

TRANSFORMADORES

Miguel Angel Rodríguez Pozueta

DESCRIPCIÓN DE UN TRANSFORMADOR

Los transformadores son máquinas estáticas con dos devanados¹ de corriente alterna arrollados sobre un núcleo magnético (Fig. 1). El devanado por donde entra energía al transformador se denomina **primario** y el devanado por donde sale energía hacia las cargas² que son alimentadas por el transformador se denomina **secundario**. El devanado primario tiene N_1 espiras y el secundario tiene N_2 espiras. El circuito magnético de esta máquina lo constituye un núcleo magnético sin entrehierros, el cual no está realizado con hierro macizo sino con chapas de acero al silicio apiladas y aisladas entre sí (véanse las Figs. 2, 3 y 4). De esta manera se reducen las pérdidas magnéticas del transformador.

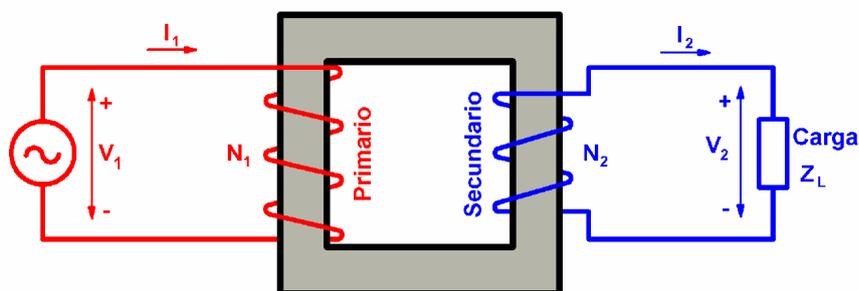


Fig. 1: Principio de funcionamiento de un transformador monofásico

Al conectar una tensión alterna V_1 al primario, circula una corriente por él que genera un flujo alterno en el núcleo magnético. Este flujo magnético, en virtud de la Ley de Faraday, induce en el secundario una fuerza electromotriz (f.e.m.) E_2 que da lugar a una tensión V_2 en bornes de este devanado. De esta manera se consigue transformar una tensión alterna de valor eficaz V_1 en otra de valor eficaz V_2 y de la misma frecuencia. Nótese que esta máquina sólo vale para transformar tensiones alternas, pero no sirve para tensiones continuas.

El **devanado de alta tensión** (A.T.) es el de mayor tensión y el **devanado de baja tensión** (B.T.) es el de menor tensión. Un **transformador elevador** tiene el lado de baja tensión en el primario y el de A.T. en el secundario. Un **transformador reductor** tiene el lado de alta tensión en el primario y el de B.T. en el secundario.

El transformador es una máquina reversible. Un mismo transformador puede alimentarse por el lado A.T. y funcionar como transformador reductor o alimentarse por el lado de B.T. y actuar como un transformador elevador.

En las Figs. 2 se muestran dos **transformadores monofásicos**. El transformador de la Fig. 2a es un transformador monofásico **de columnas**. En este transformador el núcleo magnético tiene forma rectangular y consta de dos columnas (donde se arrollan los devanados) y dos yugos o culatas, todos de igual sección. Aunque para facilitar el análisis teórico del

¹ Los términos *devanado*, *bobinado* y *arrollamiento* son sinónimos y en este texto se utilizarán indistintamente.

² Se denomina *carga* a un elemento que consume potencia. También se denomina *carga de un transformador* a la potencia que suministra. En consecuencia, se dice que un transformador está *en carga* cuando está proporcionando una potencia no nula por su devanado secundario.

transformador se suele dibujar con un devanado arrollado sobre una columna y el otro sobre la otra columna (Fig. 1), la realidad es que en un transformador de columnas se bobina primero el devanado de menor tensión (devanado de B.T.) repartido entre las dos columnas (mitad en una columna y mitad en la otra), se coloca una capa de material aislante sobre este primer devanado y se bobina ahora el devanado de mayor tensión (el devanado de A.T.) sobre el anterior y también repartido mitad en una columna y mitad en la otra. De esta manera se reducen los flujos de dispersión (debidos a las líneas de campo magnético generadas por un devanado y que no llegan al otro). En la Fig. 2b se muestra un transformador monofásico **acorazado**, el cual tiene un núcleo magnético de tres columnas, teniendo la columna central doble sección que las otras columnas y que los yugos. Los dos devanados se bobinan sobre la columna central, uno sobre el otro y con una capa aislante intermedia. Al estar los devanados más rodeados del hierro del núcleo magnético, se consigue en los transformadores acorazados que los flujos de dispersión sean menores que en los de columnas.

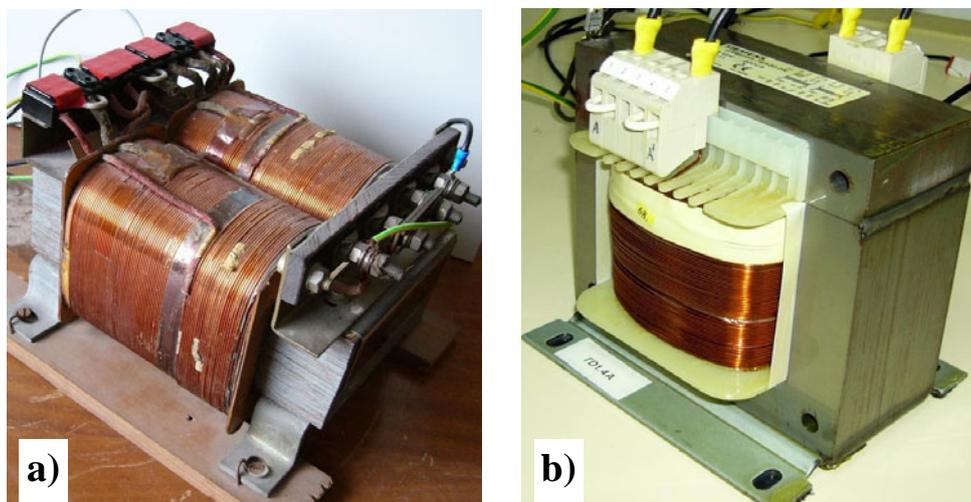


Fig. 2: Transformadores monofásicos: a) De columnas; b) Acorazado

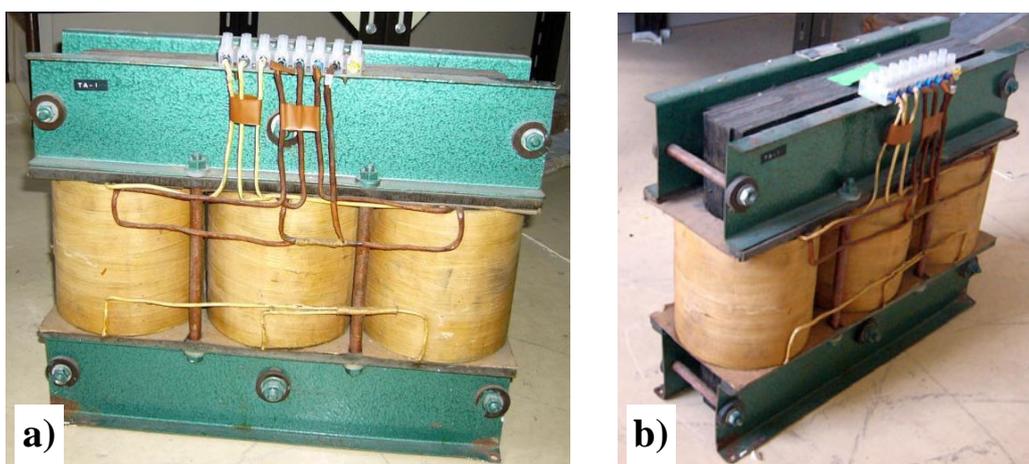


Fig. 3: Transformadores trifásicos de tres columnas

Los **transformadores trifásicos** más habituales suelen ser **de tres columnas** (Figs. 3). El núcleo magnético de estos transformadores tiene tres columnas de igual sección e igual a la de los yugos. Sobre cada columna se bobinan (uno sobre el otro con una capa de aislamiento intermedia) los dos devanados (primario y secundario) de una de las fases. Las tres fases del primario se conectan entre sí en estrella, en triángulo o mediante una conexión especial denominada zig-zag que se estudiará más adelante. Análogamente sucede con las tres fases del secundario.

También existen otros tipos de transformadores trifásicos: **de cinco columnas** (con dos columnas adicionales sin devanados a ambos lados del núcleo magnético) y **acorazados**.

En una red trifásica, además de un transformador trifásico, también se puede utilizar un **banco de tres transformadores monofásicos**. Los primarios de los tres transformadores monofásicos se pueden conectar en estrella o en triángulo y lo mismo pasa con los secundarios.



Fig. 4: Detalle de la columna de un transformador trifásico

La Fig. 4 muestra la sección de una de las columnas de un transformador trifásico. En ella se aprecia como está construida a base de apilar chapas de acero de pequeño espesor y que, en este caso, tiene una sección escalonada y no rectangular, a diferencia de los transformadores de las Figs. 2. Esta forma escalonada para las columnas se adopta en transformadores a partir de cierta potencia, ya que proporciona a las espiras de los bobinados una forma más próxima a la circular, que es la que permite soportar mejor los esfuerzos mecánicos a los que se ven sometidas si se producen cortocircuitos.

Las Figs. 2 y 3 muestran varios **transformadores secos**. En ellos el calor generado durante el funcionamiento de la máquina se evacua hacia el aire circundante a través de su superficie externa.

Hoy en día se utilizan bastante los transformadores secos encapsulados en resina epoxi, en los cuales el devanado de alta tensión está totalmente encapsulado en una masa de resina epoxi. Estos transformadores son muy seguros al no propagar la llama y ser autoextinguibles.

Para potencias altas tradicionalmente se han empleado los **transformadores en baño de aceite** (Figs. 5), los cuáles tienen su parte activa (núcleo magnético y devanados) en el interior de una cuba llena de aceite mineral o aceite de siliconas. En estos transformadores el aceite realiza una doble función: aislante y refrigerante. El calor generado por la parte activa del transformador se transmite al aceite y este evacua el calor al aire ambiente a través de la superficie externa de la cuba. Para facilitar la transmisión de calor a través de la cuba ésta posee aletas o radiadores que aumentan su superficie externa. En algunos casos el aceite es refrigerado por otro fluido (por ejemplo, agua) a través de un intercambiador de calor.

En su forma clásica, la cuba de un transformador en baño de aceite posee un **depósito de expansión o conservador** en su parte superior (Figs. 5). Este depósito, en forma de cilindro horizontal, sirve para absorber las variaciones de volumen del aceite de la cuba provocadas por el calentamiento de la máquina cuando está funcionando. Además, de esta manera se reduce la superficie de contacto entre el aceite y el aire, lo que alarga la vida útil del aceite. Por otra parte, la entrada de aire al depósito de expansión suele realizarse a través de un pequeño depósito de silicagel o gel de sílice que lo deseca, mejorando así la conservación del aceite de la cuba. En efecto, el gel de sílice es una sustancia que se presenta en forma de bolitas y que muestra una gran capacidad para absorber la humedad del aire. El depósito de expansión incluye un nivel de aceite, que consiste en una ventana o en un tubo de cristal (ver la Fig. 5b) que permite vigilar que el nivel del aceite es el adecuado.

En la parte superior del depósito de expansión está el tapón de llenado del aceite (ver la Fig. 5a), mientras que en la parte inferior de la cuba se encuentra el grifo de vaciado (Fig. 6a).

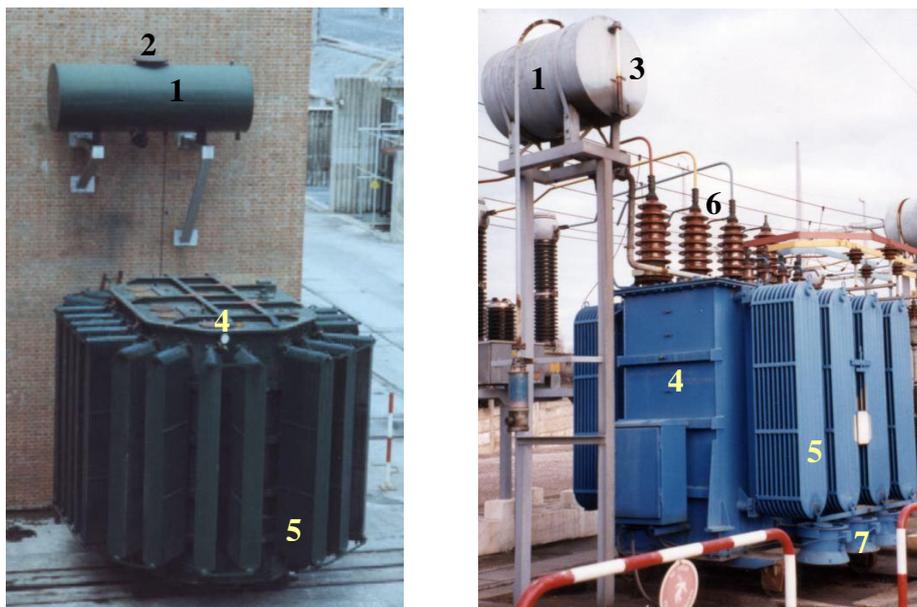


Fig. 5: Transformadores en baño de aceite

a)	1: Depósito de expansión; 3: Nivel de aceite 5: Radiadores	b)	2: Tapón de llenado 4: Cuba del transformador 6: Pasatapas de A.T. 7: Ventiladores para enviar aire hacia los radiadores
----	--	----	---

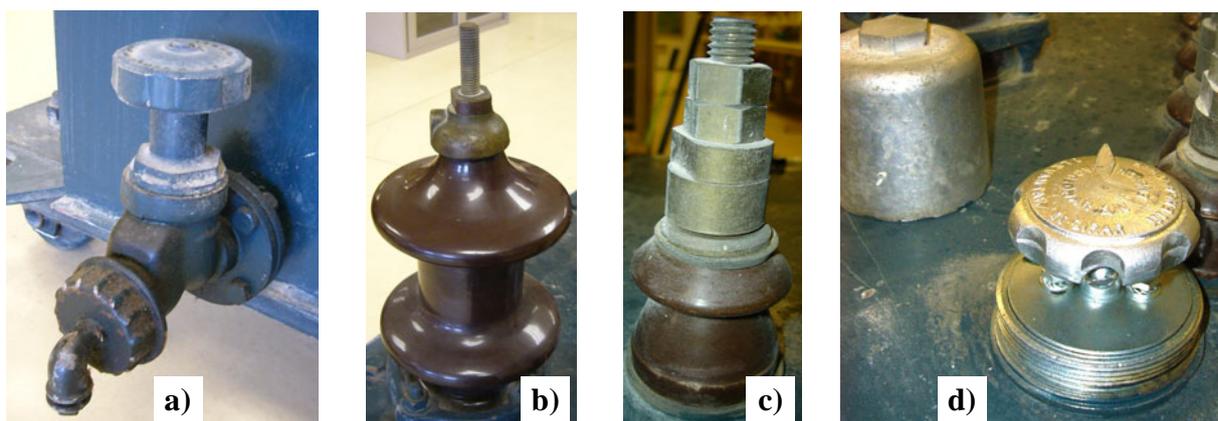


Fig. 6: Elementos de un transformador en baño de aceite:

a) Grifo de vaciado	b) Aislador pasatapas de A.T.
c) Aislador pasatapas de B.T.	d) Mando del conmutador de tensiones

Los bornes de los transformadores de media tensión se sacan al exterior de la cuba a través de **aisladores pasantes** o **pasatapas** de porcelana (Figs. 5b, 6b y 6c), que son tanto más altos cuanto mayor es la tensión que deben soportar.

Los transformadores usualmente disponen de un **conmutador** o **regulador de tensión** (Fig. 6d) que permite modificar ligeramente la relación de transformación de la máquina (normalmente $\pm 5\%$) para adaptarla a las necesidades concretas de cada aplicación. Estos conmutadores pueden ser sin tensión (se deben accionar con el transformador desconectado) o bajo carga (pueden accionarse con el transformador con tensión y con carga).

Los transformadores en baño de aceite suelen incorporar varios elementos de protección: por temperatura, por nivel de aceite, relé Buchholz,....

El **relé Buchholz** detecta las burbujas de gas que se producen cuando se quema el aceite debido a un calentamiento anormal del transformador. Por lo tanto, este relé permite proteger al transformador de sobrecargas, cortocircuitos, fallos de aislamiento, etc.

Hoy día los transformadores en baño de aceite son frecuentemente de **llenado integral**, en los cuáles la cuba es hermética y está completamente llena de aceite. La deformación de los pliegues de la cuba absorbe las presiones debidas a las dilataciones del líquido debidas al calor.

Según la Comisión Electrotécnica Internacional (CEI), el **tipo de refrigeración** de un transformador se designa mediante cuatro letras. Las dos primeras se refieren al refrigerante primario (el que está en contacto directo con la parte activa de la máquina) y las dos últimas se refieren al refrigerante secundario (que enfría al refrigerante primario). De cada par de letras, la primera indica de qué fluido se trata y la segunda señala su modo de circulación (Tabla I).

Tabla I: Designación de la refrigeración de un transformador

Tipo de Fluido	Símbolo	Tipo de circulación	Símbolo
Aceite mineral	O	Natural	N
Pyraleno	L	Forzada	F
Gas	G		
Agua	W		
Aire	A		
Aislante sólido	S		

Así, un transformador ONAN es un transformador en baño de aceite en el que el aceite es el refrigerante primario y se mueve por convección natural; es decir, por las diferentes densidades que tienen el aceite caliente, en contacto con la parte activa, y el aceite frío, enfriado por el refrigerante secundario. El refrigerante secundario es, en este ejemplo, el aire que rodea a la cuba del transformador, el cual circula también por convección natural. Un transformador ONAF (Fig. 5b) es un transformador en baño de aceite similar al ONAN, salvo que en este caso el aire se envía hacia la cuba mediante ventiladores (circulación forzada del aire).

Los transformadores secos, que carecen de refrigerante secundario, se designan mediante sólo dos letras. Así, un transformador AN (Figs. 2 y 3) es un transformador seco refrigerado por el aire ambiente que circula por convección natural.

En la Fig. 7 se muestran algunos de los símbolos empleados para representar transformadores. Los tres primeros se refieren a transformadores monofásicos y los tres últimos a transformadores trifásicos.

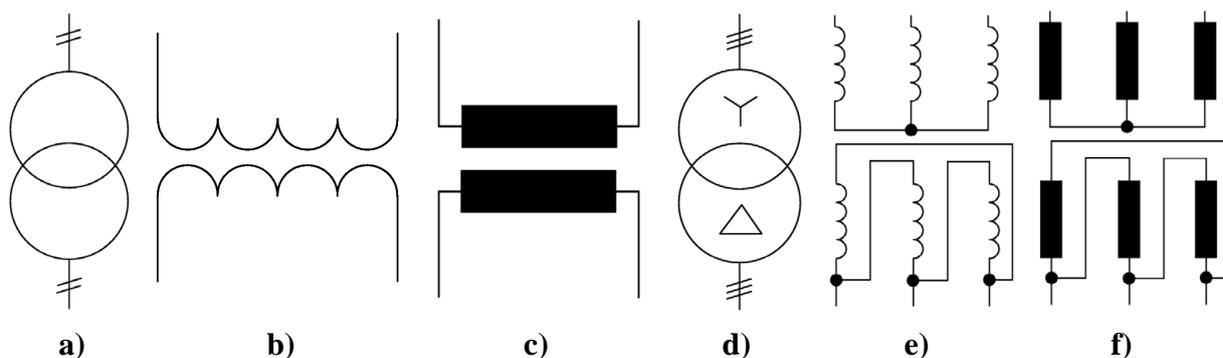


Fig. 7: Símbolos de transformadores

VALORES ASIGNADOS O NOMINALES

Las **tensiones asignadas o nominales** (V_{1N} , V_{2N}) son aquellas para las que se ha diseñado el transformador. Estas tensiones son proporcionales al número de espiras (N_1 y N_2) de cada devanado.

La **potencia asignada o nominal** (S_N) es la potencia aparente del transformador que el fabricante garantiza que no produce calentamientos peligrosos durante un funcionamiento continuo de la máquina. Los dos devanados del transformador tienen la misma potencia asignada.

Las **corrientes nominales o asignadas** (I_{1N} , I_{2N}) se obtienen a partir de las tensiones asignadas y de la potencia asignada. Así, en un transformador monofásico se tiene que:

$$S_N = V_{1N} \cdot I_{1N} = V_{2N} \cdot I_{2N} \quad (1)$$

La **relación de transformación** (m) es el cociente entre las tensiones asignadas del primario y del secundario:

$$m = \frac{V_{1N}}{V_{2N}} \quad (2)$$

Teniendo en cuenta la relación (1) y que las tensiones asignadas son proporcionales a los respectivos números de espiras, se deduce que

$$m = \frac{N_1}{N_2} = \frac{V_{1N}}{V_{2N}} = \frac{I_{2N}}{I_{1N}} \quad (3)$$

La **relación de transformación asignada** es el cociente entre las tensiones asignadas del bobinado de A.T. y del bobinado de B.T.:

$$\frac{V_{ATN}}{V_{BTN}} \quad (4)$$

Por consiguiente, en un transformador reductor la relación de transformación asignada es igual a la relación de transformación m , mientras que en un transformador elevador es igual a la inversa de m .

CIRCUITO EQUIVALENTE DE UN TRANSFORMADOR MONOFÁSICO

El circuito equivalente de un transformador representa de una manera sencilla y bastante exacta el funcionamiento de un transformador real.

Mediante esta técnica, el análisis de un transformador se va a reducir a la resolución de un sencillo circuito eléctrico de corriente alterna.