato a punto” el sentido del flujo va de “punto a plato”** y en cambio, **cuando la bobina es de “punto a plato” el flujo avanza del “plato al punto”**.

## 5. TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS

La teoría de funcionamiento, expuesta el párrafo 4, es aplicable tanto para los transformadores monofásicos como para los polifásicos, ya que **el estudio de un sistema polifásico se reduce al de una fase repetido tantas veces como fases tenga el sistema**. Así, pues, a un transformador polifásico le son aplicables las leyes y fórmulas deducidas para los monofásicos, teniendo cuidado de efectuar los cálculos con los valores correspondientes a una fase.

Ahora bien, en el estudio de los transformadores polifásicos aparecen nuevos problemas debidos a la presencia de varias fases relacionadas entre sí, los cuales van a ser estudiados a continuación.

En primer lugar, es evidente que **se puede conseguir una transformación polifásica empleando tantos transformadores monofásicos iguales**, como fases tenga el sistema (ver párrafo 8).

## 6. CIRCUITOS MAGNÉTICOS DE TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS

El circuito magnético de los transformadores trifásicos es construido de **tres columnas de igual sección, reunidas por dos culatas iguales**, una superior y otra inferior (figura 15 y 16). **En cada columna se dispone una frase completa de los bobinados primario y secundario**, de manera que en ella se transforma la tercera parte de la potencia total del transformador.

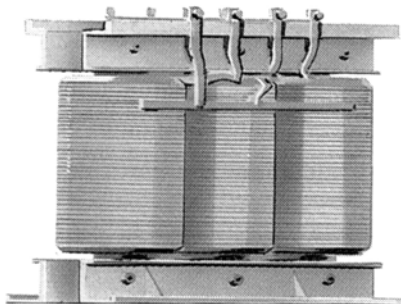


Figura 15 VISTA DE TRANSFORMADOR TRIFÁSICO

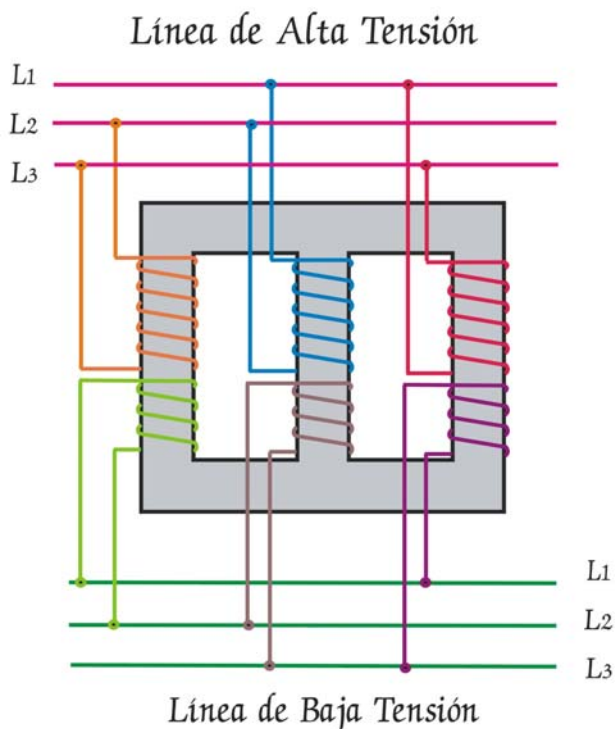


Figura 16 ESQUEMA DE TRANSFORMADOR TRIFÁSICO

## 7. CONEXIONADO DE TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS

### Conexión de las fases y relación de transformación

Las tres fases de cada bobinado, tanto del primario como del secundario, pueden ser conectadas entre sí, bien **en estrella**, bien **en triángulo**, dando lugar a distintas clases de transformadores. Además, en algunos casos se conectan las tres fases de un bobinado formando la conexión conocida con el nombre de **zigzag**. Dividiendo la tensión entre fases del primario, entre la tensión entre fases del secundario se obtiene una cantidad ( $m$ ) a la que se le da el nombre de **relación de transformación**.

$$m = \frac{V_1}{V_2}$$

**En un transformador se conoce con el nombre de relación de transformación compuesta al cociente que resulta de dividir los valores de las tensiones de las líneas primaria  $V_1$  y secundaria  $V_2$  cuando el transformador funciona en vacío.**



### Transformador triángulo/triángulo

Para esta clase de transformador trifásico, las tres fases, tanto del bobinado primario como del secundario, están conectadas en triángulo (figura 17). Esta conexión se expresa abreviadamente por el símbolo que aparece junto a la figura.

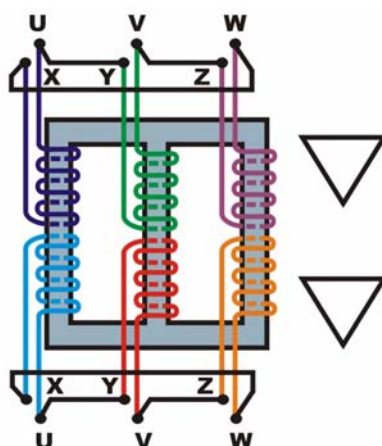


Figura 17 TRANSFORMADOR TRIÁNGULO-TRIÁNGULO

### Transformador estrella/estrella

En esta clase de transformador trifásico, las tres fases de ambos bobinados están conectadas en estrella (figura 18). Esta conexión se expresa abreviadamente por el símbolo que aparece junto a la figura.

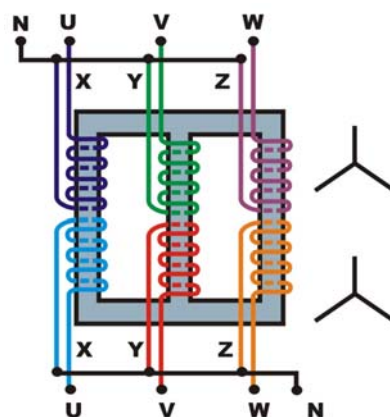


Figura 18 TRANSFORMADOR ESTRELLA-ESTRELLA

La conexión estrella se utiliza cuando la línea tiene neutro, el neutro se emplea siempre en baja tensión; mientras que, en alta tensión, se usa poco, ya que ahorrar un conductor supone en una línea de alta tensión un ahorro muy importante, debido a que, generalmente, las líneas de alta tensión tienen muchos kilómetros de largo.



### Transformador triángulo/estrella.

En esta clase de transformador trifásico, las tres fases del bobinado primario están conectadas en triángulo, mientras que las tres fases del bobinado secundario lo están en estrella (figura 19). Esta conexión es expresada abreviadamente por el símbolo junto a la figura

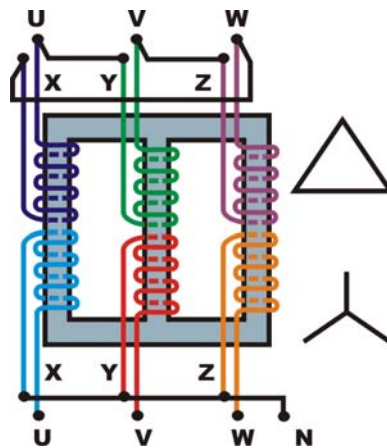


Figura 19 TRANSFORMADOR TRIÁNGULO-ESTRELLA

### Transformador estrella/triángulo

En el transformador estrella/triángulo, las tres fases del bobinado primario están conectadas en estrella, mientras que las tres fases del bobinado secundario lo están en triángulo (figura 20). Esta conexión es expresada abreviadamente por el símbolo que aparece junto a la figura

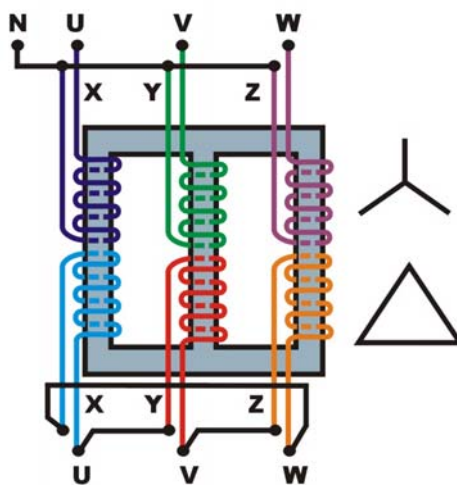


Figura 20 TRANSFORMADOR ESTRELLA-TRIÁNGULO

## 8. FORMACIÓN DE UN BANCO TRIFÁSICO

Recibe el nombre de **banco trifásico** al conjunto formado por tres transformadores monofásicos exactamente iguales, conectados entre sí de forma tal que sea posible la transformación de un sistema trifásico de tensiones (figura 21).

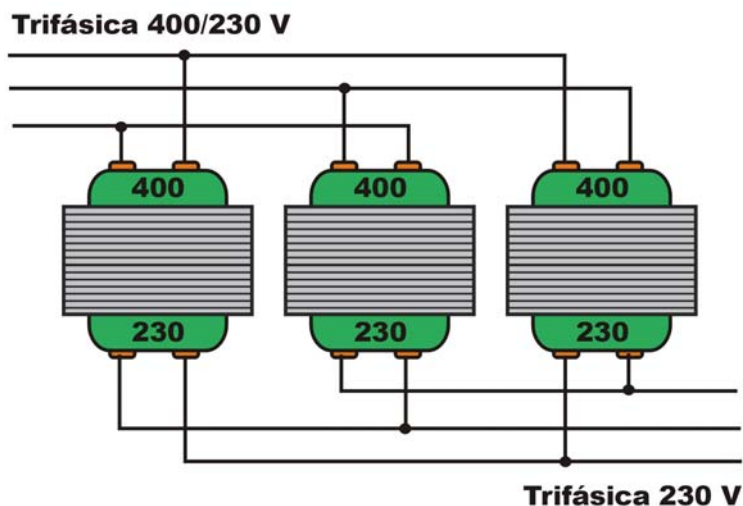


Figura 21 CONEXIÓN TRIFÁSICA DE TRES TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS

El acoplamiento de los bobinados primarios por una parte y de los secundarios por la otra de los tres transformadores monofásicos componentes puede ser ejecutado en triángulo o en estrella, lo que indica que un banco trifásico puede presentar cualquiera de las cuatro formas de conexión que se acaban de describir para los transformadores trifásicos. Todas las conexiones trifásicas menos en zigzag

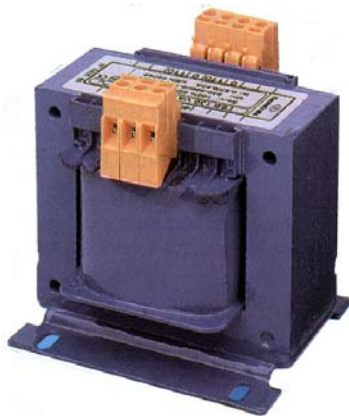


Figura 22 TRANSFORMADOR MONOFÁSICO DE PEQUEÑA POTENCIA

### Transformador estrella/zigzag

Se obtiene una nueva forma de transformador trifásico conectando las tres fases del bobinado secundario de una manera especial conocida con el nombre de *zigzag* (figura 23). Esta conexión está representada abreviadamente por el símbolo que aparece junto a la figura.

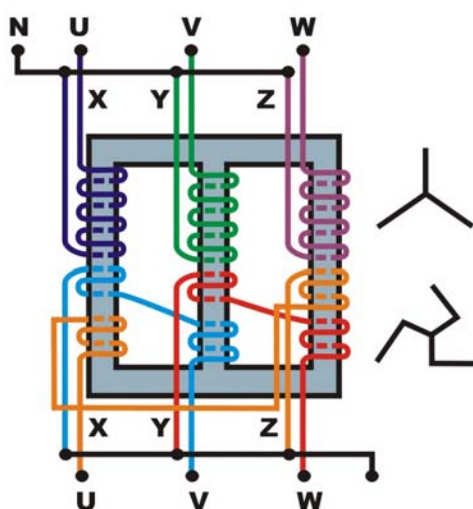


Figura 23 TRANSFORMADOR ESTRELLA-ZIGZAG

### Comparación de las conexiones trifásicas

Es muy distinta la manera de comportarse de los diferentes transformadores trifásicos ante un desequilibrio eléctrico de la red secundaria.

En las redes secundarias de distribución **para fuerza y alumbrado exigen cuatro hilos, tres activos y uno neutro**, lo que obliga a que el transformador tenga su bobinado secundario conectado **en estrella o en zigzag**, con punto neutro accesible.

Por otra parte, es conveniente en los transformadores de distribución, cuyo bobinado **secundario está conectado en estrella con neutro** accesible, que el **bobinado primario esté conectado en triángulo**, ya que de esta manera cualquier **desequilibrio de corrientes en un conductor activo de la red secundaria repercute sobre dos conductores de la red primaria**, lo que no ocurriría si el transformador fuera estrella/estrella.

En cambio, **en un transformador triángulo/estrella**, el **desequilibrio debido a la sobrecarga de una fase repercute sobre los dos hilos de la red primaria que corresponde a la secundaria**, quedando así repartido en parte el desequilibrio de corrientes.

### Transformador estrella/zigzag

Con **la conexión zigzag** al estar descompuesta cada fase del bobinado secundario en dos mitades, y colocadas en columnas sucesivas del núcleo magnético y arrolladas en sentido inverso, **un exceso de corriente en una fase del bobinado secundario repercute en directamente dos fases del bobinado primario**. Así, pues, en esta forma de transformador se consigue la misma ventaja que en la conexión triángulo/estrella, pero se conserva la disposición estrella para el primario, que mejora la forma de la curva senoidal.

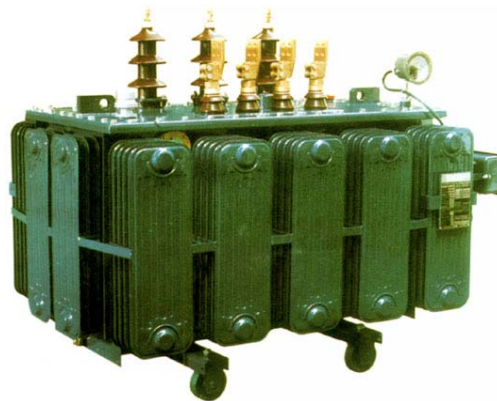


Figura 24 TRANSFORMADOR TRIFÁSICO DE ALTA TENSIÓN



Figura 25 TRANSFORMADOR TRIFÁSICO DE BAJA TENSIÓN

## 9. GRUPO DE CONEXIONES

De las distintas formas que pueden conectarse los transformadores las seis formas principales se denominan según se especifica en la tabla siguiente:

Grupo de conexión	Gráfico de conexiones	Relación de Transformación	Grupo de conexión	Gráfico de conexiones	Relación de Transformación
Yy0		$\frac{N_1}{N_2}$	Yz5		$\frac{2N_1}{\sqrt{3} N_2}$
Dy5		$\frac{N_1}{\sqrt{3} N_2}$	Yy6		$\frac{N_1}{N_2}$
Yd5		$\frac{\sqrt{3} N_1}{N_2}$	Dy11		$\frac{N_1}{\sqrt{3} N_2}$

Tabla I GRUPO DE CONEXIONES PARA TRANSFORMADORES

## 10. COMPROBACIÓN DE TRANSFORMADORES

### ACOPLAMIENTO EN PARALELO DE TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS

La conexión en paralelo de transformadores trifásicos (o de bancos trifásicos) presenta determinados problemas. Para poder efectuar el acoplamiento en paralelo de transformadores trifásicos, es preciso que se cumplan las siguientes condiciones:

- < **Las tensiones secundarias de los distintos transformadores funcionando en vacío deben ser iguales**, lo que exige que tengan la misma relación de transformación compuesta.
- < **Las caídas de tensión relativas de los distintos transformadores deben ser aproximadamente iguales**, lo que exige que las tensiones de cortocircuito no se diferencien en más de un 10 % del valor más pequeño. De no cumplirse esta condición, no será correcto el reparto de la carga.
- < **Los desfases de las tensiones secundarias respecto de la tensión de la línea de alimentación han de ser iguales** en todos los transformadores.
- < **El sentido de rotación de los vectores de las tensiones secundarias ha de ser el mismo en todos los transformadores.**

Las **dos últimas condiciones son esencialmente eliminatorias**, ya que de no cumplirse no es posible efectuar el acoplamiento en paralelo de los transformadores. En cuanto a la primera y segunda condición son necesarias para asegurar el buen funcionamiento del conjunto de transformadores.

### **Transformadores que pueden ser acoplados en paralelo**

No todos los transformadores trifásicos pueden ser acoplados en paralelo entre sí. **En principio, sólo es posible conseguir tal fin con aquellos que pertenecen a un mismo grupo de conexión**, aunque también pueden ser acoplados en paralelo transformadores pertenecientes a distintos grupos de conexión si previamente han sido preparados de manera adecuada.

### **Ensayo para determinar la posibilidad de acoplamiento en paralelo**

Antes de acoplar en paralelo dos transformadores trifásicos, conviene hacer el llamado **ensayo de polaridad**. Con él se alcanza la **completa seguridad de cuáles son las bornes de ambos transformadores que deban ser conectados a un mismo conductor**, tanto de la red primaria como de la secundaria. Este ensayo es fácil de ejecutar, aunque a veces puede exigir un número considerable de medidas de tensión.

Estos ensayos se describen más adelante, en los párrafo 15 y 16 de este mismo tema.



Figura 26 LA FABRICACIÓN DE TRANSFORMADORES DE GRAN POTENCIA EVITA LOS INCONVENIENTES DE LOS TRANSFORMADORES EN PARALELO

## 11. AUTOTRANSFORMADORES

También posible efectuar la transformación de la energía eléctrica mediante *autotransformadores*, máquinas estáticas **de construcción más económica que el transformador**.

En esencia se caracteriza el autotransformador por poseer *un solo circuito eléctrico*, del cual parten cuatro salidas, dos primarias **A** y **B** y dos secundarias **C** y **B** (figura 27). Entre las bornas **A** y **B**, el bobinado tiene  $N_1$  espiras, cuyo número corresponde a la alta tensión.

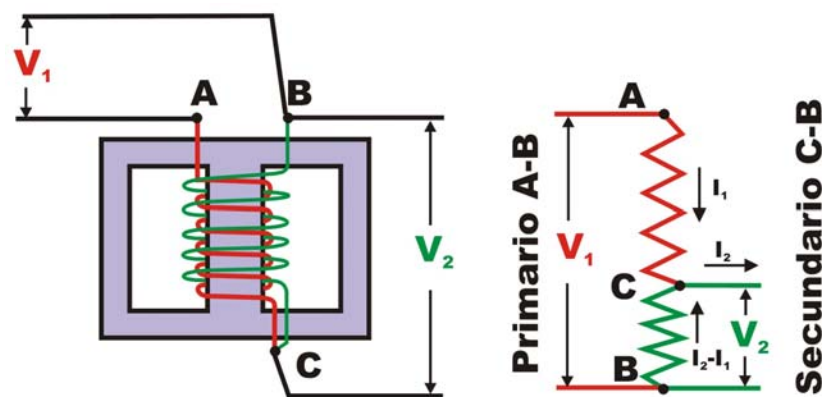


Figura 27 AUTOTRANSFORMADOR

En este bobinado se ha efectuado una derivación en el punto **C** distante,  $N_2$  espiras del extremo **B**, de forma que el trozo **BC** corresponde a la baja tensión. Así pues, en este bobinado se distinguen dos partes distintas, una **CB** común a los circuitos de alta y baja tensión y otra **AC** conectada en serie con la anterior, que pertenece sólo a la alta tensión. Como se verá enseguida, **los conductores que forman estas dos partes son de distinta sección**.

### Funcionamiento en vacío

Un autotransformador funciona en vacío cuando, **estando abierto el circuito secundario, existe la tensión nominal entre las bornas primarias**. Así en el autotransformador monofásico de la figura 27, funciona en vacío y entre las bornas **A-B** existe la tensión  **$V_1$** .

Por el bobinado **circula la corriente de vacío de Intensidad  $i_0$**  pequeña respecto de la corriente de carga, ya que toma solamente **el valor necesario para mantener el flujo en el circuito magnético**.



Al igual que en los transformadores, si se divide la tensión en alta entre la tensión en baja, resulta una cantidad  $m$  que se llama relación de transformación (ver párrafo 7). Dividiendo el número de espiras  $N_1$  del primario entre el número de espiras del secundario  $N_2$  también se obtiene el mismo valor  $m$ .

$$m = \frac{N_1}{N_2}$$

---

Se da el nombre de **relación de transformación de un autotransformador, al cociente de los números de espiras, total y secundario**

---

También es interesante saber que número de **voltios por espira** de un transformador o de un autotransformador:

$$V_{esp.} = \frac{V_1}{N_1} = \frac{V_2}{N_2}$$

### Funcionamiento en carga

Un autotransformador monofásico funciona en carga, cuando se conecta entre las bornas secundarias **B** y **C** un circuito exterior (figura 28). Entonces **el circuito secundario es recorrido por la corriente de carga de valor  $I_2$**  y el autotransformador absorbe de la red primaria una corriente de mayor intensidad que la absorbida en vacío, ya que es preciso que los amperios-vueltas primarios se opongan a los creados por la, corriente secundaria a fin de que resulte constante el valor del flujo.

Al objeto de llegar a conocer el **sentido relativo de las distintas corrientes que existen en un autotransformador** que funciona en carga, es necesario establecer el instante en el cual la carga de un autotransformador tensión  $V_1$  es de sentido tal que el potencial de **A** es mayor que el de **B**, lo que determina que la fuerza electromotriz generada en la bobina tenga el sentido opuesto, es decir, de **B** a **A**.



En cuanto al **sentido de la corriente primaria, en el instante considerado**, que **ha de ser el mismo que el de la tensión aplicada**, viene representado por la flecha  **$I_1$** . Por su parte, **el sentido de la corriente secundaria  $I_2$  es el mismo que el de la fuerza electromotriz**, por serlo también el de la tensión en bornas secundarias. Así pues, **su sentido queda representado por la flecha  $I_2$** .

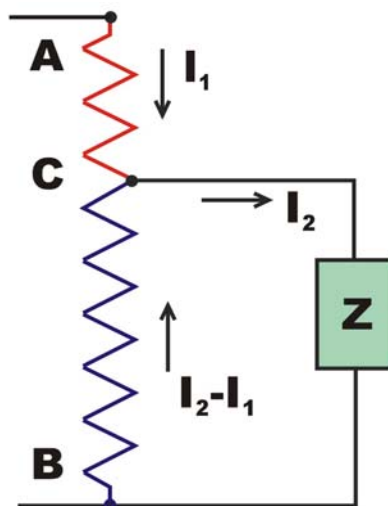


Figura 28 AUTOTRANSFORMADOR EN CARGA

La intensidad de corriente en la parte común ha de ser igual a la diferencia de intensidades de corriente primaria y secundaria, resultado que pone de manifiesto la gran ventaja del autotransformador, consistente en que **la parte común del bobinado puede ser construida con un conductor de sección relativamente pequeña**, ya que por él circula una corriente de intensidad también pequeña.

El sentido de la corriente en la parte común **BC** viene señalado por la flecha  **$I_2 - I_1$** , lo que se hace evidente **teniendo en cuenta que la corriente secundaria  $I_2$  es mayor que la primaria  $I_1$** . En efecto, en carga resultan muy aproximados los amperios-vueltas primarios y secundarios, es decir, que se verifica

$$N_1 \cdot I_1 = N_2 \cdot I_2$$

de donde se deduce que **las intensidades de corriente están en razón inversa que las tensiones** y que **la corriente  $I_2$  es mayor que  $I_1$** .

## 12. CONSTITUCIÓN GENERAL DE UN AUTOTRANSFORMADOR

La construcción de un autotransformador es similar a la de un transformador, pero entre ambas clases de máquinas existe una diferencia esencial derivada de que en **el transformador cada fase tiene dos bobinados independientes**, uno de alta tensión y otro de baja, mientras que en **el autotransformador cada fase dispone de un solo bobinado** con tres bornas de salida.

Aparentemente es difícil apreciar esta diferencia, ya que incluso cada fase del autotransformador está constituida por las dos bobinas independientes que se indican a continuación:

- < **Bobina común** formada por un elevado número de espiras, ya que debe estar calculado para la tensión secundaria,  
**El conductor de la bobina común es de poca sección**, sólo la necesaria para permitir el paso de una corriente, cuya intensidad es igual a la diferencia entre las corrientes secundaria y primaria.
- < **Bobina serie** formada por un **número de espiras  $N_1$  pequeño**, ya que ha de estar prevista para una tensión diferente de las tensiones primaria y secundaria  
**La sección de conductor de la bobina serie ha de ser grande**, ya que queda recorrida por la corriente total absorbida por el autotransformador de la línea de alimentación.

Las dos bobinas, común y serie, van dispuestas concéntricamente en una misma columna, al igual que sí fueran los dos bobinados de un transformador normal (figura 27). **Se acostumbra a colocar en el interior la bobina serie** y al exterior la bobina común, debido a que ésta es más propensa a averías. Las dos bobinas quedan conectadas directamente mediante un puente de conexión **C** que une los dos extremos inferiores de las bobinas. Del conjunto se sacan tres salida, dos de ellas **A** y **B** en los extremos libres de las bobinas y la tercera **C** del puente de conexión.

Obsérvese que **para conseguir el adecuado sentido de las corrientes en las bobinas, es preciso que ambas sean construidas en sentido inverso**, es decir, que **una** es ejecutada **de plato a punto** y la **otra de punto a plato**.

### Ventaja de los Autotransformadores

**La gran ventaja** que se consigue con el empleo de los autotransformadores, que consiste en que **su núcleo es más pequeño que el de un transformador de igual potencia**. Esta ventaja es tanto mayor cuanto más próximos son los valores de las tensiones primaria y secundaria.

### Inconveniente del autotransformador

**El mayor inconveniente** del autotransformador consiste **en el hecho de que ambos circuitos, primario y secundario, tienen un punto común (el puente de conexión)**, lo que entraña la posibilidad de que, por error o avería en la línea de alta tensión, el valor de ésta se comuniqué a la línea de baja tensión, con los peligros subsiguientes, si los aislamientos de la red de baja no están previstos para la alta tensión.

### Autotransformador trifásico

En un autotransformador trifásico cada fase está constituida por un bobinado ejecutado como el que se ha expuesto para el autotransformador monofásico.

**Las tres fases de un autotransformador trifásico son unidas en estrella**, para lo cual se unen los extremos libres de las bobinas comunes (figura 29). Las bornas de alta tensión, son los extremos libres de las bobinas serie, mientras que las bornas de baja tensión salen de los puentes de conexión de las bobinas serie y común. En un autotransformador trifásico se puede disponer de conductor neutro si fuera necesario.

La teoría y reglas expuestas para los autotransformadores monofásicos son aplicables a los trifásicos sin más que **tener en cuenta que en éstos la tensión por fase es  $\frac{1}{3}$  veces más pequeña que la tensión de línea**.

### Empleo de los autotransformadores

El examen de las ventajas e inconvenientes de los autotransformadores permite deducir sus posibilidades prácticas de utilización. Estas máquinas son adecuadas en los siguientes casos:

- < En **transformaciones de energía eléctrica** cuando son aproximados los valores de, las tensiones primaria y secundaria. Tal sucede en interconexiones de dos redes de alta tensión, de **66.000** y **60.000** voltios por ejemplo.

Desde el punto de vista de esta clase de aplicaciones se puede afirmar que **las ventajas del autotransformador sobre el transformador quedan superadas por los inconvenientes cuando la alta tensión es de valor doble que la baja**.

- < Para el **arranque de motores** síncronos y asíncronos **de mediana y gran potencia**. En un autotransformador de arranque se ejecutan dos o más derivaciones en las bobinas serie, las cuales permiten someter al motor a tensiones progresivamente crecientes al objeto de conseguir el arranque del motor en las condiciones deseadas.

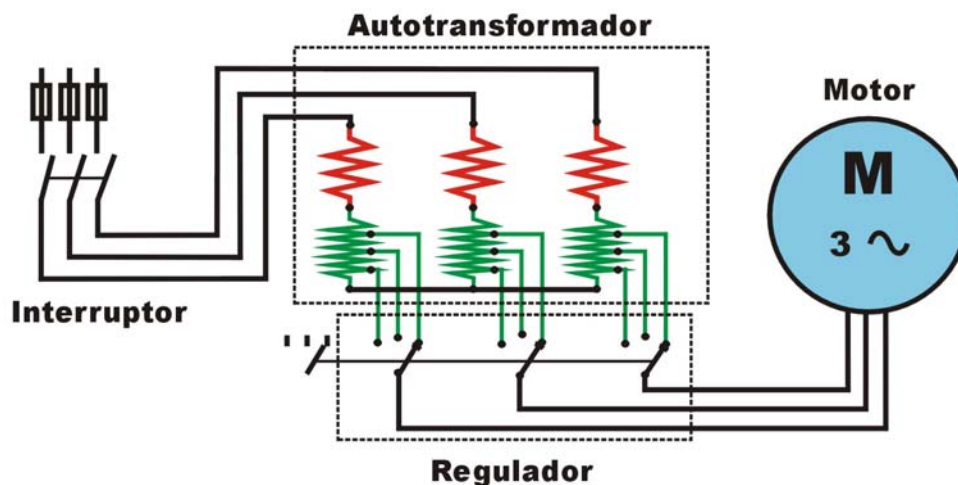


Figura 29 AUTOTRANSFORMADOR CON VARIAS SALIDAS PARA ARRANQUE DE MOTORES

### 13. TESTEO Y VERIFICACIÓN DE TRANSFORMADORES

#### Parámetros intrínsecos

Las características básicas de un transformador son el **voltaje del primario**, el **voltaje del secundario**, el **número de espiras del primario**, el **número de espiras del secundario** y **la relación que existe entre ellos**:

Se puede **determinar el valor de la relación de transformación**, siempre y cuando no exista caída de tensión por carga en el secundario, es decir, **cuando el transformado funcione en vacío**.

Haciendo el montaje de la figura 30 y aplicando al primario una tensión, que sea **como máximo la tensión de servicio**, se obtiene la tensión del secundario, y se puede hallar la relación que existe entre un voltaje y otro.

Los fabricantes procuran buscar **un número exacto**, o con un decimal como máximo, para esta **relación de transformación**.

En caso de que se aplique un voltaje menor del voltaje de funcionamiento, la salida del secundario también será menor pero la relación siempre será la misma, incluso si se aplica un voltaje mayor del tolerado, la relación será la misma, el peligro de aplicar una tensión mayor está en que se perforan los aislamientos y el transformado se queme. En otras palabras, **un transformador tolera perfectamente un voltaje menor siempre sin problemas, pero nunca o casi nunca un voltaje mejor**.

Para averiguar el número de vueltas (espiras) que tiene el primario y el secundario, no hay otro sistema que contar las vueltas, del primario o del secundario, es lo mismo. Para contar las vueltas el único sistema es desmontar el transformador, quietar las chapas, las protecciones aislantes, desoldar conexiones y sólo entonces se podrá contar.

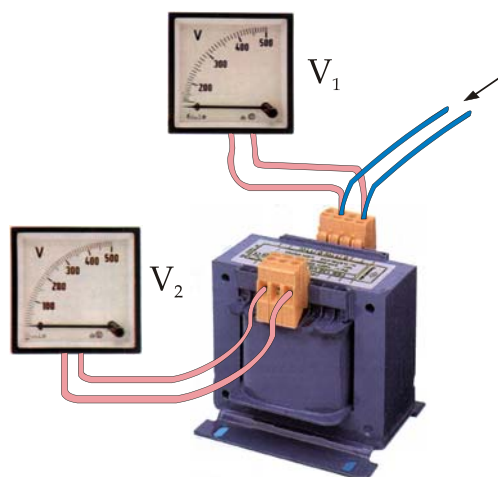


Figura 30 ENSAYO EN VACÍO PARA DETERMINAR LA RELACIÓN DE TRANSFORMACIÓN

#### 14. BORNES CORRESPONDIENTES DE UN TRANSFORMADOR MONOFÁSICO

En un transformador monofásico, son bornes correspondientes aquellos que en todo instante tienen simultáneamente el potencial más alto o el más bajo. En la figura 31 está representado esquemáticamente un transformador monofásico en el instante en el cual el potencial de la borne **U** es mayor que el de **X**.

En ese mismo instante, en el bobinado secundario se genera una fuerza electromotriz **E<sub>2</sub>** cuyo sentido se supone es el que se indica en la figura. Entonces son bornes correspondientes **U** y **u**, así como **X** y **x**.

Un factor determinante entre bornes correspondientes, es el **sentido en que se ha enrollado las bobinas del transformador**. (Ver párrafo 4)

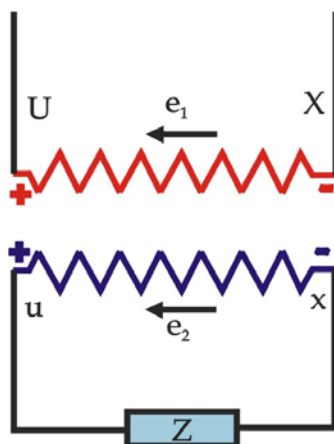


Figura 31 BORNES CORRESPONDIENTES DE UN TRANSFORMADOR MONOFÁSICO

El problema surge, cuando se recurre al acoplamiento en paralelo. En instalaciones nuevas se proyecta con transformadores exactamente iguales, pero en instalaciones con años en uso, se recurre a transformadores de distintos fabricantes y **antes de proceder a su acoplamiento son necesarias pruebas básicas para determinar si sus bornes son correspondientes**, que están correctamente señalados y que van a ser conectadas a un mismo conductor; tanto de la línea de alta, como de la de baja.

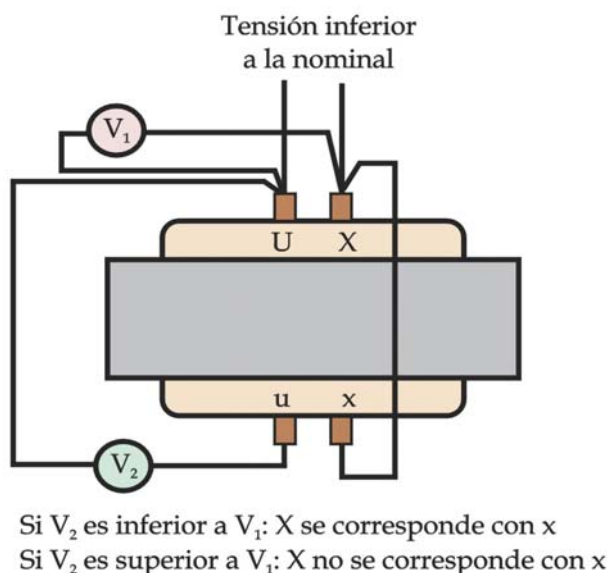


Figura 32 ENSAYO PARA DETERMINAR BORNES CORRESPONDIENTES

Un ensayo sumamente sencillo permite determinar con plena seguridad las bornes correspondientes de un transformador monofásico. Para efectuar este ensayo se unen previamente dos bornes que se supone son correspondientes bornes (en la figura 32 se han unido las bornes **X** y **x**).

Luego se alimenta el bobinado de **AT** con una tensión inferior a la nominal, tensión que es medida por el voltímetro **V<sub>1</sub>**. Por otra parte, se mide con el voltímetro **V<sub>2</sub>** la tensión existente entre las bornes libres (en la figura 32 la tensión entre las bornes **U** y **u**). Si el valor de esta tensión **V<sub>2</sub> resulta inferior a V<sub>1</sub>**, se puede tener la seguridad que las bornes directamente unidas **son correspondientes**. En cambio, si el valor de la tensión **V<sub>2</sub>** es mayor que **V<sub>1</sub>** es señal de lo contrario.

El **fundamento de este ensayo** queda explicado en la figura 33. Se comprueba que si las bornes directamente unidos son los correspondientes, la tensión instantánea **V<sub>2</sub>** es menor que la tensión **V<sub>1</sub>** en un valor igual a la fuerza electromotriz **e<sub>2</sub>** generada en el bobinado de baja tensión.

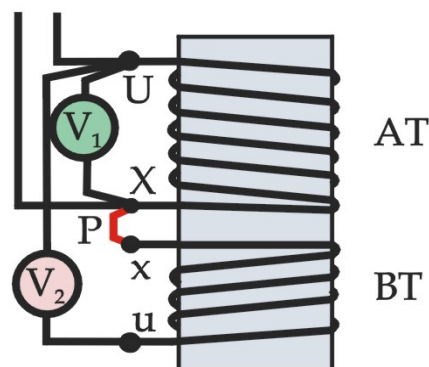


Figura 33 FUNDAMENTO DEL ENSAYO DE CORRESPONDENCIA DE BORNES

## 15. ACOPLAMIENTO EN PARALELO DE TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS

Las condiciones que deben cumplir dos o más transformadores monofásicos para ser acoplados en paralelo son:

- < Que sean **iguales las relaciones de transformación**, a fin de que sean iguales los voltajes de salida.
- < Que los valores de **las tensiones de cortocircuito sean lo más igual posible**, a fin de que las caídas de tensiones sea la misma en todos los transformadores.
- < Que **estén conectadas a un mismo conductor los bornes correspondientes** de cada transformador (figura 34).

## 16. COMPROBACIÓN EXPERIMENTAL ANTES DE LA PUESTA EN SERVICIO

Antes de poner en servicio dos o más transformadores monofásicos conectados en paralelo, conviene efectuar el ensayo siguiente:

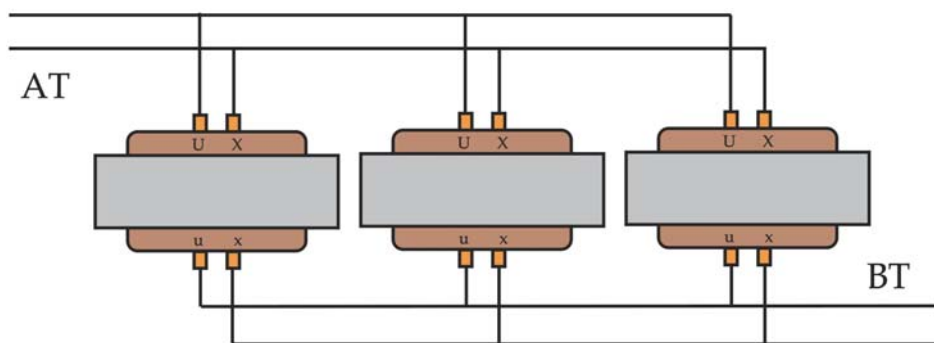


Figura 34 ACOPLAMIENTO EN PARALELO DE TRES TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS

- < Se preparan los transformadores como en la figura 35.
- < Mientras el transformador  $T_1$  está conectado a red de alta por un lado y la baja por otro
- < El transformador  $T_2$  está conectado a la alta por el primario mientras que el secundario lleva dispuesto un voltímetro (figura 35)
- < Al cerrar el interruptor **M**, el voltímetro debe señalar **0 voltios**, en caso contrario la conexión no es correcta.

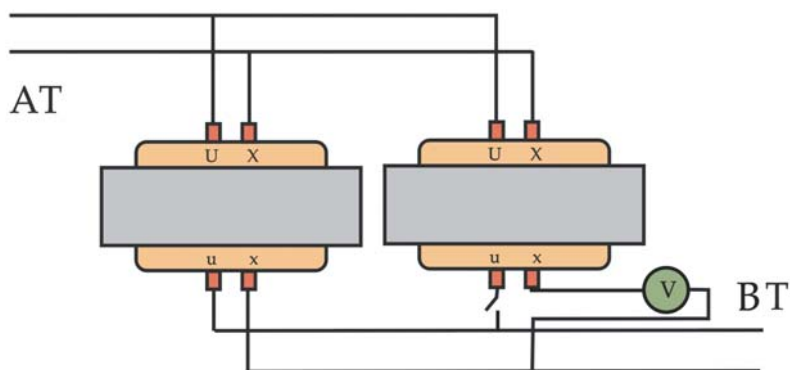


Figura 35 ENSAYO PREVIO PARA ACOPLAMIENTO DE TRANSFORMADORES EN PARALELO



## 17. ENSAYO PARA DETERMINAR LA POSIBILIDAD DE ACOPLAMIENTO EN PARALELO DE TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS

Antes de acoplar, en paralelo, dos **transformadores trifásicos**, conviene efectuar el llamado **ensayo de polaridad**. Este ensayo permite tener la seguridad de cuáles son las bornes que deben de conectarse aun mismo conductor, tanto por el lado primario como secundario. Este ensayo es fácil de ejecutar, aunque exige un número considerable de medidas de tensión.

Suponiendo que se dispone de dos transformadores  $T_1$  y  $T_2$  que se desea conectar en paralelo (figura 36).

**Primero:** Comprobar la posibilidad la posibilidad del acoplamiento

- < Se conecta **completamente el primer transformador**
- < Se conecta **solamente el primario del segundo transformador**
- < Se une **una de las bornes del secundario** del  $T_2$  con el borne que se supone le corresponde
- < **La condición para que puedan conectarse en paralelo** es que las otros dos bornes esté al mismo potencial que el conductor a que van a unirse, es decir, **que los volímetros marquen cero voltios**.

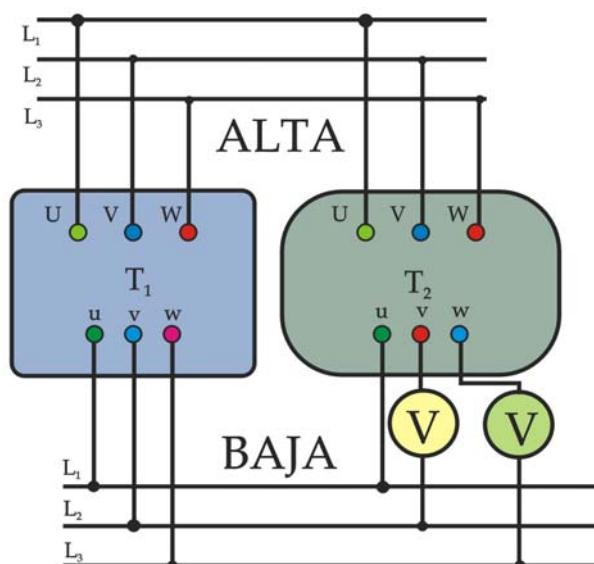


Figura 36 ENSAYO DE POLARIDAD

**Segundo:** En el supuesto de que los voltímetros marquen tensión se efectuará un segundo ensayo.

- < Se **conmuta la borne u con la segunda fase  $L_2$**  y se vuelve a efectuar las mismas medidas, si una de las medidas da valor cero, es evidente que se ha localizado una de las fases, la otra en cambio si marca es que tampoco está localizada la unión.
- < Vuelta a **cambiar la borne u esta vez con  $L_3$**  y repetición de las medidas.
- < Si ninguna de las tres mediciones da valores nulos, se procede a **cambiar las conexiones en el primario** y **se vuelve a repetir el proceso, con la primera, segunda y tercera fase.**
- < Las tres fases del primario se pueden conectar de **tres formas distintas** (figura 37) y el número de ensayos se puede repetir tantas veces como se cambien las conexiones primarias y secundarias

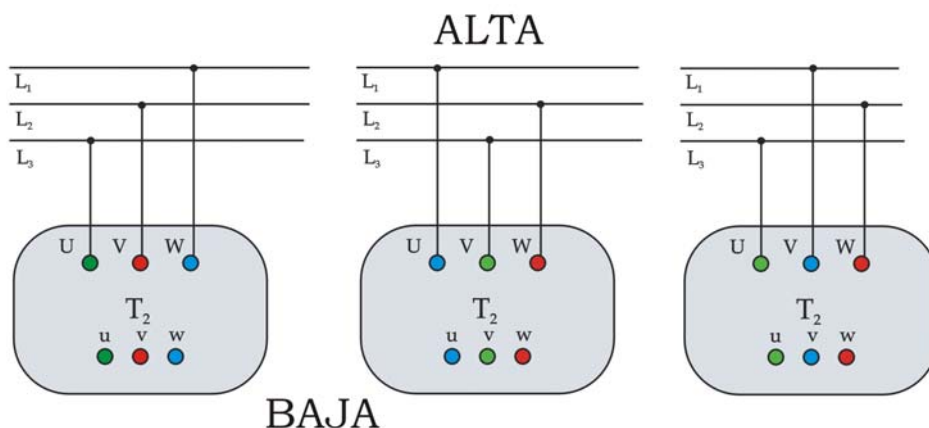


Figura 37 INTERCAMBIO DE LAS BORNES DEL PRIMARIO DEL SEGUNDO TRANSFORMADOR

- < Finalmente **si ninguna de las conexiones da valores nulos** en las dos fases, se puede afirmar que estos transformadores no pertenecen al mismo grupo de conexiones, y **no pueden conectarse en paralelo.**
- < En el peor de los casos, **hace falta efectuar 48 medidas antes de afirma si pueden o no pueden conectarse en paralelo.** Si las mediciones se hace con dos voltímetros al mismo tiempo, los ensayos se reducen a 24 mediciones.

## 18. ENSAYOS EN VACÍO

Un transformador **funciona en vacío** cuando presenta abierto el circuito secundario de utilización, es decir, **cuando es nula la intensidad de corriente en el bobinado secundario**.

En tales condiciones, el bobinado primario es recorrido por una **corriente alterna de pequeña intensidad  $i_0$ , sólo la necesaria para mantener el flujo en el circuito magnético**. Esta intensidad recibe el nombre de **corriente de vacío**.

Siendo alterna senoidal la corriente de vacío, también lo será la fuerza magnetomotriz del bobinado primario.

$$\mathcal{E}_0 = 1,25 N_1 i_0$$

Y, asimismo, será alterno senoidal el flujo establecido en el circuito magnético, de acuerdo con la fórmula.

$$\phi = \frac{1,25 N_1 i_0}{R}$$

en la cual **R** es la reluctancia del circuito magnético. En la figura 38 aparece la representación senoidal del flujo  $\Phi$ , el cual, prácticamente, está en fase con la corriente de vacío  $i_0$ .

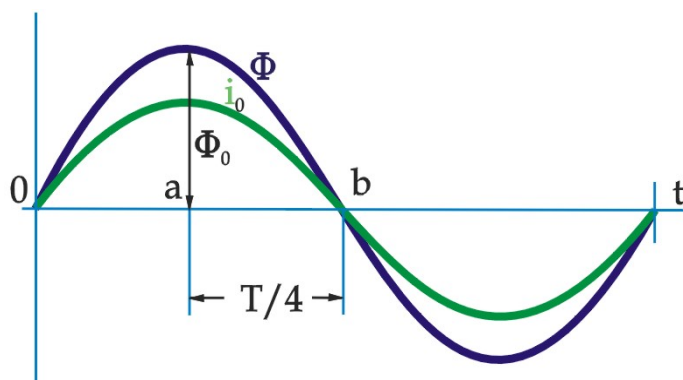


Figura 38 CURVA DE VARIACIÓN DE FLUJO EN EL NÚCLEO DEL TRANSFORMADOR

## Relación de transformación

Aunque en algún caso **pueden ser iguales los números de espiras de los bobinados primario y secundario**, en la práctica es muy raro que suceda tal cosa. En realidad, pueden presentarse dos casos distintos:

- a) El bobinado primario dispone de un número de espiras mayor que el secundario. Entonces se trata de un transformador **reductor**.
- b) *El bobinado primario tiene menos espiras que el secundario. En tal caso se trata de un transformador **elevador**.*

Recibe el nombre de *relación de transformación* de un transformador el valor del cociente que resulta de dividir los números de espiras de los bobinados primario y secundario. Designando respectivamente por  **$N_1$**  y  **$N_2$** , a estos números de espiras, la relación de transformación es igual a

$$m = \frac{N_1}{N_2}$$

Según esta definición, en un transformador reductor el valor de la relación de transformación es mayor que la unidad, mientras que en un transformador elevador resulta menor que la unidad.

## Ejemplo de cálculo

Un transformador monofásico tiene **3.240 espiras** en el bobinado primario y **360 espiras** en el secundario. ¿**Cuánto vale la relación de transformación**?

Como se ve, se trata de un transformador reductor cuya relación de transformación vale

$$m = \frac{N_1}{N_2} = \frac{3.240}{360} = 9$$

## Fuerzas electromotrices primaria y secundaria

**El flujo variable** establecido en el circuito magnético del transformador **da origen a una fuerza electromotriz inducida en cada uno de los bobinados primario y secundario**.

El **valor de la fuerza electromotriz estática**, generada en una bobina, es igual a

$$E_1 = \frac{4,44 \phi f N_1}{10^8}$$

fórmula que dice: «**El valor de la fuerza electromotriz inducida en el bobinado primario** de un transformador es igual a **4,44 veces el producto de los valores del flujo máximo, en maxvelios, por la frecuencia, en hercios, y por el número de espiras de ese bobinado, dividiendo el resultado obtenido por cien millones**».

La fórmula anterior es similar a la de un alternador, pero entre ellas existe una importante diferencia, derivada de que el flujo que recorre el circuito magnético de un alternador es *constante*, mientras que en un transformador el flujo es variable y en la fórmula debe emplearse el *valor máximo del flujo*.

El **valor de la fuerza electromotriz generada en el bobinado secundario**.

$$E_2 = \frac{4,44 \phi_0 f N_2}{10^8}$$

### Relación de tensiones en vacío

Las ecuaciones  $E_1$  y  $E_2$  da los valores de las fuerzas electromotrices generadas en los bobinados primario y secundario de un transformador funcionando en vacío. Con ellas se obtiene una nueva expresión de la relación de transformación. En efecto, puesto que en ambas ecuaciones aparece el mismo valor del flujo máximo  $\Phi_0$  y de la frecuencia  $f$ ; la relación de fuerzas electromotrices valdrá

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

expresión que dice: «**La relación de transformación de un transformador, es decir, la relación de los números de espiras de los bobinados primario y secundario coincide con la relación de los valores de las respectivas fuerzas electromotrices**».

Por otra parte, siendo en vacío nulo el valor de la corriente secundaria, no hay caída de tensión en este bobinado, por lo que la tensión en sus bornas  $V_{02}$  coincide con el valor de la fuerza electromotriz  $E_2$ . En cuanto al bobinado primario se sabe que es de muy pequeño valor la corriente de vacío, por lo que se puede admitir, sin error apreciable, que también resulta nula la caída de tensión primaria y que prácticamente son iguales los valores de la tensión en bornas primarias  $V_1$  y la fuerza electromotriz  $E_1$ . Así, pues, la expresión puede ser transformada en la siguiente:

$$\frac{V_1}{V_{02}} = \frac{N_1}{N_2} = m$$

## 19. ENSAYOS EN CARGA

### Fuerzas magnetomotrices primaria y secundaria

Un transformador funciona con carga cuando a las bornas del bobinado secundario se encuentra conectado un circuito exterior de impedancia  $Z$  (figura 39), de forma que dicho bobinado es recorrido por una corriente alterna senoidal de valor instantáneo  $i_2$  que da lugar a una fuerza magnetomotriz de valor instantáneo  $\mathcal{E}_2 = 1,25 N_2 i_2$

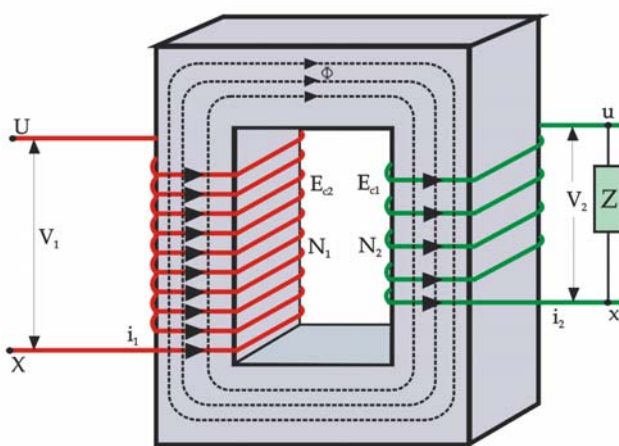


Figura 39 FUNCIONAMIENTO EN CARGA

Las consecuencias a que da lugar esta fuerza magnetomotriz secundaria son, en principio, que estando el transformador funcionando en carga se mantuviera en el bobinado primario el valor de la corriente de vacío.

Es evidente que, de acuerdo con la ley de la causa y el efecto, la corriente secundaria

ha de tender a reducir el flujo magnético y, con él, los valores de las fuerzas electromotrices primaria y secundaria. Ahora bien, al disminuir el valor de la fuerza electromotriz primaria, el bobinado primario deberá absorber una corriente de mayor intensidad que la corriente de vacío. Este simple razonamiento permite afirmar que **al ser recorrido el bobinado secundario por la corriente de carga debe aumentar simultáneamente el valor de la corriente primaria.**

A consecuencia del aumento simultáneo de las corrientes primaria y secundaria se mantiene aproximadamente constante el valor de la fuerza magnetomotriz total, de forma que, **tanto el flujo magnético como las fuerzas electromotrices, varían muy poco de vacío a carga.**

Puesto en forma de proporción:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{m}$$

expresión que dice: «Cuando el **transformador funciona a plena carga**, los valores de **las intensidades primaria y secundaria están en razón inversa de los números de espiras de sus respectivos bobinados**, es decir, que **su cociente es igual al valor inverso de la relación de transformación**».

### Relación de tensiones en carga

Cuando el transformador funciona en carga, la corriente primaria **origina dos caídas de tensión diferentes, una óhmica y otra reactiva**, lo que determina que la fuerza electromotriz generada en el bobinado primario  **$E_{c1}$**  sea algo más pequeña que cuando funcionaba en vacío,  **$E_1$** . Esto exige que el flujo común en carga  **$\Phi_c$**  sea, asimismo, menor que el de vacío  **$\Phi_0$**  y, por consiguiente, también la fuerza electromotriz secundaria en carga  **$E_{c2}$**  será más pequeña que en vacío  **$E_2$** .

Al igual que en vacío, también en carga están los valores de las fuerzas electromotrices primaria y secundaria de un transformador en la misma relación que sus números de espiras. En cambio, no ocurre lo mismo con las tensiones en bornas primarias y secundarias. En efecto, **con el transformador bajo carga**, la tensión en bornas primarias  **$V_1$  es mayor que la fuerza contraelectromotriz generada en el bobinado primario  $V > E_{c1}$** , mientras que **la tensión en bornas secundarias  $V_{b2}$  es más pequeña que la fuerza electromotriz generada en el bobinado secundario  $V_{b2} < E_{c2}$** .

Por consiguiente, **la relación entre las tensiones en bornas primarias y secundarias es mayor que la relación de los números de espiras de los respectivos bobinados.**

### Reactancias de dispersión

Hasta ahora se ha supuesto que **el flujo total de líneas de fuerza pasa por el interior de ambos bobinados, de forma que las fuerzas electromotrices generadas en ellos son originadas por el mismo flujo común creado por los amperios vueltas primarios y secundarios.**

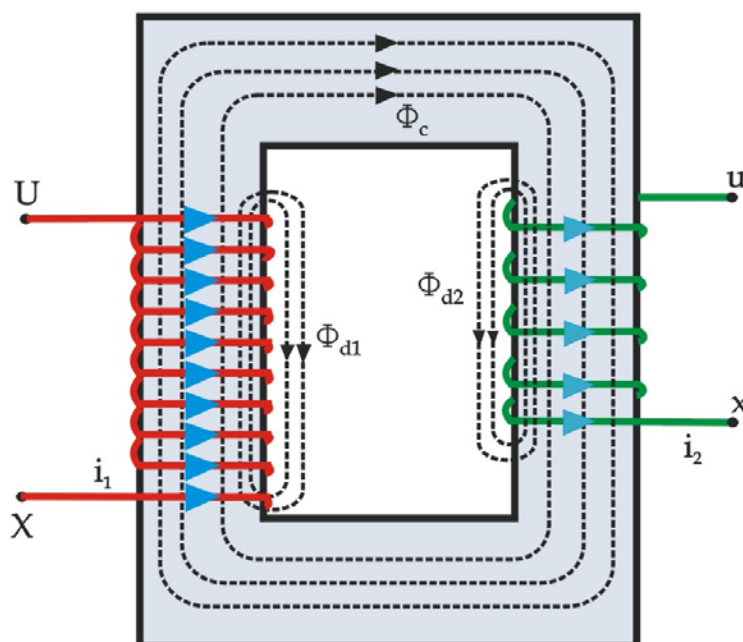


Figura 40 FLUJOS DE DISPERSIÓN DE UN TRANSFORMADOR

Ahora bien, **cuando el transformador funciona en carga aparecen dispersiones del flujo en ambos circuitos eléctricos (figura 40).** Estos flujos de dispersión dan lugar en los respectivos bobinados a fuerzas electromotrices de autoinducción.



## Caída de tensión

Es la diferencia de los valores que toma la tensión en bornas secundarias en vacío  $E_2$  y en carga  $V_{b2}$ , con la condición de que se mantenga constante la tensión en bornas primarias  $V_1$ . Recordando que en vacío la tensión en bornas secundarias vale

$$E_2 = \frac{V_1}{m}$$

resulta que, en definitiva, el valor de la caída de tensión viene dada por la fórmula

$$V_c = \frac{V_1}{m} - V_{b2}$$

La caída de tensión depende de la intensidad de la corriente de carga. Su determinación puede ser efectuada mediante un procedimiento **gráfico vectorial**, conocido como **método de Kapp**.

## 20. DIAGRAMA VECTORIAL DE KAPP

El diagrama de Kapp representa vectorialmente la suma geométrica de valores eficaces correspondiente a la suma aritmética de valores instantáneos de la ecuación

$$\frac{V_1}{m} = V_{b2} + R_t i_2 + X_t i_2$$

Para obtener el diagrama de Kapp (figura 43) se adopta el eje horizontal como dirección de fase de la corriente secundaria. Entonces, a partir del punto O se toma sobre el segmento **OA** el valor eficaz de la caída de tensión óhmica total  $R_t i_2$ . (Este segmento **OA** se encuentra sobre el eje horizontal por representar una tensión óhmica en fase con la corriente).

Después, sobre el segmento **AB**, perpendicular a **OA**, se toma el valor eficaz de la caída de tensión reactiva total  $X_t i_2$ , la cual, como ya se sabe, tiene que estar adelantada un ángulo de  $90^\circ$  respecto de la corriente.

El triángulo **OAB** que se forma recibe el nombre de **triángulo fundamental de Kapp**.

Continuando con la construcción del diagrama se toma sobre el segmento **BC**, que forma el ángulo  $\mathbf{n}_2$ , con la dirección del eje horizontal (o con su paralela **BM**), el valor eficaz de la tensión en bornas del bobinado secundario. **Vb2**, la cual, debido a las características del circuito exterior de utilización (que se supone inductivo en este caso), está adelantada un ángulo  $\mathbf{n}_2$  respecto de la corriente secundaria de carga.

El segmento **OC**, que cierra el polígono de vectores **OABC**, es la suma geométrica de los valores eficaces de la tensión en bornas secundarias y las caídas de tensión activa y reactiva totales, lo que indica que el segmento **OC** representa el valor eficaz de la fuerza electromotriz **V1/m** generada en el bobinado secundario cuando el transformador funciona en vacío.

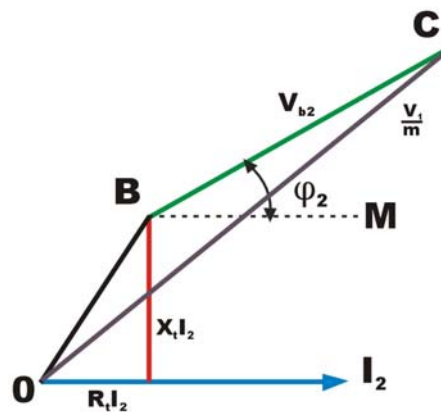


Figura 41 DIAGRAMA VECTORIAL DE KAPP

Construido el diagrama vectorial de Kapp, **el valor eficaz de la caída de tensión interior total del transformador queda determinado por la diferencia de los segmentos OC y BC.**

$$V_c = \frac{V_1}{m} - V_{b2} = \overline{OC} - \overline{BC}$$

El valor de la caída de tensión en un transformador depende de las características del circuito exterior, o sea **de la intensidad de la corriente de carga y del factor de potencia.**

### Determinación del triángulo fundamental

La construcción del diagrama de Kapp exige el trazado previo del triángulo fundamental correspondiente al valor de la corriente de carga. Para ello **es necesario conocer el valor de dos de los lados de dicho triángulo.**

La determinación del valor de la resistencia total referida al secundario  $R_t$  no ofrece ninguna dificultad. En efecto, después de medidas las resistencias de los bobinados primario y secundario se obtiene la resistencia total aplicando la fórmula:

$$R_t = R_2 + \frac{R_1}{m^2}$$

En cambio, la deducción directa, sea por cálculo sea por ensayos, del valor de la reactancia total referida al secundario es difícil e imprecisa, por lo cual no se hace uso de ella para trazar el triángulo fundamental. **Lo que se hace es calcular la hipotenusa OB de dicho triángulo, recurriendo al método de Kapp.**

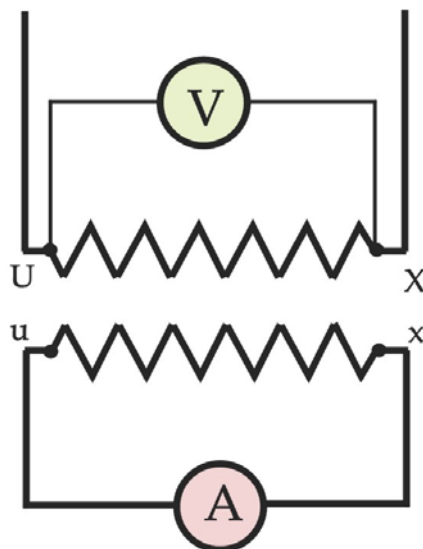


Figura 42 ENSAYO DE UN TRANSFORMADOR EN CORTOCIRCUITO

Este método se basa en el razonamiento siguiente: **Si el bobinado secundario de un transformador está conectado en cortocircuito** (figura 44) **y se desea que dicho bobinado sea recorrido por una corriente de intensidad igual a la nominal, resulta necesario aplicar al bobinado primario una tensión de pequeño valor que recibe el nombre de tensión de cortocircuito.** Designada por  $V_{cc}$ .

Es evidente que estando en cortocircuito resulta nulo el valor de la tensión secundaria. Entonces la fórmula anterior, queda transformada en la siguiente:

$$\frac{V_{cc}}{m} = R_t i_2 + X_t i_2$$

expresión que hace ver cómo **en cortocircuito la tensión total aplicada al primario sirve tan sólo para cubrir las caídas de tensión óhmica e inductiva.**

En la figura 43 se expone la manera de trazar el diagrama vectorial de tensiones eficaces correspondiente al funcionamiento del transformador en cortocircuito.

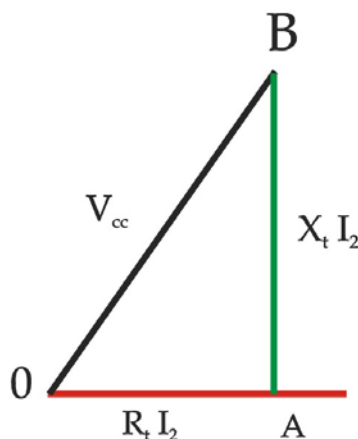


Figura 43 TRIÁNGULO FUNDAMENTAL DE KAPP

Se toma primeramente, sobre el segmento **OA**, **el valor de la caída de tensión óhmica**. Luego, en el punto **A** se traza una perpendicular sobre la que tiene que estar el tercer vértice del triángulo fundamental.

Por otra parte, se traza un arco de circunferencia de radio igual al valor de la tensión en cortocircuito, arco que corta en el punto **B** a la perpendicular anterior, lo que indica que el triángulo **OAB** es el triángulo fundamental que se busca y el cateto **AB** representa la caída de tensión reactiva.

### Corriente de cortocircuito

Si por error o accidente fortuito queda establecido un cortocircuito entre las bornas del bobinado secundario, las intensidades de corriente primaria y secundaria tomarán valores extraordinariamente elevados, lo que puede dar lugar a desastrosas consecuencias, tanto a causa del calor producido por efecto Joule como por los grandes esfuerzos mecánicos que se desarrollan entre las, espiras de ambos bobinados. Ello

es debido a que cuando el transformador queda en cortocircuito resulta nula la impedancia del circuito exterior y entonces la fórmula se transforma en la siguiente:

$$\frac{V_1}{m} = R_t i_{cc} + X_t i_{cc}$$

En la figura 44 aparece representado el diagrama vectorial de tensiones eficaces en cortocircuito correspondiente a esta ecuación.

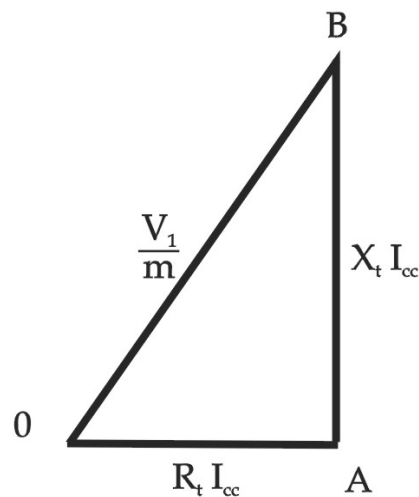


Figura 44 DIAGRAMA VECTORIAL DE TRANSFORMADOR EN CORTOCIRCUITO

Sobre este diagrama se deduce

$$\frac{V_1}{m} = I_{cc} \sqrt{R_t^2 + X_t^2}$$

Despejando en esta expresión la intensidad de la corriente de cortocircuito resulta la siguiente:

$$I_{cc} = \frac{\frac{V_1}{m}}{\sqrt{R_t^2 + X_t^2}}$$

Es posible reducir la corriente de cortocircuito de un transformador aumentando el valor de la reactancia interior. Sin embargo, este aumento determina que la tensión de cortocircuito sea también elevada, lo cual es un inconveniente en el funcionamiento normal del transformador.

## 21. DISPOSITIVOS DE REGULACIÓN DE TENSIÓN

En ocasiones podría ocurrir que la tensión secundaria tomará valores excesivamente bajos, sea porque exista en él una importante caída de tensión, sea por ser ya baja la tensión primaria de alimentación. En tal caso es necesario elevarla, para lo cual se dispone un dispositivo que permita variar la relación de transformación del transformador.

Para regular la tensión secundaria de un transformador, se disponen **en el bobinado de alta tensión** (el que lleva conductor de menos sección) *derivaciones de regulación*, con las que se consigue tener un número de espiras mayor o menor que las que corresponden a la tensión nominal (figura 45). En la práctica, las derivaciones de regulación son ejecutadas en bobinas elementales **situadas a la mitad de la altura del núcleo y no en las extremas**, a fin de evitar asimetrías magnéticas que originan esfuerzos exagerados.

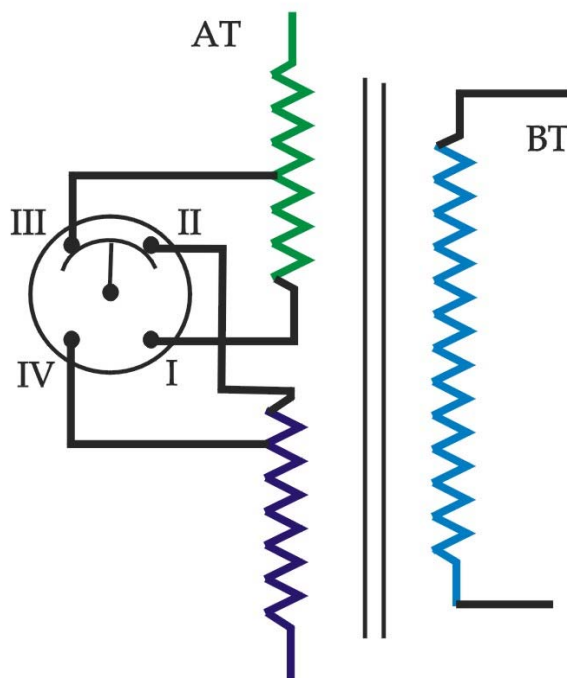


Figura 45 REGULADOR DE TENSIÓN PARA TRANSFORMADORES

En cambio, cuando el transformador es de gran potencia se adopta un **regulador de carga**, dispositivo complicado y de gran precisión, que permite la maniobra de cambio de toma aun con el transformador funcionando a plena carga.

## 22. RENDIMIENTO DEL TRANSFORMADOR

### Pérdidas de potencia

En un transformador, al igual que en las restantes máquinas eléctricas, se presentan pérdidas de potencia. Ahora bien, por tratarse de una máquina estática, **no existen pérdidas de potencia de origen mecánico**. Así, pues, las pérdidas de potencia de un transformador **se reducen a las del hierro del circuito magnético y las del cobre de los bobinados**. Como a continuación se describe, ambas clases de pérdidas pueden ser determinadas de forma experimental mediante los ensayos de vacío y cortocircuito.

### Pérdidas en el hierro

**La potencia perdida en el hierro del circuito magnético de un transformador puede ser medida en el ensayo de vacío.** Se efectúa este ensayo dejando abierto el bobinado de alta tensión, mientras se alimenta el de baja tensión a su tensión nominal. En el párrafo 12 ya se ha indicado como se haya.

La potencia perdida en el hierro resulta constante en todos los estados de funcionamiento del transformador. En efecto, el valor de la potencia perdida en el hierro depende, además del peso del núcleo, de la inducción y de la frecuencia. Como quiera que estos valores son constantes (siempre que lo sean la tensión y frecuencia de la red), se hace evidente que **el valor de la potencia perdida en el hierro de un transformador permanece constante para cualquier régimen de funcionamiento, de vacío a carga, sin depender en absoluto de la intensidad de corriente de carga.**

### Pérdidas en el cobre

**La suma de las potencias perdidas en los bobinados primario y secundario de un transformador, funcionando bajo la carga nominal, puede ser medida en el ensayo de cortocircuito.** Se efectúa este ensayo alimentando el bobinado primario bajo una tensión de valor tal, que estando cerrado en cortocircuito el bobinado secundario, sean recorridos ambos bobinados por corrientes de intensidades iguales a sus nominales respectivas (En el párrafo 19 se ha explicado como se hace).

La potencia absorbida por el transformador en el ensayo de cortocircuito representa la potencia perdida en sus bobinados, tanto por efecto Joule como las suplementarias debidas a la concentración de corriente.



Por otra parte, la potencia perdida en los bobinados *varia con el valor de la carga* a que está sometido el transformador. En efecto, el valor de esta potencia depende de la intensidad de corriente, tanto en el bobinado primario como en el secundario, la cual varía mucho desde el funcionamiento en vacío a plena carga. **La variación del valor de la potencia perdida en el cobre es proporcional al cuadrado de la intensidad de la corriente de carga.**

### Curva de rendimiento

El **rendimiento de un transformador es variable** y **depende del valor de la potencia suministrada**. Se puede demostrar matemáticamente que **un transformador funciona a su máximo rendimiento cuando la intensidad de la corriente de carga es de valor tal que resultan iguales las pérdidas de potencia en el hierro y en el cobre.**

Normalmente es **muy raro que el valor máximo del rendimiento de un transformador corresponda a su régimen nominal**. En la práctica, los transformadores se calculan para que sea obtenido el rendimiento máximo en las condiciones de carga en que se supone va a trabajar durante más tiempo.

## 23. CHAPA DE CARACTERÍSTICAS DE LOSA TRANSFORMADORES

Nombre del fabricante			
Tipo ( fabricante)	Número( fabricante)	Año construcción	VDE 0532
Potencia KVA 160	Clase LT	Frecuencia Hz 50	
Tensión 1 20.400		Grupo conexión Yz5	
Tensión 2 20.000	400	Um KV 24/1.1	
Tensión 3 19.600			
Intensidad A 4;62	231	Clase aislamiento	
Tensión de cortocircuito %4,1	Inten. Permanente de cortocircuito KA		
Clase de protección	Duración de cortocircuito máx		
Clase de refrigeración DNAN			
Peso total t 1,0	t 0,27		

Figura 46 PLACA DE CARACTERÍSTICAS PARA TRANSFORMADORES