

TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS

Miguel Angel Rodríguez Pozueta

En un sistema trifásico se puede realizar la transformación de tensiones mediante un banco de tres transformadores monofásicos idénticos (Fig. 1) o mediante un transformador trifásico (Fig. 2).

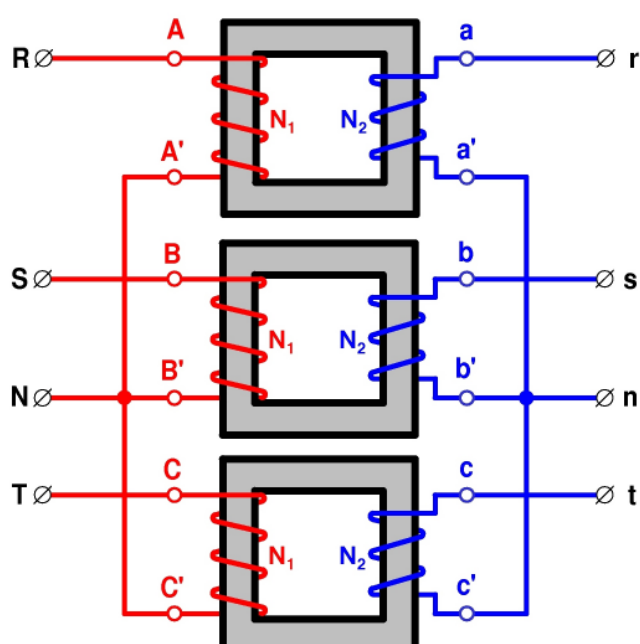


Fig. 1: Banco de tres transformadores monofásicos YNy

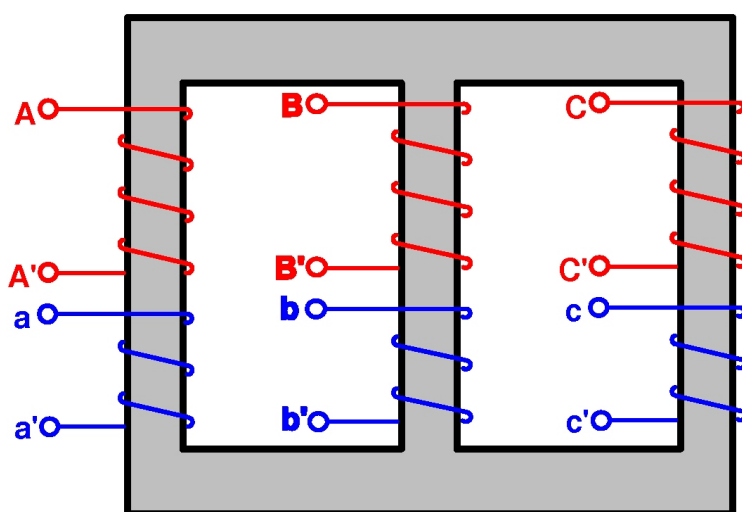


Fig. 2: Transformador trifásico de 3 columnas

Cada columna de un transformador trifásico se la puede considerar como un transformador monofásico. Así, cuando un banco o un transformador trifásico funciona con cargas equilibradas, todos los transformadores monofásicos del banco o todas las columnas del transformador están igualmente cargados y bastará con estudiar uno solo de ellos mediante su circuito equivalente. Hay que tener en cuenta, entonces, que las tensiones y corrientes a utilizar en dicho circuito equivalente deberán ser las de fase del primario y del secundario y que la potencia a emplear es la tercera parte de la total. De esta manera, todas las expresiones obtenidas anteriormente para el estudio del transformador monofásico se pueden adaptar para el estudio de las transformaciones trifásicas con cargas equilibradas (véase el formulario del final de este capítulo).

En un transformador trifásico o en un banco trifásico podemos distinguir dos **relaciones de transformación** diferentes.

La ***relación de transformación m*** es el cociente entre las tensiones nominales de *fase* del primario y del secundario:

$$m = \frac{V_{1N}}{V_{2N}} = \frac{I_{2N}}{I_{1N}} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} \approx \frac{V_1}{V_2}$$

La ***relación de transformación de tensiones m_T*** es la que normalmente se da como dato y es el cociente entre las tensiones nominales de *línea* del primario y del secundario:

$$m_T = \frac{V_{1NL}}{V_{2NL}} = \frac{I_{2NL}}{I_{1NL}} \approx \frac{V_{1L}}{V_{2L}}$$

La relación que existe entre m y m_T depende de la forma de conexión del transformador o del banco trifásico.

La **designación de los terminales** del primario y del secundario de un transformador trifásico o de un banco de tres transformadores monofásicos es así (véanse las Figs. 1 y 2 y el anexo al final de este capítulo):

- Se denominan con letras mayúsculas (A, B, C, A', B', C') los terminales del lado de alta tensión y con letras minúsculas (a, b, c, a', b', c') los del lado de baja tensión.
- Los dos terminales de la misma bobina están designados con la misma letra, aunque uno de ellos se denomina con la letra con apóstrofe (a y a', A y A', b y b', ...).
- Dos terminales, uno del primario y otro del secundario, sometidos a tensiones que están prácticamente en fase (recuérdese que en un transformador monofásico las tensiones primaria y secundaria están casi en fase) se designan con la misma letra, uno con mayúscula y otro con minúscula (a y A, a' y A', b y B, b' y B', ...).

Hay varias maneras de conectar entre sí las tres fases del primario, por un lado, y del secundario, por otro. Estas son: en **estrella** (con o sin hilo neutro) (véase la Fig. 3), **triángulo** (véase la Fig. 4) o **zig-zag** (con o sin hilo neutro) (véase la Fig. 5). En la conexión zig-zag cada una de las fases está dividida en dos mitades idénticas conectadas como se indica en la figura 5. Obsérvese en las figuras 3, 4 y 5 que hay dos formas diferentes de realizar cada uno de estos tres tipos de conexión.

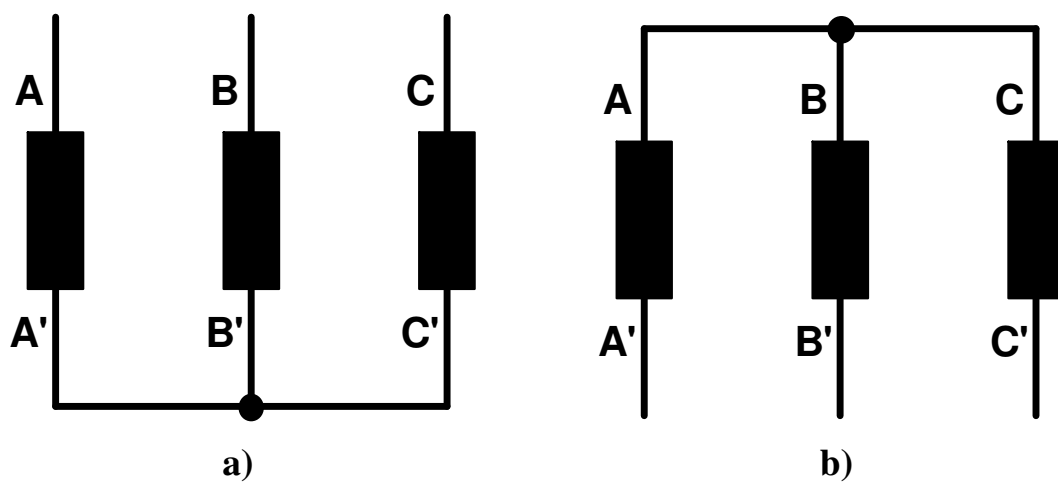


Fig. 3: Conexión estrella

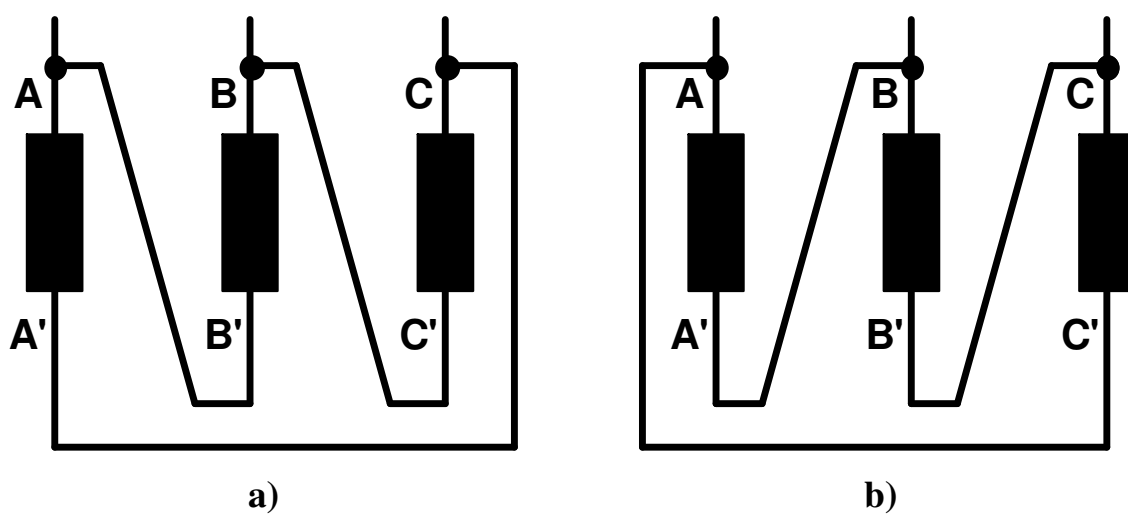


Fig. 4: Conexión triángulo

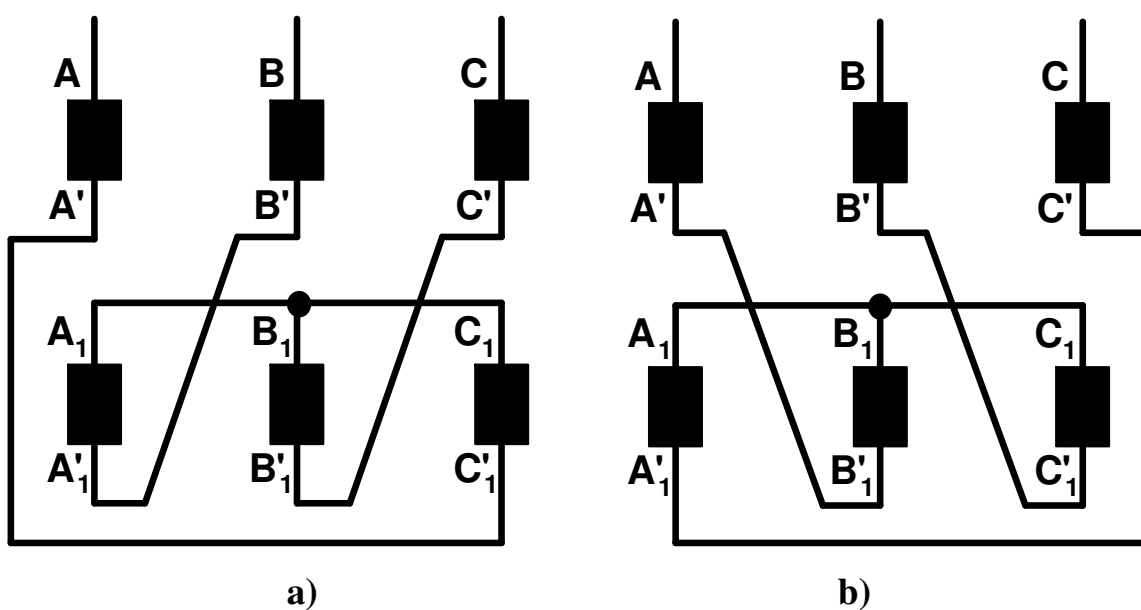


Fig. 5: Conexión zig-zag

El **índice horario** señala el desfase entre tensiones homólogas del primario y del secundario.

Las tensiones primaria y secundaria de una misma fase se las puede considerar en fase entre sí. Sin embargo, las tensiones de línea entre fases similares del primario y del secundario o las tensiones fase-neutro para fases similares primaria y secundaria pueden estar desfasadas entre sí. Téngase en cuenta, por ejemplo, que en la conexión triángulo las tensiones de línea y de fase coinciden mientras que en una estrella las tensiones de línea forman 30° con respecto a las de fase (que son iguales a las tensiones fase-neutro). Así pues, en un transformador estrella-triángulo se tiene que una tensión fase-neutro (que es la tensión de fase en estrella) del primario está en fase con una tensión de línea (que es la tensión de fase en un triángulo) del secundario y, en consecuencia, las tensiones de línea del primario y del secundario están desfasadas 30° .

Según el tipo de conexiones que se adopte en un transformador o en un banco de transformadores trifásico se pueden conseguir diferentes ángulos de desfase entre las tensiones homólogas del primario y del secundario. Este ángulo de desfase, medido en múltiplos de 30° y en el sentido de las agujas del reloj desde la tensión mayor a la tensión menor, es el ***índice horario*** del transformador.

La **designación de la forma de conexión** de un transformador se realiza por medio de dos letras y un número (por ejemplo Yy0, Dy6, Yz11, ...). La primera letra es mayúscula e indica la forma de conexión del lado de alta tensión, la segunda letra es minúscula e indica la forma de conexión en el lado de baja tensión y el número indica el índice horario. Las letras que representan la forma de conexión son:

Y, y: Estrella.

D, d: Triángulo.

Z, z: Zig-Zag.

Si una estrella o un zig-zag tienen su neutro unido a la red se coloca la letra N o n después de las letras Y, y, Z o z, respectivamente.

Así un transformador YNd5 es un transformador estrella-triángulo con índice horario 5 en el que la estrella del lado de A.T. tiene su neutro unido a la red.

TRANSFORMADORES TRIFASICOS CON CARGAS EQUILIBRADAS

* Potencia nominal, intensidades y tensiones:

$$S_N = 3 \cdot I_{1N} \cdot V_{1N} = 3 \cdot I_{2N} \cdot V_{2N} = \sqrt{3} \cdot I_{1NL} \cdot V_{1NL} = \sqrt{3} \cdot I_{2NL} \cdot V_{2NL}$$

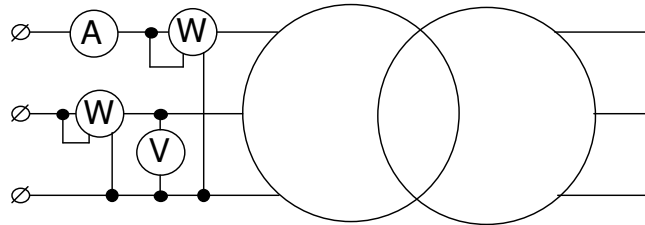
Estrella: $I = I_L$ $V = \frac{V_L}{\sqrt{3}}$

Triángulo: $I = \frac{I_L}{\sqrt{3}}$ $V = V_L$

Zig-zag: $I = I_L$ $V = \frac{V_L}{\sqrt{3}}$

En cada semidevanado: $V' = \frac{V}{\sqrt{3}} = \frac{V_L}{3}$

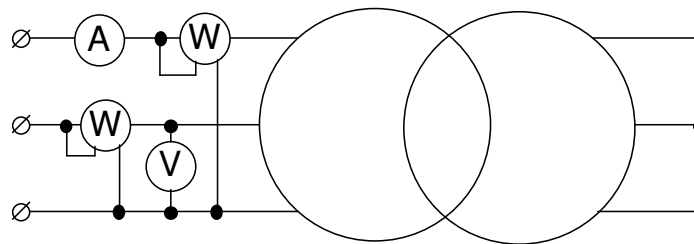
* Ensayo de vacío:



Medidas: V_{1NL} I_{0L} P_0

$$P_0 = P_{Fe} = 3 \cdot I_{Fe}^2 \cdot R_{Fe} = 3 \cdot I_{Fe} \cdot V_{1N} = 3 \cdot V_{1N} \cdot I_0 \cdot \cos \varphi_0 = \sqrt{3} \cdot V_{1NL} \cdot I_{0L} \cdot \cos \varphi_0$$

* Ensayo de cortocircuito:



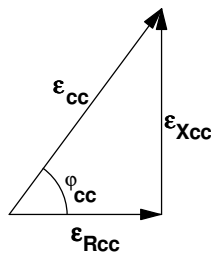
Medidas: V_{1ccL} I_{1NL} P_{cc} (Si el ensayo es a I_{1NL})

$$P_{cc} = P_{CuN} = 3 \cdot I_{1N}^2 \cdot R_{cc} = 3 \cdot V_{1cc} \cdot I_{1N} \cdot \cos \varphi_{cc} = \sqrt{3} \cdot V_{1ccL} \cdot I_{1NL} \cdot \cos \varphi_{cc}$$

Si el ensayo no es a I_{1NL} , se miden $V_{1cortol}$ $I_{1cortol}$ P_{corto}

$$V_{1ccL} = V_{1cortol} \frac{I_{1NL}}{I_{1cortol}} \quad P_{cc} = P_{corto} \left(\frac{I_{1NL}}{I_{1cortol}} \right)^2$$

* **Tensiones relativas de cortocircuito:**



$$\epsilon_{cc} = \frac{V_{1cc}}{V_{1N}} \cdot 100 = \frac{V_{1ccL}}{V_{1NL}} \cdot 100 = \frac{Z_{cc} \cdot I_{1N}}{V_{1N}} \cdot 100$$

$$\epsilon_{Rcc} = \frac{R_{cc} \cdot I_{1N}}{V_{1N}} \cdot 100 = \frac{P_{cc}}{S_N} \cdot 100 = \epsilon_{cc} \cdot \cos \varphi_{cc}$$

$$\epsilon_{Xcc} = \frac{X_{cc} \cdot I_{1N}}{V_{1N}} \cdot 100 = \sqrt{\epsilon_{cc}^2 - \epsilon_{Rcc}^2} = \epsilon_{cc} \cdot \sin \varphi_{cc}$$

* **Índice de carga:**

$$C = \frac{S}{S_N} = \frac{I_2}{I_{2N}} = \frac{I_{2L}}{I_{2NL}} = \frac{I'_2}{I'_{2N}} = \frac{I'_2}{I_{1N}} = \frac{I'_{2L}}{I_{1NL}} \approx \frac{I_1}{I_{1N}} = \frac{I_{1L}}{I_{1NL}}$$

* **Potencias y rendimiento:**

$$P_{Cu} = C^2 \cdot P_{CuN} \qquad P_{CuN} = P_{cc} = S_N \cdot \frac{\epsilon_{Rcc}}{100}$$

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_{Fe} + P_{Cu}} = \frac{C \cdot S_N \cdot \cos \varphi_2}{C \cdot S_N \cdot \cos \varphi_2 + P_{Fe} + C^2 \cdot P_{CuN}}$$

$$\eta = \eta_{Máx} \rightarrow P_v = P_f \rightarrow P_{Cu} = P_{Fe} \rightarrow C_{opt} = \sqrt{\frac{P_{Fe}}{P_{CuN}}} = \sqrt{\frac{P_0}{P_{cc}}}$$

* **Fallo o falta de cortocircuito:**

$$I_{1 \text{ falta}} = I_{1N} \cdot \frac{100}{\epsilon_{cc}}$$

$$I_{1 \text{ faltaL}} = I_{1NL} \cdot \frac{100}{\epsilon_{cc}}$$

$$I_{2 \text{ falta}} = I_{2N} \cdot \frac{100}{\epsilon_{cc}}$$

$$I_{2 \text{ faltaL}} = I_{2NL} \cdot \frac{100}{\epsilon_{cc}}$$

* **Caídas de tensión:**

$$\frac{V_1 - V'_2}{V_{1N}} \cdot 100 = \frac{V_{1L} - V'_{2L}}{V_{1NL}} \cdot 100 = C [(\epsilon_{Rcc} \cdot \cos \varphi_2) \pm (\epsilon_{Xcc} \cdot \sin \varphi_2)]$$

Cargas inductivas: signo +

Cargas capacitivas: signo -

Regulación:

$$\epsilon_C = \frac{V_{20} - V_2}{V_{20}} \cdot 100 = \frac{V_{1N} - V'_2}{V_{1N}} \cdot 100$$

$$\epsilon_C = \frac{V_{20L} - V_{2L}}{V_{20L}} \cdot 100 = \frac{V_{1NL} - V'_{2L}}{V_{1NL}} \cdot 100$$

(V_{20L} = Tensión secundaria de línea en vacío = V_{2NL})

ANEXO

DESIGNACIÓN DE LOS BORNES DE UN TRANSFORMADOR SEGÚN LA NORMA UNE 20158

La designación de los terminales de un transformador descrita anteriormente ha sido modificada de forma importante por la norma UNE 20158.

Según esta norma los extremos y las tomas de los devanados de un transformador trifásico se designan mediante tres caracteres (véase la Fig. 9):

- El primer carácter es una cifra que indica si el arrollamiento es de alta o baja tensión. El 1 se usa para A.T. y el 2 para B.T. Si hay más arrollamientos se usarán las cifras 3, 4, 5, etc. en orden decreciente de tensión.
- El segundo carácter es una letra (preferentemente mayúscula) que indica las fases de un arrollamiento. Se usan las letras U, V y W para las fases y, si es preciso, el neutro se marca con la letra N. (En los transformadores monofásicos no se incluye esta letra y se sustituye por un punto para separar los otros dos caracteres, que son cifras).
- El tercer carácter es una cifra que indica los extremos y las tomas de los arrollamientos de fase. Los extremos de las fases se marcan con las cifras 1 y 2. Las tomas intermedias se señalan con las cifras 3, 4, 5, etc. empezando por la toma más cercana al extremo designado con un “1” (véase la Fig. 6).

En un transformador *monofásico* los bornes accesibles desde el exterior corresponden a los dos extremos de cada devanado. Por lo tanto, se designan de igual manera que estos extremos que, como se ha indicado más arriba, es mediante dos cifras separadas por un punto (véanse las Figs. 7a y 7b).

La Fig. 7c se refiere a un *autotransformador monofásico* donde el borne común se designa con un “2”. Este borne es a la vez el 1.2 y el 2.2.

Los bornes que son accesibles en la cuba de un transformador *trifásico* normalmente no se corresponden con los dos extremos de todas las fases de los lados de A.T. y B.T. Las conexiones entre las fases se realiza en el interior y en el exterior sólo son accesibles los bornes de línea de las tres fases de cada lado y, en su caso, el neutro. Por lo tanto, los bornes de un transformador trifásico se indican con sólo los dos primeros caracteres, usando la letra N para el neutro cuando sea preciso (véase la Fig. 8). En la Fig. 9 se indica la nomenclatura de los extremos de las fases de los devanados de un transformador trifásico.

La Fig. 10 muestra el marcado de un *autotransformador trifásico* donde el borne común se designa con una “N”. Este borne es a la vez el 1N y el 2N.

De acuerdo con todo lo anterior, la correspondencia entre la designación de los extremos de las fases según la nomenclatura antigua y la correspondiente a la norma UNE 20158 es la siguiente (véanse las Figs. 2 y 9):

Designación	Alta Tensión (A.T.)						Baja Tensión (B.T.)					
	Fase R		Fase S		Fase T		Fase R		Fase S		Fase T	
Antigua	A	A'	B	B'	C	C'	a	a'	b	b'	c	c'
UNE 20158	1U1	1U2	1V1	1V2	1W1	1W2	2U1	2U2	2V1	2V2	2W1	2W2

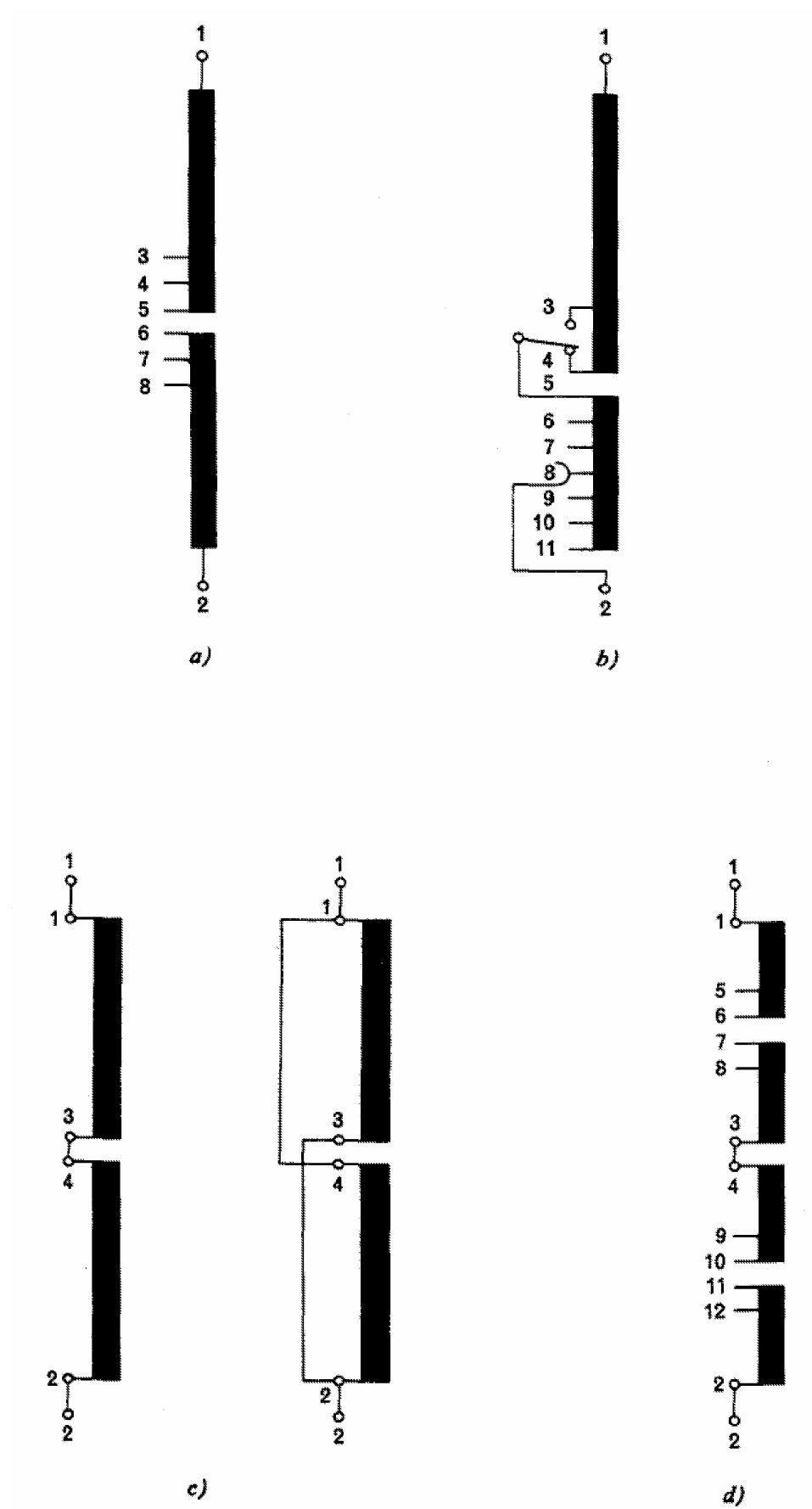


Fig. 6: Cifras que designan los extremos y las tomas intermedias de las fases

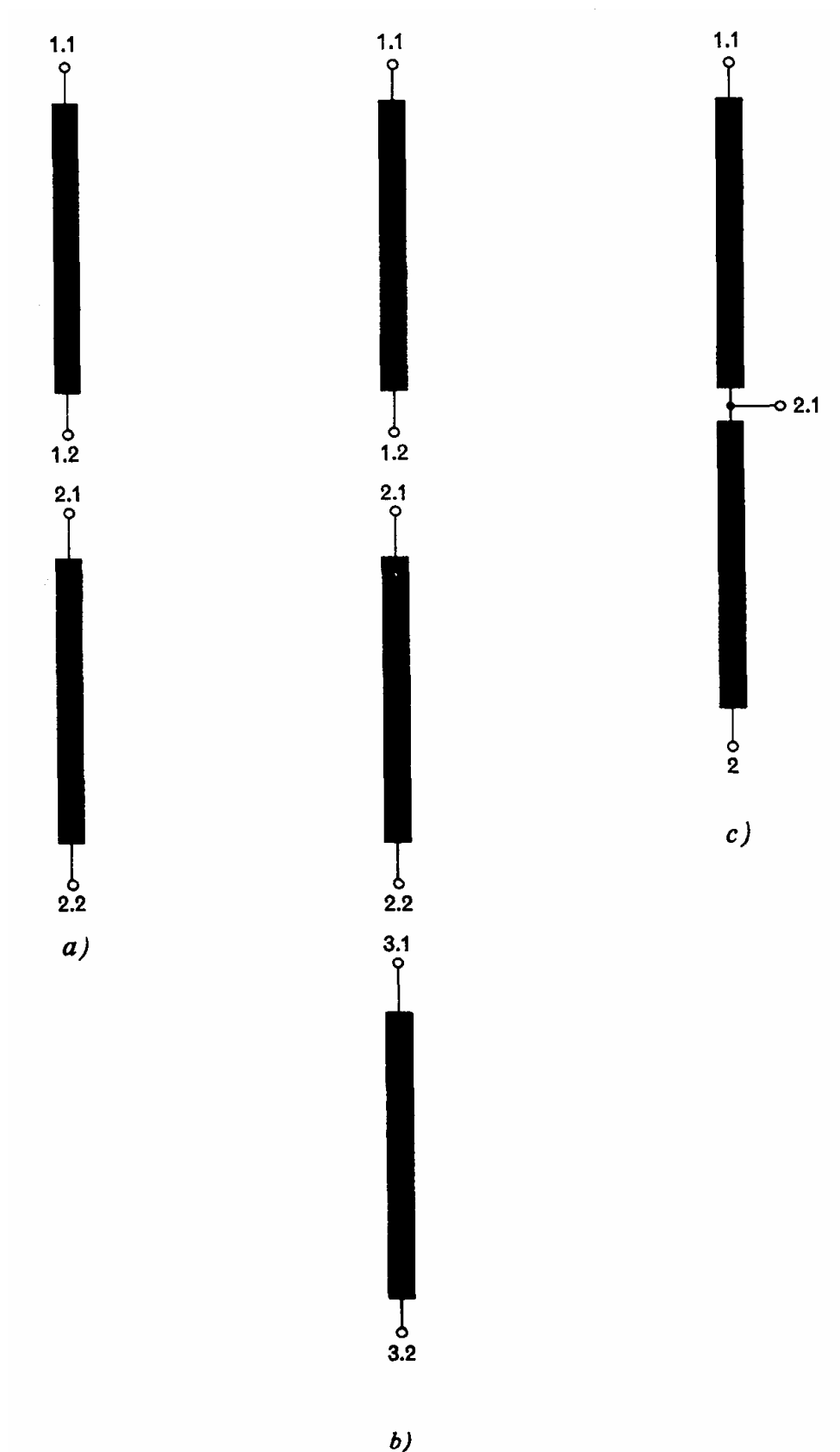
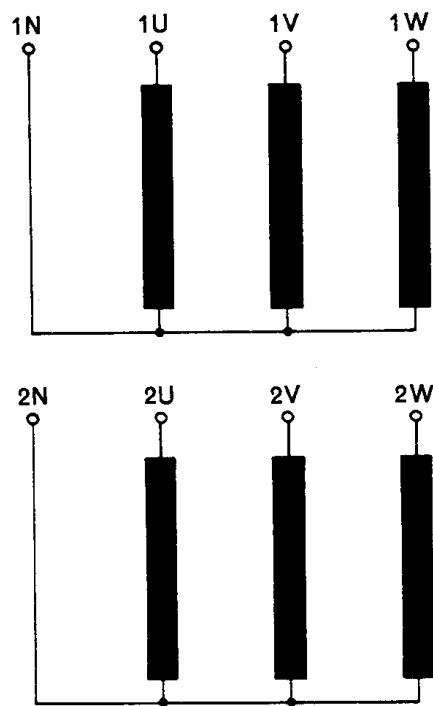
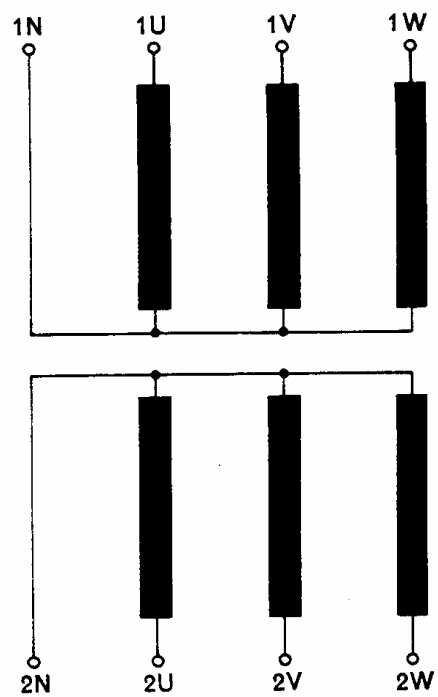


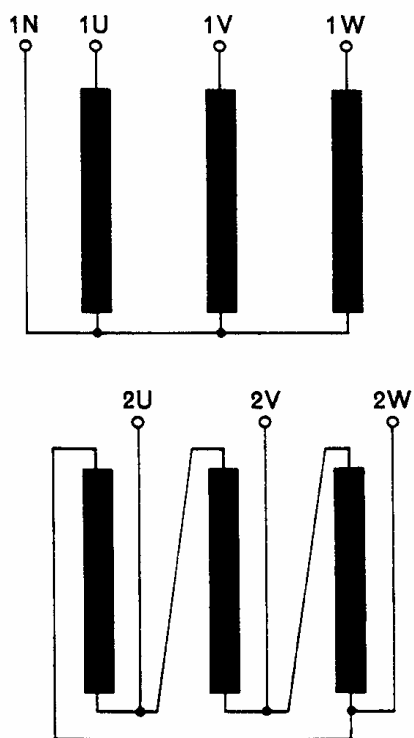
Fig. 7: Marcado de transformadores monofásicos:
 a) Transformador de dos arrollamientos sin tomas
 b) Transformador de tres arrollamientos sin tomas
 c) Autotransformador sin tomas



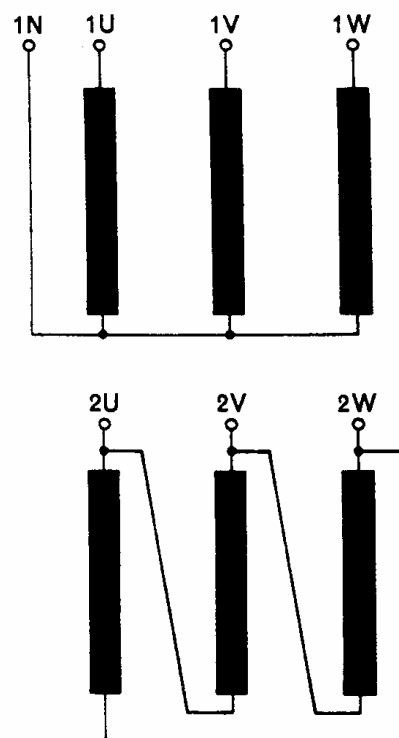
a) YN, yn0



b) YN, yn6



c) YN, d5



d) YN, d11

Fig. 8: Marcado de transformadores trifásicos de dos arrollamientos

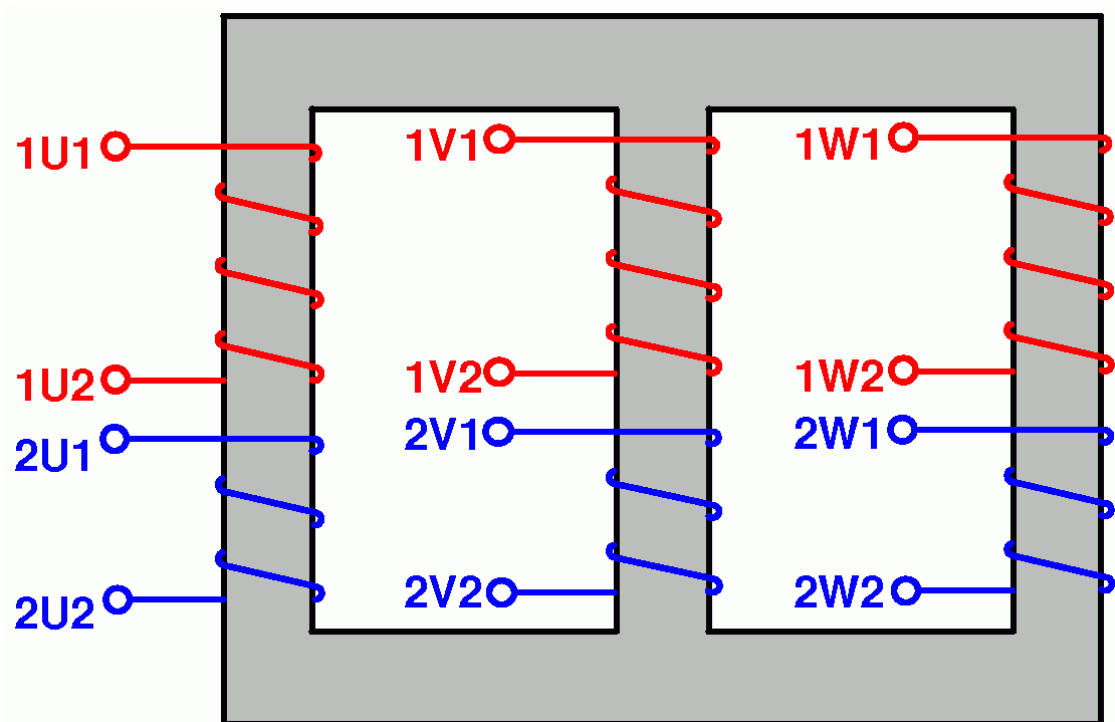


Fig. 9: Marcado de los extremos de los devanados de un transformador trifásico

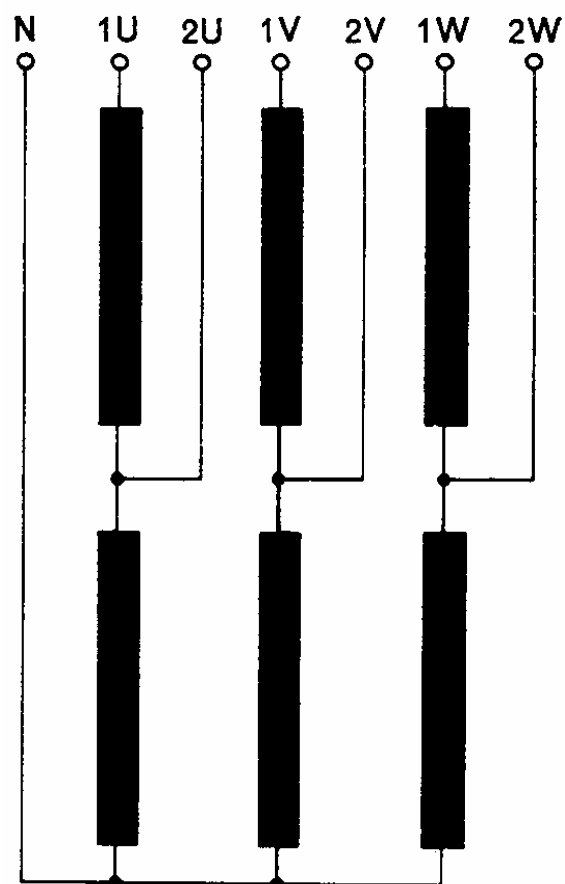


Fig. 10: Marcado de un autotransformador trifásico