



UNIVERSIDAD DE SALAMANCA  
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE  
INGENIERÍA INDUSTRIAL

Avda. Fernando Ballesteros,2  
37700 BÉJAR  
Telf. 923 40 80 80

ÁREA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

# TECNOLOGÍA DE PRODUCCIÓN Y FABRICACIÓN

ASIGNATURA OBLIGATORIA DE  
4º CURSO DEL GRADO EN  
INGENIERÍA ELÉCTRICA

APUNTES Y MATERIALES PARA SEGUIR LA ASIGNATURA

Prof. Norberto Redondo Melchor  
Ingeniero Industrial  
Doctor por la Universidad de Salamanca



## ÍNDICE

### **I. PRODUCCIÓN INDUSTRIAL**

#### **1 Evolución de los sistemas de producción**

#### **2 Procesos de producción**

- 2.1 Representación analítica y mediante diagramas
- 2.2 Tipos de producción según el producto y el proceso

#### **3 Distribución espacial**

- 3.1 Distribución funcional por talleres
- 3.2 Disposición orientada al producto o en flujo
- 3.3 Disposiciones derivadas

### **II. PRINCIPALES PROCESOS DE FABRICACIÓN**

#### **1 Procedimientos básicos de formación de piezas**

- 1.1 Moldeo en fase fluida y sólida
  - 1.1.1 Extrusión
  - 1.1.2 Inyección de plásticos
  - 1.1.3 Inyección de elastómeros
  - 1.1.4 Moldeo por soplado
  - 1.1.5 Sobremoldeo
  - 1.1.6 Espumas
  - 1.1.7 Moldeo por vacío
  - 1.1.8 Flotación
  - 1.1.9 Laminado
  - 1.1.10 Sinterizado
- 1.2 Deformación plástica
  - 1.2.1 Prensado
  - 1.2.2 Calandrado
  - 1.2.3 Forjado
  - 1.2.4 Estirado y recalado
  - 1.2.5 Estampado
  - 1.2.6 Plegado
  - 1.2.7 Embutición
  - 1.2.8 Cizallado
  - 1.2.9 Troquelado
  - 1.2.10 Repulsado
- 1.3 Mecanizado por arranque de material
  - 1.3.1 Torneado
  - 1.3.2 Fresado
  - 1.3.3 Taladrado
  - 1.3.4 Otras operaciones habituales
- 1.4 Mecanizado no convencional



- 1.4.1 Electroerosión EDM
- 1.4.2 Grabado y corte por láser
- 1.4.3 Haz de electrones
- 1.4.4 Plasma

## **2 Tratamiento superficial**

- 2.1 Acabados
- 2.2 Recubrimientos
  - 2.2.1 Pintado
  - 2.2.2 Electrodeposición
  - 2.2.3 Recubrimiento por lecho fluidificado
  - 2.2.4 Impresión

## **3 Procesado mediante máquinas de control numérico**

- 3.1 CNC (*Computer Numerical Control*)
- 3.2 *Geometric Code*
  - 3.2.1 Estructura básica de un archivo G-code
  - 3.2.2 Los comandos G-code más comunes

## **4 Montaje**

- 4.1 Uniones permanentes
  - 4.1.1 Adhesivos
  - 4.1.2 Termofusión
  - 4.1.3 Soldadura
- 4.2 Uniones desmontables
  - 4.2.1 Remaches
  - 4.2.2 Encaje a presión
  - 4.2.3 Otras uniones desmontables

## **5 Metrotecnia básica**

- 5.1 Definiciones usuales
- 5.2 Sistema Internacional de unidades (SI)
- 5.3 Medidas

# **III. FABRICACIÓN DE TRANSFORMADORES**

## **1 Teoría general de los transformadores**

- 1.1 Conceptos básicos
- 1.2 Pérdidas de los transformadores
- 1.3 Modelo eléctrico del transformador y ensayos de vacío y cortocircuito
- 1.4 Transformadores trifásicos
- 1.5 Conexiones entre devanados
- 1.6 Placa de características

## **2 Diseño de transformadores**

- 2.1 Partes de un transformador trifásico
- 2.2 Requisitos de diseño
- 2.3 Diseño del núcleo
- 2.4 Diseño de los bobinados



- 2.5 Conexiones entre bobinados y cambiadores de tomas
- 2.6 Pérdidas
- 2.7 Diseño de la cuba
- 2.8 Diseño de la refrigeración
- 2.9 Diseño de la tapa
- 2.10 Características finales aproximadas
- 2.11 Accesorios

### **3 Laboratorio y ensayos**

- 3.1 Resistencia de los devanados
- 3.2 Ensayo en vacío
- 3.3 Ensayo en cortocircuito

## **IV. FABRICACIÓN DE CUADROS ELÉCTRICOS**

### **1 Funciones y componentes de los cuadros eléctricos**

- 1.1 Aparamenta de protección
  - 1.1.1 Contra sobreintensidades
  - 1.1.2 Contra defectos a tierra
  - 1.1.3 Contra sobretensiones
  - 1.1.4 Diseño de protecciones eléctricas

### **2 Esquemas unifilares y esquemas desarrollados**

- 2.1 Esquemas unifilares de cuadros de protecciones
  - 2.1.1 Simbología habitual
  - 2.1.2 Criterios de diseño
  - 2.1.3 Diseño de cuadros de protecciones
  - 2.1.4 Ejemplo de diseño
- 2.2 Esquemas desarrollados
  - 2.2.1 Simbología habitual de potencia
  - 2.2.2 Simbología habitual de automatismos y control
  - 2.2.3 Reglas de dibujo
  - 2.2.4 Reglas de referenciado de aparatos
  - 2.2.5 Referenciado de los borneros
  - 2.2.6 Cableado

### **3 Diseño de armarios eléctricos**

- 3.1 Condiciones generales
- 3.2 Diseño de embarrados
  - 3.2.1 Densidad de corriente
  - 3.2.2 Esfuerzos electromecánicos
- 3.3 Cableado interno
- 3.4 Buenas prácticas

### **4 Uso de aplicaciones de terceros**

- 4.1 HagerCAD.project de HAGER
- 4.2 XL Pro3 de LEGRAND



Fuentes de las imágenes y referencias utilizadas cuyo origen no se identifica con detalle en el texto:

- [BHL] BHARAT HEAVY ELECTRICALS LIMITED, *Transformers 2ª ed*, McGraw Hill, Nueva Deli 2003.
- [CHP] CHAPMAN, STEPHEN J., *Máquinas eléctricas 2ª ed.*, McGraw Hill, Colombia 1998.
- [COR] CORRALES MARTÍN, JUAN, *Teoría, cálculo y construcción de transformadores*, Editorial Labor S.A., Barcelona 1969.
- [FMX] FARAMAX TRAF0 S.A., fabricante de transformadores de gran potencia y reactancias controladas, Malpartida de Plasencia (Cáceres - España).
- [GED] TRANSFORMADORES GEDELSA S.A., fabricante de transformadores de distribución y mediana potencia, Salamanca (España).
- [JFM] FRAILE MORA, JESÚS, *Máquinas eléctricas 5ª ed.*, McGraw Hill, Madrid 2003.
- [KHA] MAHDI KHANALI, SHESHA H. JAYARAM, *Effectiveness of Electrostatic Shielding in Suppressing the Impact of Fast Transients on Transformer Insulation*, 2015 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena.
- [KOS] KOSTENKO, M. y PIOTROVSKI, L., *Máquinas eléctricas vol.1*, Montaner y Simón S.A., Barcelona 1968.
- [MOE] MOELLER, F., KÜBLER, E. y WERR, TH., *Electrotecnia general y aplicada. Máquinas de corriente continua. Máquinas de corriente alterna (incluso transformadores)*, Editorial labor S.A., Barcelona 1961.
- [YAN] Yangli Ou y otros, *Research on axial dynamic process of power transformer windings under short-circuit shock*, Frontiers in Energy Research, vol. 13, 17 julio 2025, <https://doi.org/10.3389/fenrg.2025.1623160>
- [WKP] WIKIPEDIA, accesible desde Internet.

[ ] Si no se indica nada, son de elaboración propia.

### III. FABRICACIÓN DE TRANSFORMADORES

#### 1 TEORÍA GENERAL DE LOS TRANSFORMADORES

##### 1.1 Conceptos básicos

Un transformador es una máquina eléctrica que permite pasar potencia eléctrica entre dos circuitos distintos sin contacto eléctrico entre ellos. En lugar de ese contacto eléctrico se utiliza un campo magnético. La técnica básica se estudia en Teoría de circuitos como acoplamiento magnético. Aquí veremos su fundamento físico.

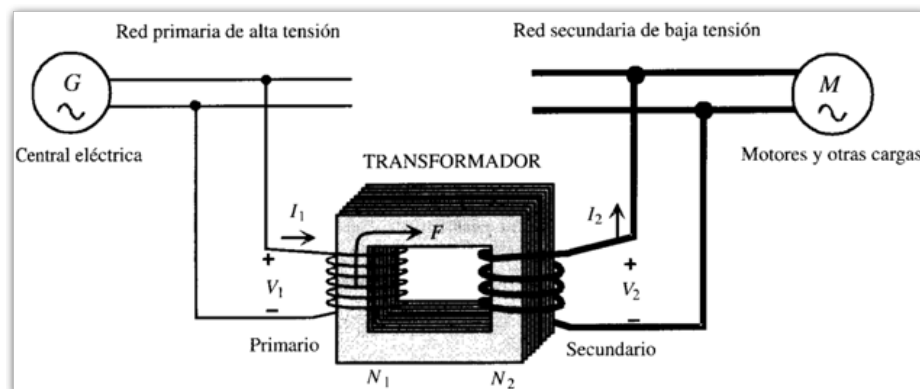


Fig. 1 Transformador monofásico intercambiando energía entre dos circuitos distintos. [JFM]

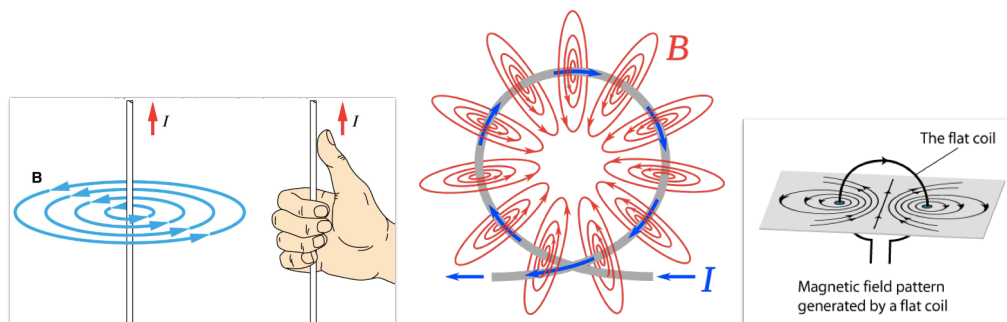


Fig. 2 Campo magnético creado por cualquier corriente al recorrer un hilo y una espira. [WKP]

La ley de Ampère establece que toda corriente eléctrica genera en su entorno un campo magnético perpendicular y proporcional a ella.

La regla de la mano derecha indica el sentido de la corriente y del campo magnético.

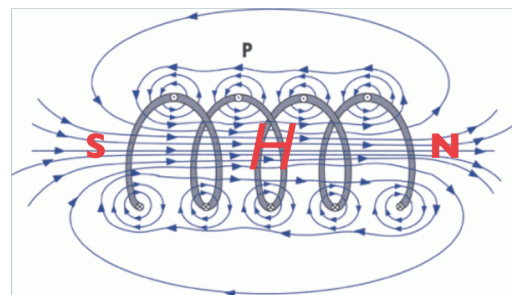


Fig. 3 Varias espiras forman un solenoide. [WKP]

En su forma diferencial se expresa como que la circulación del campo  $H$  a lo largo de una curva cerrada  $\gamma$  es igual a la densidad de corriente total  $J$  que atraviesa el área  $S$  de dicha curva. Es decir,

$$\oint_{\gamma} \vec{H} \cdot d\vec{\ell} = \int_S \vec{J} \cdot d\vec{s}$$

Por la forma del solenoide, el campo magnético en su interior es un tubo de líneas de fuerza mu densas, es decir, un campo de fuerza magnética  $H$  axial (Fig. 4). Entonces la ley de Ampère se simplifica en

$$H \cdot \ell = N \cdot i; \quad H = \frac{N \cdot i}{\ell}$$

lo que se lee diciendo que el campo magnético  $H$  es directamente proporcional a la intensidad  $i$  de la corriente eléctrica que lo crea y al número  $N$  de vueltas del solenoide, e inversamente proporcional a su longitud  $\ell$ . Es habitual encontrar en la bibliografía más antigua que se mide en amperio vueltas por metro (Av/m) aunque en el sistema internacional la unidad que le corresponde es el amperio por metro (A/m).

Añadiendo material ferromagnético al interior del solenoide (Fig. 5) el campo  $H$  puede crecer en magnitud miles de veces. Se crea así un campo  $B$  (T, Teslas) inducido a partir de  $H$  tan solo por la presencia del núcleo.

La relación entre ambos es

$$B = \mu H$$

y el coeficiente  $\mu$  es la *permeabilidad magnética relativa* del material. Es relativa respecto del aire (o del vacío).

No es un valor constante, por lo que para describir correctamente la relación entre  $B$  y  $H$  hay que indicar una curva, que siempre tendrá una zona horizontal o de saturación (Fig. 6).

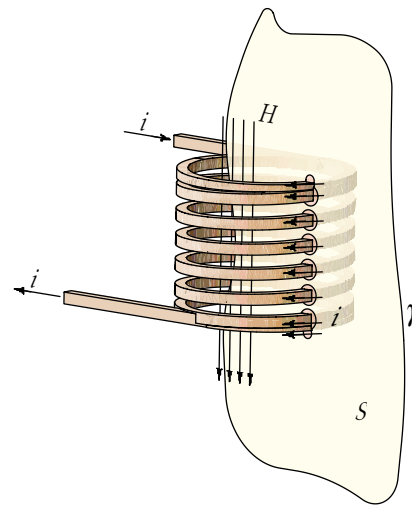


Fig. 4 Campo magnético  $H$  creado por la corriente  $i$  al recorrer el solenoide.

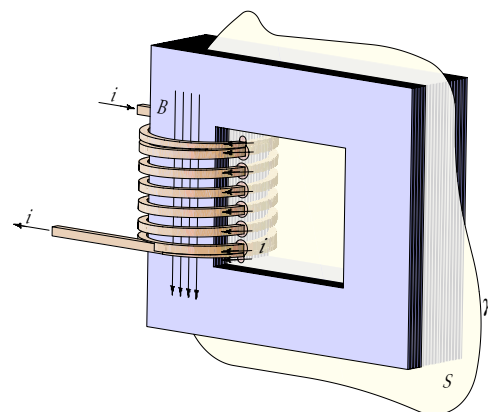


Fig. 5 Campo magnético inducido  $B$  creado a partir de  $H$  al insertar un núcleo ferromagnético.

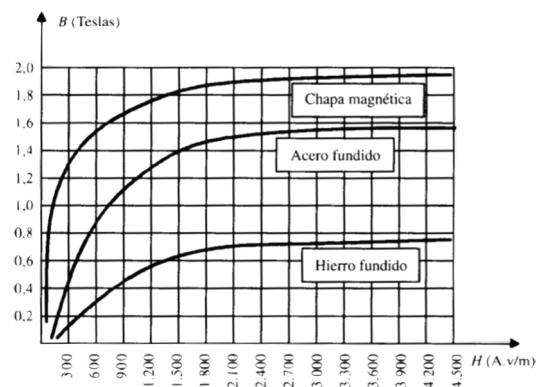


Fig. 6 Relación entre  $B$  y  $H$  para diferentes valores de  $\mu$ . [JFM]

El flujo magnético  $\Phi$  (Wb, Weber) a través de una superficie  $S$  es el producto escalar de ambas magnitudes vectoriales:

$$\Phi = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{s} = B S \cos\alpha$$

Esa definición se suele leer como que el flujo  $\Phi$  a través de  $S$  es el número de líneas de fuerza magnética que atraviesan en perpendicular a  $S$ . El ángulo  $\alpha$  es el que forman los vectores del campo  $B$  y el normal a la superficie  $S$ .

Como  $B$  proviene de  $H$ , que a su vez depende de la intensidad de la corriente aplicada al solenoide, la relación entre la corriente eléctrica y el flujo magnético que produce la fija la forma del solenoide a través de su longitud, sección, número de vueltas y material del núcleo:

$$B = \mu H = \mu \frac{N \cdot i}{\ell}; \quad \Phi = B S \cos\alpha = \mu \frac{N \cdot i}{\ell} S$$

(para una  $S$  perpendicular al flujo en el interior del solenoide).

Si definimos ahora *reluctancia magnética* como

$$\mathcal{R} = \frac{1}{\mu \frac{S}{\ell}} = \frac{\ell}{\mu S}$$

y *fuerza magnetomotriz* como

$$\mathcal{F} = N \cdot i$$

llegamos a la *ley de Hopkinson*, que es la análoga a la ley de Ohm pero para los circuitos magnéticos:

$$\mathcal{F} = \mathcal{R} \Phi$$

Esta ley puede leerse como que la fuerza magnetomotriz  $\mathcal{F}$  es la que consigue hacer circular un flujo magnético  $\Phi$  a lo largo de un núcleo ferromagnético de reluctancia  $\mathcal{R}$ .

Por esta analogía entre circuitos eléctricos y magnéticos no pocos casos de diseño de circuitos magnéticos (núcleos de máquinas eléctricas) se resuelven usando técnicas básicas de Teoría de Circuitos.

La recíproca de la ley de Ampère no siempre es cierta: no todo campo magnético crea una corriente eléctrica. La *ley de Faraday* dice que sólo crean corrientes eléctricas los campos magnéticos variables con el tiempo.

Lenz completó esta ley añadiendo el signo menos, que indica que la tensión inducida dará lugar a una corriente (cuando se cierre la espira) que por la ley de Ampère producirá una corriente cuyo campo magnético se opondrá al que la indujo.

Numéricamente la tensión inducida  $e$  (V) valdrá

$$e = - \frac{d\Phi}{dt}$$

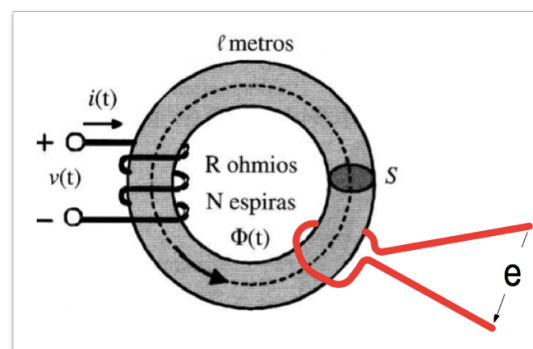


Fig. 7 Tensión inducida  $e$ (V) en la espira de hilo rojo cuando  $\Phi$  varía con el tiempo. [JFM]

En la disposición habitual de un transformador monofásico con un buen núcleo ferromagnético, se intenta inducir un flujo variable  $\Phi_1$  utilizando un devanado (Fig. 8) y una fuente de tensión alterna sinusoidal aplicada al nudo 1 de valor máximo  $V_m$  y eficaz  $V$ , con pulsación  $\omega = 2\pi f$  :

$$v_1 = V_m \cos \omega t = \sqrt{2} V \cos \omega t$$

En un segundo devanado (Fig. 9) daría lugar a una tensión inducida  $e_2$  de valor

$$e_2 = -N_2 \frac{d\Phi_1}{dt}$$

según la ley de Faraday-Lenz.

Esa es la tensión que se podría medir como  $v_2$  (Fig. 10) en sus bornas. La resistencia  $R_2$  es la del hilo del devanado, que en las máquinas eléctricas es siempre muy pequeña.

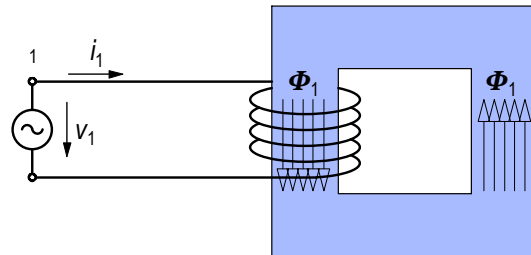


Fig. 8 Flujo esperado según la ley de Ampère.

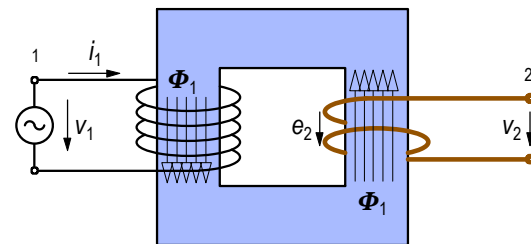


Fig. 9 Tensión  $e_2$  inducida en el segundo devanado.

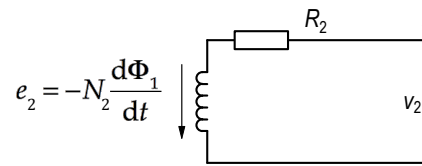


Fig. 10 Si no circula intensidad por el secundario la tensión  $v_2$  es también  $e_2$ .

Veamos ahora otro fenómeno que ocurre simultáneamente y es de la mayor importancia. En la Fig. 9 ¿hay solo un devanado afectado por el flujo magnético o hay dos? En efecto, el devanado de la derecha no es el único afectado por un flujo magnético variable con el tiempo: el devanado de la izquierda también lo está. El que este devanado sea el que crea el flujo magnético variable con el tiempo ¿no lo libera de sufrir también sus efectos!.

Y así ocurre: en el devanado de la izquierda aparece una tensión inducida según la ley de Faraday que, por el signo de Lenz, tendrá una polaridad tal que, al estar cerrado (a través de la fuente  $v_1$ ) tenderá a crear una corriente que, a su vez (ley de Ampère) producirá un flujo  $\Phi_1'$  opuesto al primero.

El resultado de ambos flujos antagónicos es el flujo neto  $\Phi$  que, por ilustrar la explicación, aparece en la Fig. 11 como resultado de  $\Phi_1$  contra  $\Phi_1'$ .

El resultado es que la fuente trata de hacer circular una corriente de gran intensidad, capaz de crear un gran flujo magnético  $\Phi_1$ , pero el propio circuito se lo impide y solo resulta producido  $\Phi_1 - \Phi_1' = \Phi$ .

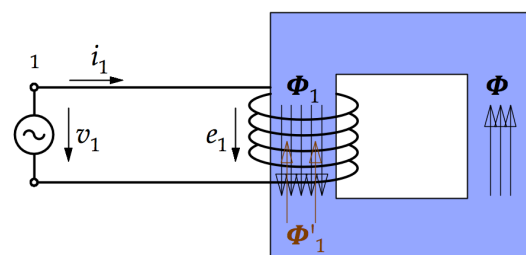


Fig. 11 Ambos flujos ("inicial" y "autoinducido") se contrarrestan, resultando el flujo neto  $\Phi$ .

En algunos libros este efecto se explica como el flujo *desmagnetizante* que el devanado induce sobre sí mismo, pero el resultado es el mismo: el flujo nunca es tan grande como cabía esperar. Veamos:

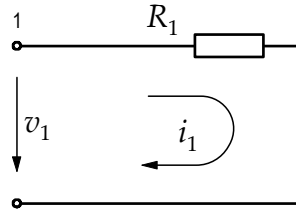


Fig. 12 El flujo creado por la corriente limitada únicamente por  $R_1$  es mayor que el que realmente se produce

Si en el circuito al que se aplica  $v_1$  solo hubiera la resistencia  $R_1$  del hilo del solenoide, la intensidad  $i_1$  sería muy grande, lo que daría lugar a una fuerza magnetomotriz  $\mathcal{F}_1 = N \cdot i_1$  muy grande también. Como la reluctancia  $\mathcal{R}$  del núcleo no ha variado, la ley de Hopkinson  $\mathcal{F}_1 = \mathcal{R} \Phi_1$  indica que el flujo  $\Phi_1$  resultaría también muy grande:

$$\mathcal{F}_1 = \mathcal{R} \Phi_1; \quad \Phi_1 = \frac{\mathcal{F}_1}{\mathcal{R}} = \frac{N \cdot i_1}{\mathcal{R}}$$

Sin embargo se comprueba que el flujo  $\Phi$  realmente producido siempre es más pequeño por causa de ese otro flujo desmagnetizante autoinducido, lo que razonando hacia atrás significa que la fuerza magnetomotriz también será más pequeña y que no ha de circular tanta intensidad como se esperaba. Es decir, aparece otra razón, además de  $R_1$ , que está limitando la intensidad  $i_1$ .

De hecho, en los solenoides habituales de uso industrial la intensidad  $i_1$  es *increíblemente pequeña*, lo que indica que esa *otra razón* es un obstáculo formidable contra la circulación de corriente por los devanados.

Ahora ya sabemos que ese obstáculo lo causa la aparición de la tensión opuesta  $e_1$  dada por la ley de Faraday-Lenz (Fig. 13) debida al flujo neto  $\Phi$ .

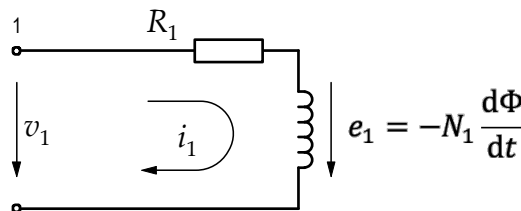


Fig. 13 Tensión autoinducida en el devanado de la izquierda.

En Teoría de Circuitos este fenómeno, es decir, esta aparición de un *obstáculo* al paso de la corriente, se modela añadiendo una *impedancia* extra: además de la mera resistencia óhmica del hilo conductor del devanado se introduce otra impedancia más que reduce el valor de la corriente que pasa a través del solenoide a los valores reales, menores que los que la sola resistencia permitiría explicar (Fig. 14).

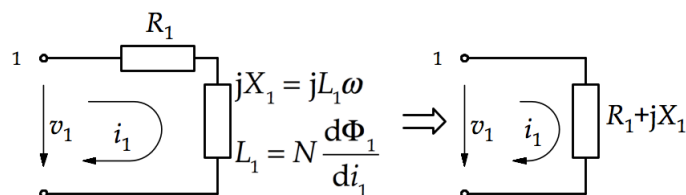


Fig. 14 La impedancia  $jX_1$  es fruto de la autoinducción del devanado 1 (inducción sobre sí mismo).

Esa impedancia se la hace depender del llamado *coeficiente de autoinducción*  $L$ , que a la vista de los fenómenos que trata de modelar, es un nombre plenamente justificado (*auto-inducción, self-induction*).

El coeficiente de autoinducción es aquel que proporciona una impedancia tal que cuando es recorrida por la corriente de intensidad  $i_1$  da lugar a la tensión de Faraday-Lenz  $e_1$ . Por tanto

$$e_1 = -N_1 \frac{d\Phi}{dt} = -N_1 \frac{d\Phi}{dt} \frac{di_1}{di_1} = L_1 \frac{di_1}{dt} \quad \text{con} \quad L_1 = -N_1 \frac{d\Phi}{di_1}$$

Esta misma tensión es la que produce un dipolo precisamente llamado autoinducción, que tiene una impedancia, llamada *reactancia*, de valor

$$jX_1 = jL_1\omega$$

Así pues, la tensión  $v_1$  produce el flujo  $\Phi$  porque consigue hacer circular una pequeñísima corriente de intensidad  $i_1$  que está limitada por la resistencia  $R_1$  del devanado y la tensión  $e_1$  autoinducida en él, o lo que es equivalente, por la resistencia  $R_1$  y la reactancia  $jX_1$  a que equivale esa tensión inducida en él.

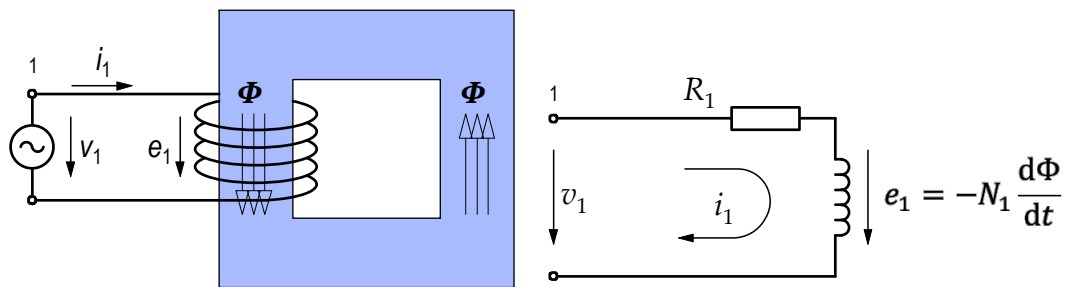


Fig. 15 Flujo, intensidad, resistencia y tensión autoinducida en un devanado alimentado con corriente alterna.

Veamos ahora una consecuencia muy importante de todo lo anterior. En el circuito de la derecha de la Fig. 15 podemos deducir que

$$v_1 = R_1 i_1 + e_1; \quad v_1 = R_1 i_1 - N_1 \frac{d\Phi}{dt}$$

Como el valor de  $R_1$  es pequeñísimo, podemos ignorar la caída de tensión que produce y poner (recordemos que  $v_1 = \sqrt{2} V \cos \omega t$ )

$$v_1 = -N_1 \frac{d\Phi}{dt}; \quad d\Phi = -\frac{v_1}{N_1} dt; \quad \Phi = \frac{1}{N_1} \int_t^0 v_1 dt = \frac{\sqrt{2} V}{N_1 \omega} \text{sen } \omega t = \Phi_m \text{sen } \omega t$$

Se trata, como se ve, de un flujo variable con el tiempo de la misma pulsación que la tensión pero desfasado  $90^\circ$  de esta (desfase entre el seno y el coseno de un mismo ángulo). Este flujo afectará también al devanado de la derecha con el que comparte núcleo en la Fig. 9, y en el que aparecerá la tensión  $e_2$  en el nudo 2, pero este flujo no depende de nada que tenga que ver con él, sino solo con la tensión de alimentación y la forma del solenoide.

En efecto, el valor máximo del flujo es

$$\Phi_m = \frac{\sqrt{2} V}{N \omega}$$

que solo depende de  $V$  y  $\omega = 2\pi f$ , es decir, del valor eficaz y de la frecuencia de la tensión de la fuente en 1. Este hecho es importantísimo: nada de lo que pueda hacer el devanado 2 podrá influir en el valor del flujo que crea el devanado 1 en el núcleo del transformador.

Si añadimos ahora una carga en el devanado de la derecha de la Fig. 9 obtenemos el circuito de la Fig. 16 en la que se cumple, de nuevo, todo lo anterior. Veamos por pasos:

El flujo creado por el devanado 1 es un valor pulsante, sinusoidal, cuyo valor máximo sólo depende de la tensión  $V$  de la fuente y de la forma del solenoide (número de vueltas). Por tanto, nada de lo que ocurra por causa del devanado 2 podrá alterar el valor del flujo  $\Phi$  que recorre el núcleo. Este flujo está impuesto por la tensión de la fuente  $v_1$ .

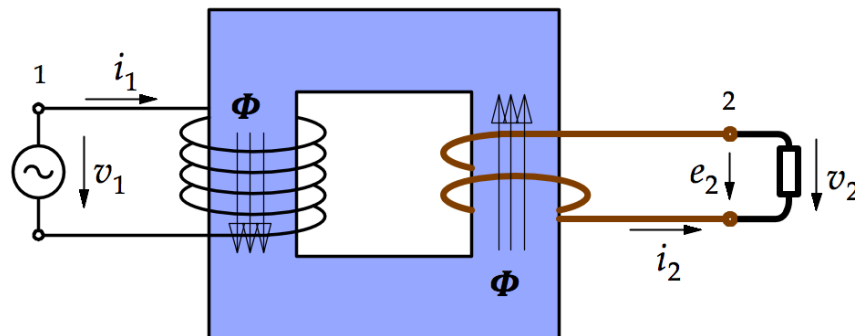


Fig. 16 Al añadir una carga en 2, el devanado de la derecha se cierra, y circulará la corriente  $i_2$ .

Pero al cerrar el devanado 2 a través de la carga ocurrirán todas estas cosas:

- Evidentemente, circulará la corriente  $i_2$  debida a la tensión  $e_2$ .
- La intensidad de  $i_2$  vendrá limitada por la carga añadida y también por la impedancia del devanado 2 que, por lo que ya sabemos, debe incorporar tanto la resistencia óhmica del conductor que lo constituye como la reactancia inductiva por la autoinducción que él mismo se produce en cuanto circule la corriente.
- La corriente  $i_2$  creará un flujo magnético por la ley de Ampère que circulará por el mismo núcleo que  $\Phi$ , pero ¿lo hará en el mismo sentido o en el contrario?
- Lo hará en el contrario, ya que proviene de una corriente que ha sido inducida por la tensión  $e_2$  que lleva el signo de Lenz y, por tanto, ese campo debe oponerse a la variación del campo que le dio lugar.
- Este flujo contrario tenderá a hacer disminuir el valor del flujo  $\Phi$  ya presente en el núcleo, pero eso no es posible porque ya vimos que nada de lo que ocurra en el devanado 2 alterará esta circunstancia. Entonces ¿por qué se contrarresta el efecto *desmagnetizante* de este flujo contrario?
- Porque el devanado 1 aporta más fuerza magnetomotriz  $\mathcal{F}$  para mantener el valor impuesto por  $v_1$  del flujo en el núcleo. Como  $\mathcal{F} = N \cdot i$  ¡el devanado 1 absorberá más intensidad de la fuente  $v_1$  para conseguirlo!.

El fenómeno puede entenderse como que la acción *desmagnetizante* del devanado 2 hace crecer la reluctancia  $\mathcal{R}$  del núcleo ferromagnético, por lo que, siendo  $\Phi$  de valor máximo inalterable, el transformador debe responder aumentando  $\mathcal{F}$  y sólo así puede seguir cumpliéndose la ley de Hopkinson  $\mathcal{F} = \mathcal{R} \Phi$ .

Esta conclusión es de una importancia enorme:

- Cuando se añade una carga al secundario que absorbe una intensidad muy grande, ¡el transformador responde demandando instantáneamente una intensidad mayor del primario! De esta forma se consigue pasar toda la potencia demandada desde la fuente a la carga, y sin contacto eléctrico alguno entre ellas, sólo acoplamiento magnético entre el devanado primario y el secundario.
- Si la tensión de la fuente es de valor eficaz constante, porque es la tensión de la red distribución de energía eléctrica por ejemplo, para ella el transformador se comporta como un *receptor de impedancia variable* que, por eso, absorbe intensidad variable. En concreto, el transformador ofrece una impedancia *máxima* cuando no hay carga en su secundario y se dice que está *en vacío*, y una impedancia *mínima* cuando soporta la carga nominal.
- Cuando el transformador se prueba en el laboratorio del fabricante antes de expedirlo hacia su destino se mide una impedancia aún menor: la llamada *impedancia de cortocircuito*  $\bar{Z}_{cc}$ , porque se obtiene mediante el ensayo de cortocircuito que veremos en la sección 1.3 de este capítulo y también en el capítulo 3, pág. 118 y ss. Constituye uno de los parámetros fundamentales para definir al transformador (Fig. 18).

La impedancia mínima del transformador  $\bar{Z}_{cc}$  no puede bajar de cierto valor porque se debe a la resistencia de sus devanados y a la reactancia debida al *flujo de dispersión*.

Se conoce como flujo que se dispersa, *de dispersión*, al que circula por fuera del núcleo. En algunos transformadores será por el aire, pero en otros puede hacerlo por los aislamientos entre espiras, por el aceite dieléctrico y por las paredes de la cuba cuando estén próximas. Y si las bobinas están encapsuladas en aislamiento seco lo hará también por la resina que rodea los arrollamientos.

Este flujo lo crea cada devanado. En la disposición de la Fig. 17 se representan como  $\Phi_{d1}$  y  $\Phi_{d2}$  y se ve cómo cada uno afecta mayoritariamente al devanado que lo crea y no al otro, pero en otros tipos de transformadores no tiene por qué ser así.

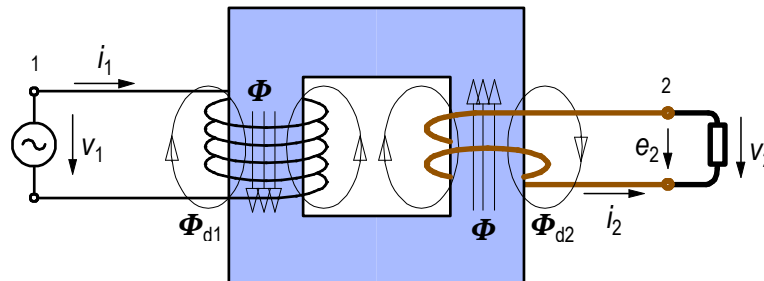


Fig. 17 Flujo de dispersión creado por cada devanado

El efecto será, como ya sabemos, autoinducir en los devanados una tensión con el signo de la ley de Lenz que también limitará las corrientes respectivas  $I_1$  e  $I_2$ . Como ocurría con la autoinducción por el flujo  $\Phi$  compartido en el núcleo, que

se modeló como una reactancia, estas nuevas tensiones también se consideran reactivas y su valor conjunto o total se halla durante el ensayo de cortocircuito.

Visto que el flujo magnético en el núcleo es de valor máximo constante, impuesto por la tensión de la fuente, y que es el mismo flujo para el devanado primario que para el secundario, se puede hablar del *flujo en el núcleo*. Y si la tensión de la fuente es conocida, porque es la tensión nominal que sirve para el diseño del transformador, también habrá un flujo nominal en el núcleo, que es el flujo  $\Phi$  impuesto por la red desde el primario, con independencia de lo que pase en el secundario.

Por tanto, las tensiones inducidas en los dos devanados serán, entonces

$$e_1 = -N_1 \frac{d\Phi}{dt}; \quad e_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt}$$

y su relación es

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

que se llama *relación de transformación*.

Cuando la caída de tensión interna por la impedancia de los devanados no sea significativa, las tensiones en los bornes del transformador son muy similares a las tensiones inducidas anteriores, y se cumplirá también que la relación de transformación entre ellas es la relación entre el número de espiras:

$$m = \frac{e_1}{e_2} \approx \frac{v_1}{v_2} \approx \frac{N_1}{N_2} = \frac{1}{t}$$

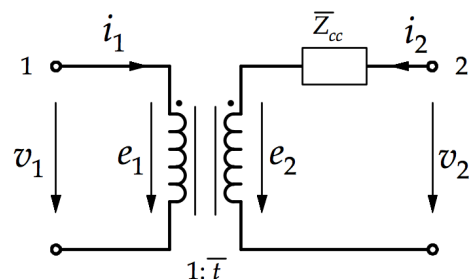


Fig. 18 Tensiones en los bornes del transformador.

La condición  $e_1 = v_1$  y  $e_2 = v_2$  se cumple sin problemas cuando el secundario está abierto y la corriente  $i_2 = 0$ , porque entonces no hay caída de tensión en la impedancia interna. En el modelo usual de transformador (Fig. 18) se ve clara esta cuestión.

Si el transformador es ideal, la potencia absorbida por el devanado 1 será la entregada por el devanado 2, y se obtienen de ahí todas las conocidas relaciones entre las tensiones e intensidades en un transformador:

$$P_1 = P_2; \quad v_1 i_1 = v_2 i_2; \quad \frac{v_1}{v_2} = \frac{i_2}{i_1} = \frac{1}{m} = t$$

Cuando el transformador es real, una pequeña parte de la potencia absorbida por el devanado 1 se desperdicia en calentamiento de la máquina. El calor se genera principalmente en los devanados y en el núcleo de hierro, y en menor medida, en otras partes de la máquina. Y si la máquina proporciona potencia a una carga en su secundario, también circula corriente por él, lo que incrementa sus pérdidas y se calentará aún más.

A continuación tratamos estos aspectos.



## 1.2 Pérdidas de los transformadores

Las pérdidas de energía de un transformador son muy pequeñas pues se trata de las máquinas eléctricas con mayor eficiencia que existen: su rendimiento puede superar el 99% en transformadores grandes y más del 96% en los pequeños.

El Reglamento (UE) nº 548/2014 *de eco-diseño de transformadores* establece la prohibición de introducir en el mercado o poner en funcionamiento transformadores cuyas pérdidas excedan de las de la tabla de la derecha.

Potencia nominal ("asignada") $S_n$ (kVA)	Pérdidas máximas en vacío $P_0$ (W)	Pérdidas máximas debidas a la carga $P_k$ (W)
≤ 25	63	600
50	81	750
100	130	1 250
160	189	1 750
250	270	2 350
315	324	2 800
400	387	3 250
500	459	3 900
630	540	4 600
800	585	6 000
1 000	693	7 600
1 250	855	9 500
1 600	1 080	1 2000
2 000	1 305	1 5000
2 500	1 575	18 500
3 150	1 980	23 000

Estas pérdidas se originan por:

- Calentamiento de los conductores.
- Calentamiento del núcleo: histéresis magnética y corrientes parásitas.

### CALENTAMIENTO DE LOS CONDUCTORES

Cualquier devanado sufrirá calentamiento debido a la resistencia de sus bobinas. Es calentamiento por efecto Joule, proporcional por tanto a la resistencia y al cuadrado de la intensidad que circule por él. Las variables implicadas son:

$$R = \rho \frac{L}{S} \quad \text{Resistencia, en } \Omega.$$

$$\rho \quad \text{Resistividad del conductor, en } (\Omega \text{ mm}^2)/\text{m}.$$

A una determinada temperatura del cable  $\theta_c$  (°C) viene determinada por la UNE 20003 *Cobre-tipo recocido e industrial, para aplicaciones eléctricas*, como

$$\rho_{Cu} \left( \frac{\Omega \text{ mm}^2}{\text{m}} \right) = \frac{1}{58} \left[ 1 + 0,00393 (\theta_c (\text{°C}) - 20) \right]$$

Para el aluminio se aplica la UNE 21096 *Alambres de aluminio industrial recocido, para conductores eléctricos*, características, que fija

$$\rho_{Al} \left( \frac{\Omega \text{ mm}^2}{\text{m}} \right) = 0,028 \left[ 1 + 0,00407 (\theta_c - 20) \right]$$

$$L \quad \text{Longitud del conductor, en m.}$$

$$S \quad \text{Sección del conductor, en mm}^2.$$

$$I = \frac{P}{V \cos \varphi} \quad \text{Intensidad que circula por el conductor, en A.}$$

$V$	Tensión a la que se somete la bobina, en $V$ .
$\varphi$	Desfase entre la tensión $V$ y la intensidad $I$ por la bobina, en grados o radianes.
$P_p = R I^2$	Potencia perdida en una bobina de resistencia $R$ ( $\Omega$ ) cuando es recorrida por una corriente de intensidad $I$ (A), en $W$ .

#### PÉRDIDAS POR HISTÉRESIS MAGNÉTICA

Los materiales ferromagnéticos pueden considerarse compuestos por micro dominios magnéticos susceptibles de orientarse en el sentido del campo exterior  $H$  creado por el solenoide en que se insertan.

La alineación continua con el campo  $H$ , cuando este es alterno, produce calentamientos internos por fricción. Este es el origen de las pérdidas por histéresis magnética.

El área contenida dentro de la curva de histéresis es proporcional a las pérdidas que se van a generar por este concepto. Interesa, por tanto, emplear materiales ferromagnéticos cuyas curvas encierren áreas muy pequeñas. Los fabricantes ofrecen chapas magnéticas de 1.5 W/kg, y modernamente han llegado hasta solo 1.0 W/kg de hierro (ver sección 2.7 más adelante).

La Fig. 19 describe el ciclo habitual del núcleo ferromagnético de un solenoide excitado con corriente alterna:

Inicialmente ( $\mathcal{F} = 0$ ) el material está desmagnetizado (punto  $a$ ). Aumentando la intensidad por el solenoide crece la fuerza magnetomotriz y también el flujo  $\Phi$  hasta llegar a la zona de saturación donde no interesa seguir aumentando la corriente (punto  $b$ ).

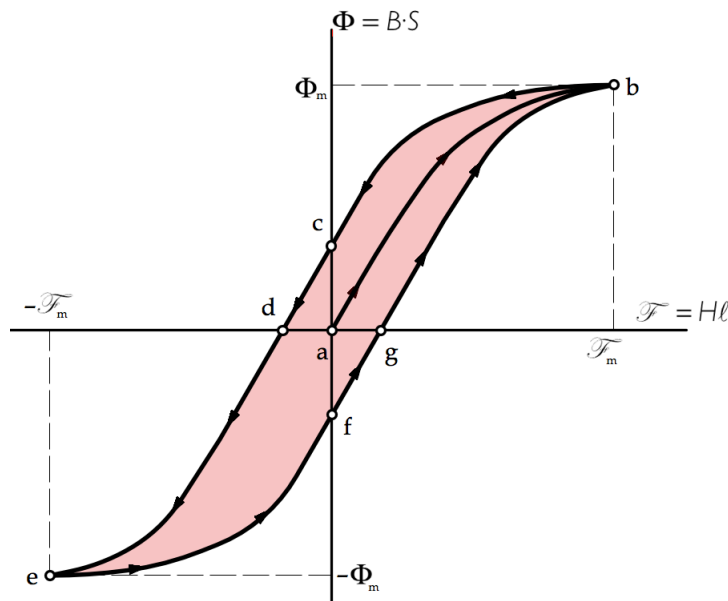


Fig. 19 Curva típica del ciclo de histéresis magnética.

- |                                  |                                  |
|----------------------------------|----------------------------------|
| a) Estado inicial                | e) Máxima magnetización negativa |
| b) Máxima magnetización positiva | f) Magnetismo remanente negativo |
| c) Magnetismo remanente positivo | g) Campo coercitivo positivo     |
| d) Campo coercitivo negativo     |                                  |

Al reducir la corriente a cero aún se notará cierto *magnetismo remanente* (punto  $c$ ) que puede revertirse aplicando fuerza magnetomotriz de sentido contrario (invirtiendo el sentido de la corriente) para crear el llamado *campo coercitivo* (punto  $d$ ) y seguir aumentando esa corriente para llegar a la nueva zona de saturación (punto  $e$ ) donde ya no interesa continuar incrementando  $-\mathcal{F}$ . Según decrece de nuevo la corriente retrocedemos hacia los puntos  $f$  y  $g$  (que son los homólogos de  $c$  y  $d$  respectivamente) y

volvemos al punto *b*. Y así sucesivamente.

#### PÉRDIDAS POR CORRIENTES PARÁSITAS

Toda espira que pueda verse afectada por el campo magnético variable se verá recorrida por corrientes inducidas. Ocurre que dentro del núcleo ferromagnético, que también es conductor, se pueden formar infinitud de espiras de cualquier forma, dando lugar a la circulación de corrientes parásitas o de Foucault (Fig. 20), que fue el ingeniero que primero las estudió.

Estas corrientes producen el calentamiento del núcleo porque el hierro ferromagnético opone resistencia al paso de la corriente eléctrica. Son pérdidas también por efecto Joule del tipo  $R I^2$ . Interesa, por tanto, que las espiras sean lo más pequeñas posibles, para que su resistencia  $R$  y las pérdidas que generan sean lo menores posibles. Por eso el núcleo de todas las máquinas eléctricas se construye a partir de finísimas chapas ferromagnéticas cuidadosamente aisladas eléctricamente entre sí.

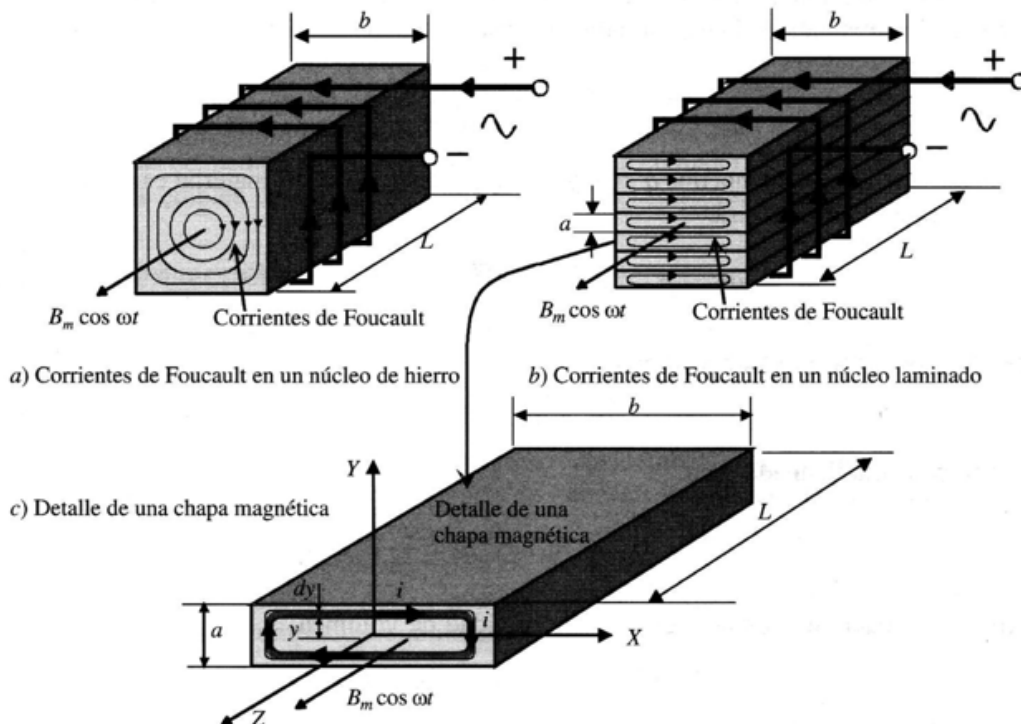


Fig. 20 Corrientes parásitas o de Foucault. [JFM]

#### MEDICIÓN DE PÉRDIDAS

Las pérdidas de un transformador se miden en el laboratorio del fabricante una vez terminada la máquina:

- Las pérdidas *en vacío*, que se deben a la magnetización y calentamiento del núcleo, se miden en el ensayo de vacío.
- Las pérdidas *debidas a la carga*, que son producidas por el calentamiento de los conductores, se miden en el ensayo de cortocircuito.
- Las pérdidas totales teóricamente deberían ser la suma de las anteriores. Pero

al medirlas expresamente, sin embargo, se obtiene un total ligeramente superior, debido a las pérdidas *adicionales*.

En la sección siguiente veremos los procedimientos a seguir para medirlas en el laboratorio, algo que resulta obligado por normativa para la venta y puesta en funcionamiento de cualquier transformador.

### 1.3 Modelo eléctrico del transformador y ensayos de vacío y cortocircuito

El circuito de la Fig. 21 es el comúnmente aceptado para cualquier transformador monofásico. Tiene la ventaja de que, con un adecuado cambio de variables desaparece el acoplamiento magnético de la Fig. 18, y el modelo es solo eléctrico, más sencillo y práctico. Se trata de un modelo referido al primario, porque ese cambio de variables se hace empleando la relación de transformación  $m$  y consiste en suponer que el devanado secundario tiene el mismo número de espiras que el primario. Si hicieran falta los parámetros reales del transformador habría que deshacer este cambio, pero esto pocas veces resulta necesario.

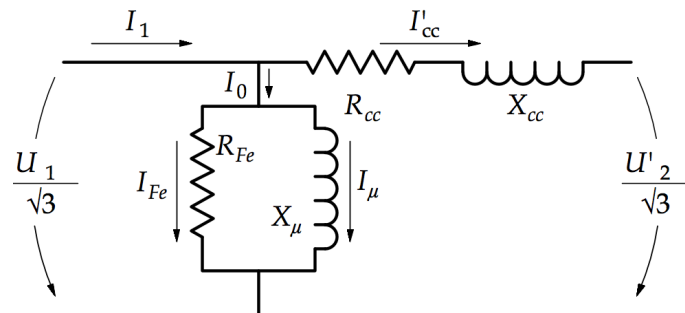


Fig. 21 Modelo eléctrico de un transformador monofásico reducido al primario.

El transformador absorbe por el devanado 1 la intensidad  $I_1$  a la tensión  $U_1/\sqrt{3}$ .

Parte de esa corriente,  $I_0$ , deriva hacia las ramas en paralelo (Fig. 22), que es la parte del modelo que corresponde al núcleo magnetizado con el flujo nominal de la máquina. El calentamiento a causa de las pérdidas por histéresis magnética y corrientes parásitas se modela con  $R_{Fe}$  recorrida por  $I_{Fe}$ , mientras que la energía necesaria para establecer ese flujo magnético es la requerida por la reactancia  $X_\mu$  cuando la recorre  $I_\mu$ .

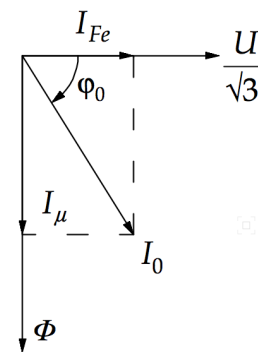


Fig. 22 Intensidad de vacío.

Las dos intensidades están en cuadratura (desfasadas  $90^\circ$  eléctricos), pues una circula por una resistencia y la otra por una reactancia.

El resto de  $I_1$  es  $I_{cc}'$ . Lleva la comilla (prima) porque no es la intensidad que circula por el devanado 2, sino la que el modelo permite deducir y se ve afectada por el cambio de variables mencionado más arriba. El valor auténtico de  $I_2$  se obtiene de  $I_{cc}'$  deshaciendo dicho cambio, es decir, multiplicándola por la relación de transformación  $m$ .

Esta corriente es la que circula por la rama serie, donde aparece la resistencia  $R_{cc}$  con la que se modelan las pérdidas debidas a la carga, y la reactancia  $X_{cc}$  debida al flujo magnético de dispersión, que es el que no circula por el núcleo magnético y no contribuye, por tanto, al intercambio de potencia entre el primario y el secundario.

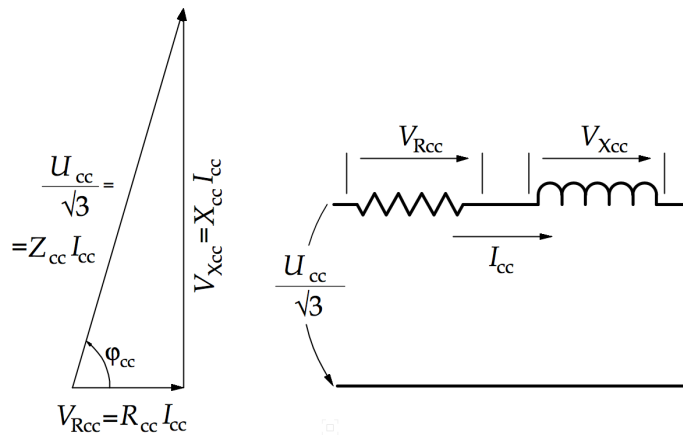


Fig. 23 Intensidad de cortocircuito.

#### ENSAYO DE VACÍO

Se trata de aplicar la *tensión nominal* a un devanado mientras se deja el otro *al aire*. Como el modelo está reducido al primario, en el ensayo debe aplicarse la tensión nominal al devanado 1, y si por razones prácticas del laboratorio conviniera hacerlo sobre el devanado 2, se deben adaptar primero las mediciones obtenidas utilizando la relación de transformación  $m$ .

Permite obtener los parámetros de las ramas en paralelo del modelo del transformador, es decir, la resistencia  $R_{Fe}$  y la reactancia  $X_{\mu}$ .

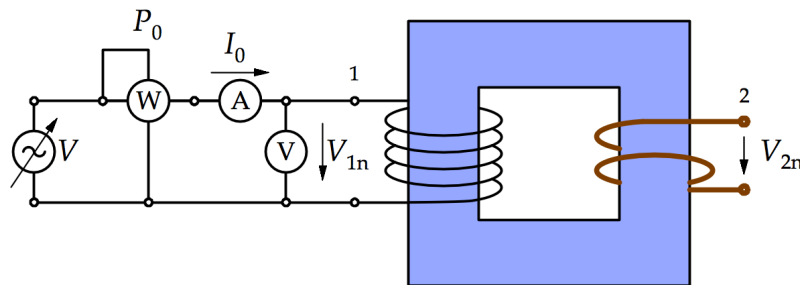


Fig. 24 Transformador dispuesto para el ensayo de vacío.

Se miden a la vez la tensión aplicada, que debe ser la nominal del devanado, la intensidad de la corriente que circule por la máquina, y la potencia que absorbe el transformador en esas condiciones, que son las *pérdidas en vacío*.

Se calcula el desfase  $\varphi_0$  entre tensión e intensidad y se obtienen las intensidades  $I_{Fe}$  e  $I_{\mu}$  (Fig. 22). Obtener luego  $R_{Fe}$  y  $X_{\mu}$  es inmediato.

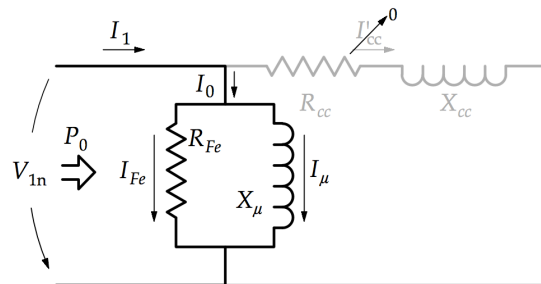


Fig. 25 Con el ensayo de vacío se calculan los parámetros de las ramas en paralelo.

$$P_0 = V_{1n} I_0 \cos \varphi_0; \quad \cos \varphi_0 = \frac{P_0}{V_{1n} I_0}; \quad \varphi_0 = \arccos \left( \frac{P_0}{V_{1n} I_0} \right)$$

$$I_{Fe} = I_0 \cos \varphi_0; \quad R_{Fe} = \frac{V_{1n}}{I_{Fe}} \quad I_{\mu} = I_0 \sin \varphi_0; \quad X_{\mu} = \frac{V_{1n}}{I_{\mu}}$$

#### ENSAYO DE CORTOCIRCUITO

Este ensayo es el dual del anterior: se trata ahora de conseguir que circule la *intensidad nominal* por un devanado mientras el otro está *en cortocircuito*. Para ello se aplica una pequeñísima tensión al devanado sobre el que se hace el ensayo vigilando la intensidad absorbida por la máquina, que crece muy deprisa.

Permite obtener los parámetros de la rama serie del modelo del transformador, es decir, la resistencia  $R_{cc}$  y la reactancia  $X_{cc}$ .

Se miden a la vez la intensidad que circula, que debe ser la nominal del devanado, la tensión aplicada por la fuente regulable, y la potencia que absorbe el transformador en esas condiciones, que son las *pérdidas debidas a la carga*.

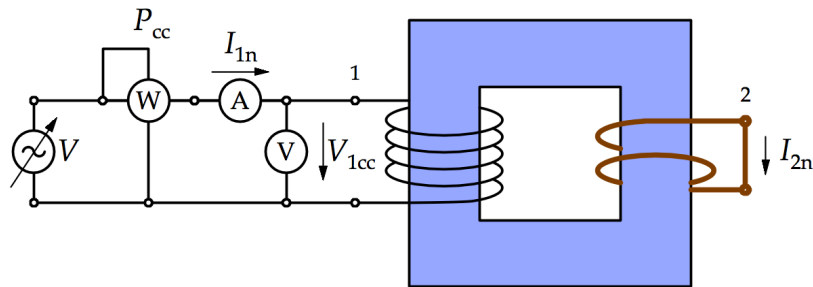


Fig. 26 Transformador dispuesto para el ensayo de cortocircuito.

Se calcula el desfase  $\varphi_{cc}$  entre tensión e intensidad y se obtienen las tensiones  $V_{Rcc}$  e  $V_{Xcc}$  (Fig. 23). Obtener luego  $R_{cc}$  y  $X_{cc}$  es inmediato.

En realidad no toda la corriente absorbida circulará por la rama serie, pues la intensidad  $I_0$  seguirá existiendo. Pero es de un valor ínfimo comparada con  $I_{cc}$  (Fig. 27), por lo que se desprecia y se asume que  $I_{1n} = I_{cc}$ .

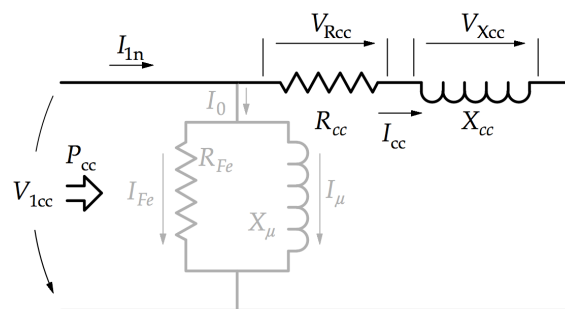


Fig. 27 Con el ensayo de cortocircuito se calculan los parámetros de la rama serie.

Entonces:

$$P_{cc} = V_{1cc} I_{1n} \cos \varphi_{cc}; \quad \cos \varphi_{cc} = \frac{P_{cc}}{V_{1cc} I_{1n}}; \quad \varphi_{cc} = \arccos \left( \frac{P_{cc}}{V_{1cc} I_{1n}} \right)$$

$$V_{Rcc} = V_{1cc} \cos \varphi_{cc}; \quad R_{cc} = \frac{V_{Rcc}}{I_{1n}} \quad V_{Xcc} = V_{1cc} \sin \varphi_{cc}; \quad X_{cc} = \frac{V_{Xcc}}{I_{1n}}$$

### 1.4 Transformadores trifásicos

Un transformador trifásico es un conjunto de tres transformadores monofásicos idénticos conectados eléctricamente entre sí.

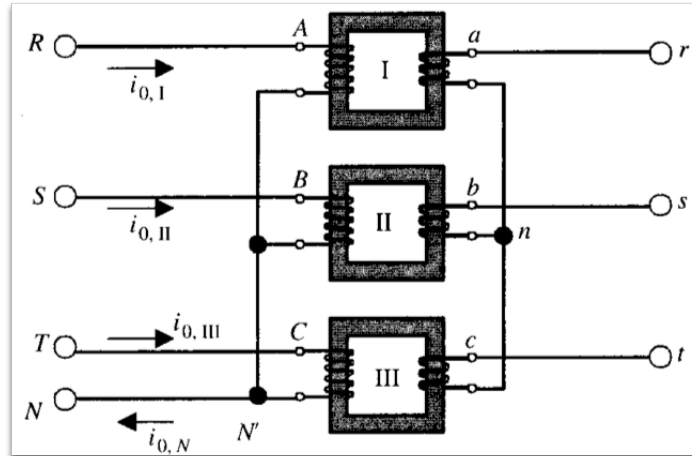


Fig. 28 Transformador trifásico formado conectando los tres primarios en estrella y los tres secundarios en estrella también. Solo el neutro de la estrella del primario es accesible. [JFM]

Por ello, todo lo dicho para transformadores monofásicos en las secciones anteriores podrá aplicarse a los trifásicos, tan solo teniendo en cuenta que es una agrupación de tres monofásicos. Por ejemplo, las pérdidas de un transformador trifásico serán la suma de las pérdidas de los tres monofásicos que lo componen. O la potencia del trifásico es la suma de las potencias de los monofásicos.

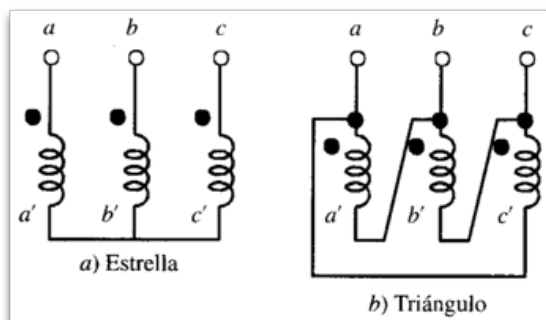


Fig. 29 Uno de los lados puede conectarse en estrella y el otro en triángulo. [JFM]

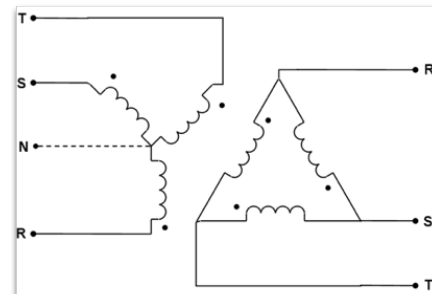


Fig. 30 Esta otra forma de representar las conexiones de la figura anterior también es habitual. [WKP]

#### BASTIDOR PLANO

Para reducir costes y tamaño final de la máquina trifásica se pueden eliminar tres de las seis columnas de que constan los tres transformadores monofásicos, como se razona en la Fig. 31:

- Si los flujos  $\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3$  son creados por tres corrientes trifásicas equilibradas, al ser son flujos proporcionales a ellas (ley de Ampère) serán sinusoidales, de la misma frecuencia (la de las corrientes) y desfasados  $120^\circ$ , de manera que su suma es nula.
- La suma se produce justamente al juntar los tres bastidores mostrados en b) para formar la columna central mostrada en c).

- Por esa columna circulará el flujo magnético  $\Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3$ , que es nulo. Por tanto ¿para qué tener una columna que nunca será recorrida por flujo alguno? Por eso en d) se quita.
- Finalmente se aplana la geometría resultante, llegando al típico bastidor plano de tres columnas.

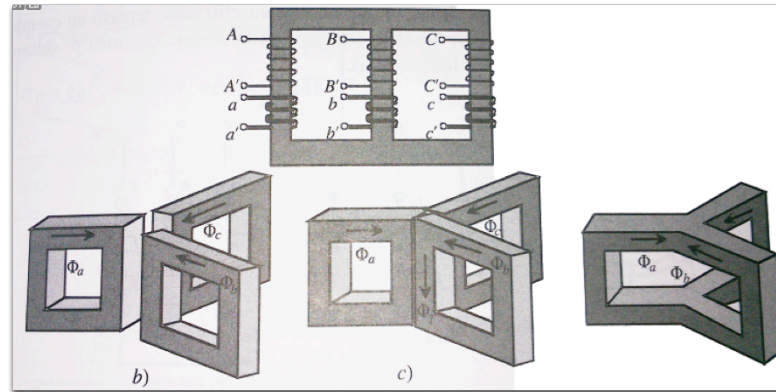


Fig. 31 Si la suma de los tres flujos magnéticos es cero, los tres transformadores monofásicos se pueden disponer en un marco plano reduciendo las seis columnas a solo tres. [JFM]

La disposición plana a tres columnas puede ser mejorada añadiendo otras dos (Fig. 32 a) que, aunque no llevarán devanados, reducen la cantidad de flujo magnético de dispersión (el que no circula por el núcleo y no contribuye, por tanto, al intercambio de energía entre los devanados de la máquina). También existe el diseño acorazado, que también reduce el flujo de dispersión. Pero rara vez se hace así, pues no resulta eficiente económicamente.

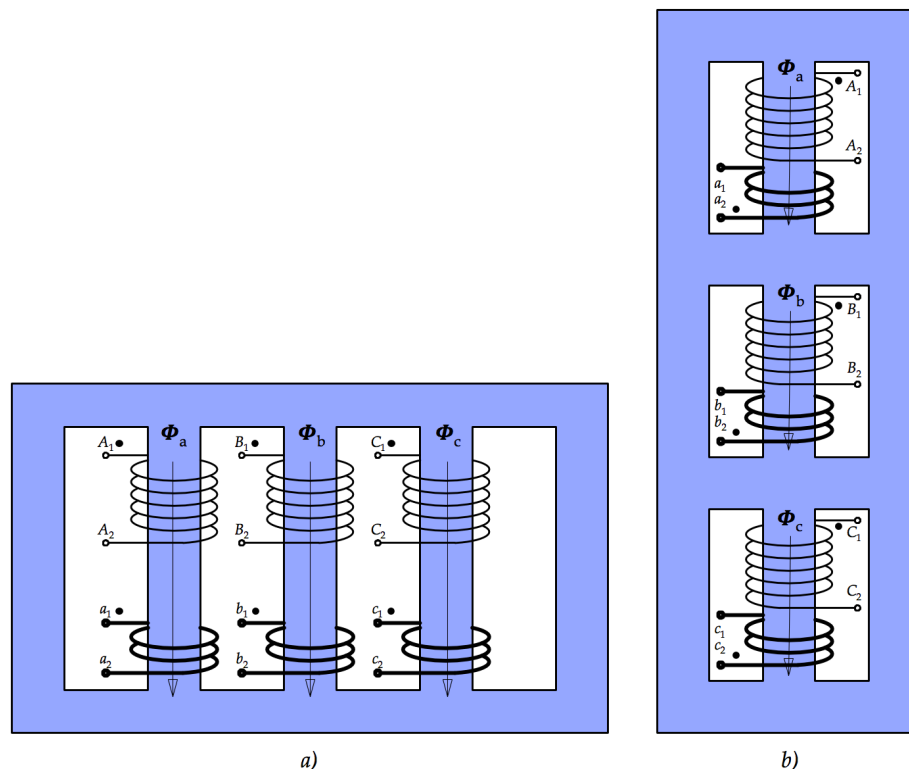


Fig. 32 Otros diseños de transformador trifásico. a) De 5 columnas. b) Acorazado.

### PUNTOS CORRESPONDIENTES

Los puntos negros de la Fig. 29 y la Fig. 30 son los llamados *puntos correspondientes* de los devanados que abrazan el mismo flujo magnético. Conocerlos es imprescindible para conectar correctamente los devanados entre sí.

Consideremos dos devanados acoplados magnéticamente (abrazan el mismo flujo magnético) de la Fig. 33, por ejemplo los  $A_1-A_2$  y  $a_1-a_2$ : si a los terminales  $A_1$  y  $a_1$  se le pone un punto será porque cuando la tensión entre  $A_1$  y  $A_2$  se eleva, también lo hace el potencial de  $a_1$  respecto de  $a_2$ . Si lo hiciera el de  $a_2$  respecto del de  $a_1$  entonces el punto lo llevaría el  $a_2$ , no el  $a_1$ .

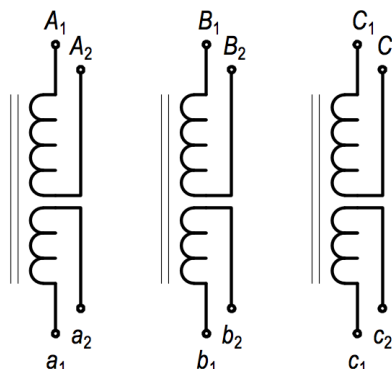


Fig. 33 Seis devanados arrollados sobre tres columnas dos a dos, antes de conectarlos entre sí, mostrando sus doce terminales.

Por convenio:

- Se asignan las mismas letras (mayúsculas con minúsculas) y subíndices a los terminales correspondientes, y así se evita tener que incluir el punto.
- Se asignan las letras mayúsculas a los terminales del arrollamiento que se asigne como primario, y las minúsculas al asignado como secundario.

La posición de los puntos correspondientes la determina el sentido del arrollamiento de las bobinas a derechas o a izquierdas (en sentido horario o antihorario).

Es sencillo determinar su posición mediante un voltímetro de cuadro móvil y una simple pila.

### POLARIDAD DE UN DEVANADO

Como ya sabemos, la ley de Ampère establece que toda corriente eléctrica produce un flujo magnético a su alrededor directamente proporcional a ella.

También sabemos que en el interior de un solenoide el flujo es perfectamente axial, y su sentido viene determinado por la *regla del sacacorchos*:

En un solenoide el sentido del flujo magnético creado por una determinada corriente es el sentido en que avanzaría un sacacorchos que sigue el camino de dicha corriente. Por tanto, el sentido de arrollamiento a derechas (sentido horario) o a izquierdas (antihorario) determina el sentido del flujo magnético.

Por convenio se dice que intensidades positivas producen flujos magnéticos positivos en el sentido del avance del sacacorchos.

El sentido del flujo que produce la corriente, en relación con el sentido del arrollamiento del solenoide, es lo que se viene llamando *polaridad*.

Como regla práctica (ver Fig. 34):

- Dos solenoides idénticos, recorridos por corrientes idénticas, producen flujos de sentidos idénticos si están bobinados en el mismo sentido (misma polaridad), y flujos opuestos si están bobinados a derechas y a izquierdas respectivamente (distinta polaridad). Y al revés, dos devanados que comparten el mismo flujo magnético serán recorridos por corrientes del mismo sentido si están arrollados en el mismo sentido (misma polaridad). Como la corriente es alterna, esto quiere decir que las intensidades estarán en fase. Si el sentido del devanado no coincide, las corrientes estarán desfasadas  $180^\circ$  (distinta polaridad).
- Por último, dos devanados con la misma polaridad tienen los puntos correspondientes en el mismo sitio. Y al revés.

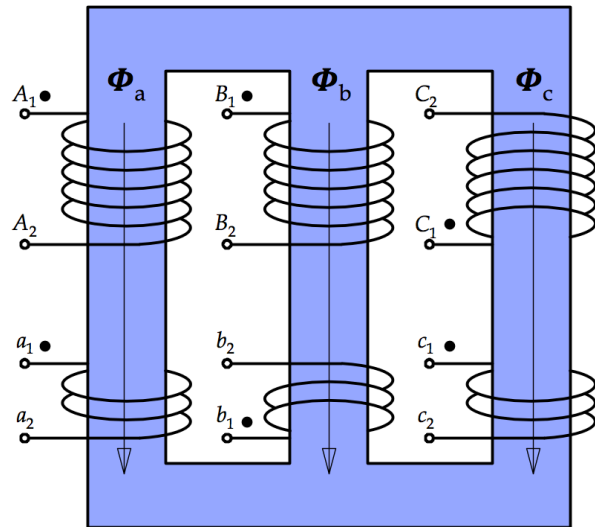


Fig. 34 Puntos correspondientes y polaridad de devanados que necesariamente comparten el flujo magnético de cada columna.

### 1.5 Conexiones entre devanados

En la Fig. 35 a) se identifican las tensiones simples  $V$  de una línea trifásica con neutro, que son las que se miden entre cada conductor y el neutro, y las tensiones compuestas  $U$ , que se miden entre cada dos conductores.

En la Fig. 35 b) aparecen los fasores de las tensiones simples, tomando como origen de fases el de la primera fase. Los otros dos fasores están desfasados  $\pm 120^\circ$  como corresponde a un sistema trifásico equilibrado de tensiones.

Para las tensiones compuestas identificadas en a) se cumple que

$$\vec{U}_{L1-L2} = \vec{V}_{L1-N} - \vec{V}_{L2-N}; \quad \vec{U}_{L2-L3} = \vec{V}_{L2-N} - \vec{V}_{L3-N}; \quad \vec{U}_{L3-L1} = \vec{V}_{L3-N} - \vec{V}_{L1-N}$$

y en la Fig. 35 c) se representan los fasores correspondientes. Las líneas de puntos permiten seguir el razonamiento para dibujarlos: la tensión  $\vec{U}_{L1-L2}$  se obtiene de concatenar el opuesto de  $\vec{V}_{L2-N}$  (primera línea de puntos) con  $\vec{V}_{L1-N}$  (segunda línea de puntos) y cerrar el paralelogramo desde el origen; y así con las otras dos.

Los devanados primarios son (Fig. 34) los marcados con letras mayúsculas ( $A_1-A_2$ ,  $B_1-B_2$ ,  $C_1-C_2$ ). Los secundarios se marcan con letras minúsculas ( $a_1-a_2$ ,  $b_1-b_2$ ,  $c_1-c_2$ ). Cualquiera de ellos puede conectarse en estrella o triángulo de dos maneras cada uno. Veamos:

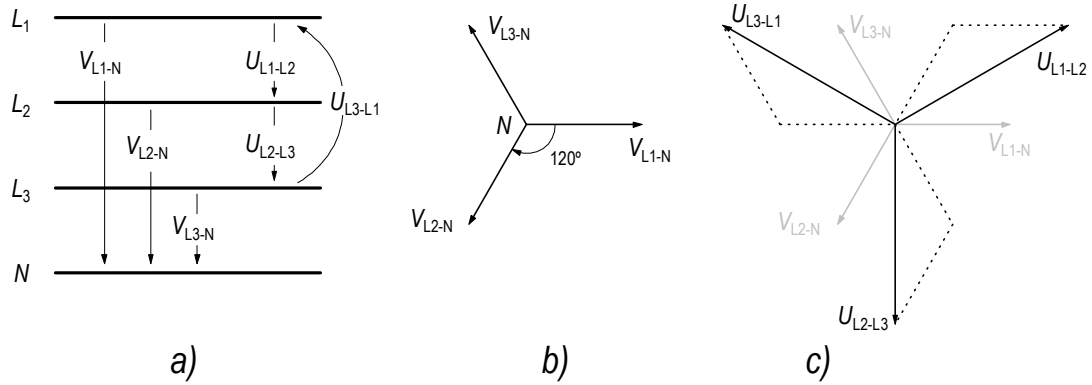


Fig. 35 a) Tensiones simples y compuestas de una red trifásica con neutro. b) Tensiones simples (fase-neutro). c) Tensiones compuestas (fase-fase).

CONEXIONES EN ESTRELLA (Fig. 36):

Los fasores de esquema de la Fig. 36 a) indican las tensiones a las que se somete cada bobina. En la forma de la izquierda, la  $A_1-A_2$  está conectada entre  $L_1$  y  $N$ , por lo que su tensión  $\vec{V}_{A_1-A_2}$  se representará como el fasor  $\vec{V}_{L_1-N}$  de la Fig. 35 b); y para las otras dos bobinas se hace igual. Después, es costumbre modificar la posición de los fasores para que sugieran la conexión de los arrollamientos: en este caso las puntas de las flechas de las tensiones en la Fig. 36 a) apuntan todas a las bornas  $A_2$ ,  $B_2$  y  $C_2$ , que después se conectan todas al terminal  $N$ , y por eso los fasores se colocan como en el esquema b).

En la forma de la derecha la bobina  $A_1-A_2$  está conectada al revés, entre  $N$  y  $L_1$ , por lo que su fasor  $\vec{V}_{A_1-A_2}$  se representa en c) como  $-\vec{V}_{L_1-N}$ , es decir, horizontal apuntando hacia la izquierda; y así con las otras dos. Al recolocar los fasores como se hizo en el caso anterior quedan como en d) para que las puntas estén hacia los terminales identificados como  $U$ ,  $V$ ,  $W$  y su origen sea común y se pueda marcar como terminal  $N$ .

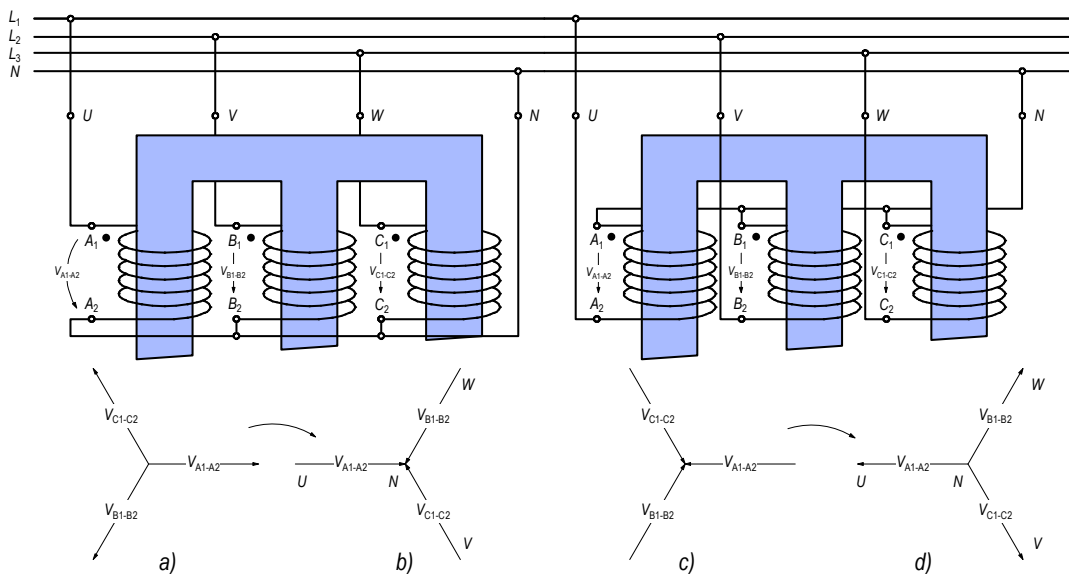


Fig. 36 Dos maneras de conectar en estrella tres arrollamientos con la polaridad que se muestra.

CONEXIONES EN TRIÁNGULO (Fig. 37):

Para representar fasorialmente las conexiones de la Fig. 37 se procede de forma similar a como se hizo antes para la Fig. 36.

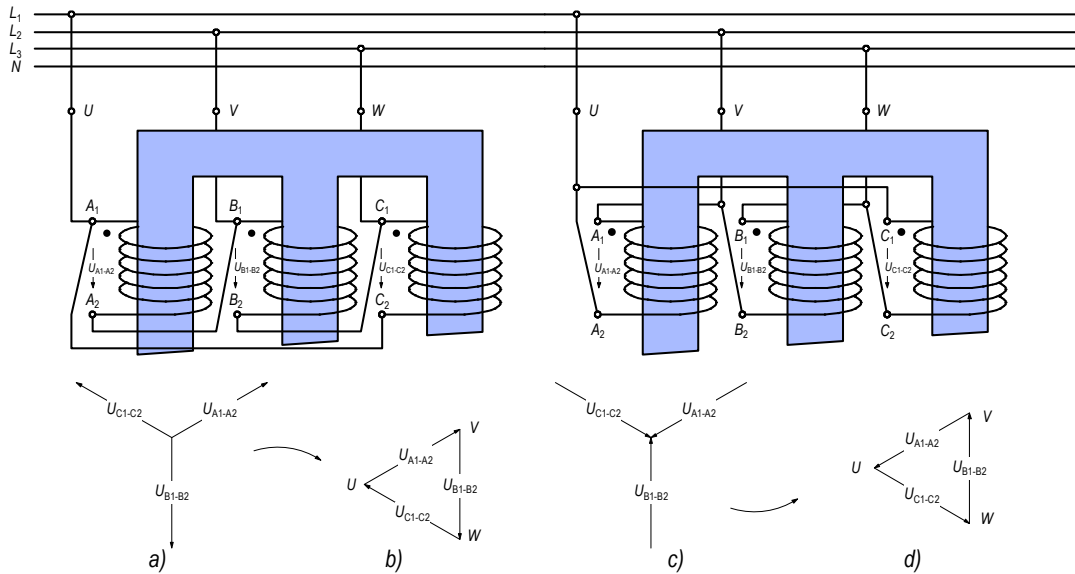


Fig. 37 Dos maneras de conectar en triángulo tres arrollamientos con la polaridad que se muestra.

Ahora hay que observar que, en la configuración de la izquierda, la bobina  $A_1-A_2$  está conectada entre  $L_1$  y  $L_2$ , por lo que su fasor debe ser como el de  $\vec{U}_{L_1-L_2}$  de la Fig. 35 c). La bobina  $B_1-B_2$  está entre  $L_2$  y  $L_3$  luego su fasor es como el de  $\vec{U}_{L_2-L_3}$ , y la  $C_1-C_2$  está entre  $L_3$  y  $L_1$  y su fasor es como el de  $\vec{U}_{L_3-L_1}$ . Así se obtiene el esquema de la Fig. 37 a).

Como los tres arrollamientos están conectados en triángulo, hay que mover los fasores para sugerir esa información, y así el esquema b) representa que los terminales  $A_2$  y  $B_1$  se tocan en  $V$ , que  $B_2$  y  $C_1$  se tocan en  $W$ , y que  $C_2$  y  $A_1$  se tocan en  $U$ .

CONEXIONES CON MEZCLAS COMO LAS CONEXIONES EN ZIG-ZAG

Se puede bobinar una parte del arrollamiento de una fase en una columna y la otra parte en una columna distinta, repitiendo este proceder en las tres fases de la misma forma. Si la proporción es del 50%, es decir, la mitad del arrollamiento va en una columna y la otra mitad va en la siguiente, y la conexión de los tres arrollamientos es en estrella, esta configuración se denomina zig-zag. Es la habitual de las reactancias de puesta a tierra y de los pequeños transformadores de distribución.

Las tensiones que se inducen en cada parte del bobinado de una fase dependen del flujo que las crea, que es distinto en cada columna (Fig. 38).

La tensión entre el borne  $U$  y el neutro  $N$  es la suma fasorial de la tensión en la primera parte de la bobina de la izquierda, es decir  $V_{11}$ , más la tensión de la segunda parte,  $V_{22}$ , que está en la columna central. Por estar en la primera columna,  $V_{11}$  es como la tensión  $V_{A1-A2}$  de la Fig. 36 izquierda. Por estar en la columna central la tensión  $V_{22}$  es como la tensión  $V_{B1-B2}$  de la Fig. 36 derecha (no la de la izquierda porque en el zig-zag esta segunda parte se enrolla al revés).

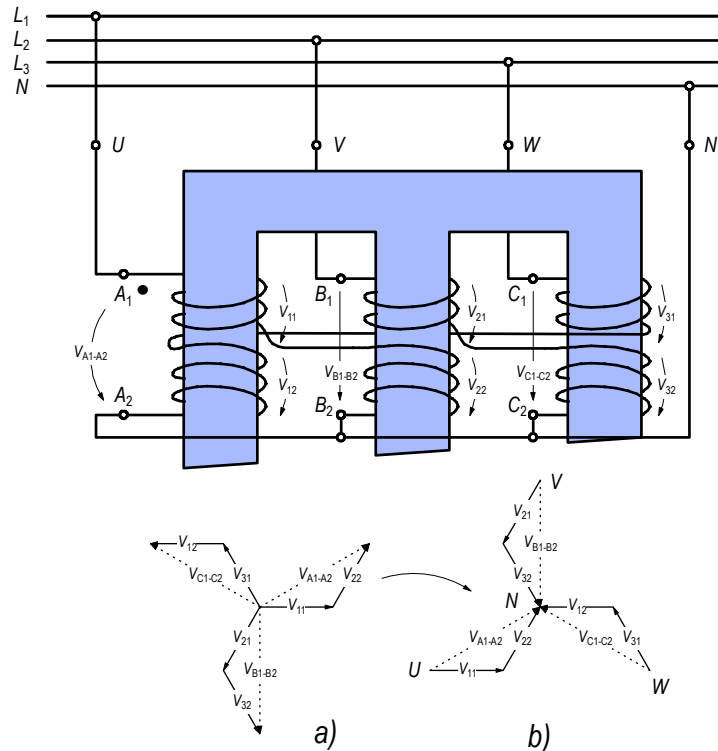


Fig. 38 Una conexión en zig-zag

#### COMBINACIÓN DE CONEXIONES

Un transformador trifásico implica combinar dos conjuntos trifásicos de devanados, y cada uno puede estar configurado de cualquiera de las cuatro formas anteriores.

Ello multiplica las posibilidades y crea una particularidad: muchas combinaciones introducen desfases entre las tensiones primarias y las secundarias, que quedan definidas por el *índice horario* que veremos enseguida.

**Dyn11**  
Mayor Menor Índice  
tensión tensión horario

Fig. 39 Designación del grupo de conexiones.

Para identificar cada combinación de conexiones se ha adoptado el convenio de designarlas por letras de la siguiente manera:

	Estrella	Triángulo	Zig-zag	Neutro accesible
Devanado de mayor tensión:	Y	D	Z	N
Devanado de menor tensión:	y	d	z	n

#### ÍNDICE HORARIO

El índice horario expresa el desfase que puede haber entre las tensiones de terminales homólogos. En la Fig. 41 se representan las tensiones simples de los terminales  $U$  y  $u$  de un transformador DYN11 donde la de menor tensión ( $u$ ) está retrasada  $30^\circ$  respecto

de la de mayor tensión ( $U$ ).

Los desfases habituales son múltiplos de  $\pm 30^\circ$  por lo que resulta muy práctico acudir a la esfera de un reloj, donde las 12 horas se colocan a intervalos de  $30^\circ$  todo alrededor.

La Fig. 40 muestra que si los fasores de la menor tensión  $u, v, w$ , se representan sobre un reloj con el terminal  $U$  del esquema de mayor tensión en las 12, el fasor de  $u$  queda colocado a las 11. Es lo mismo que decir que la tensión simple  $u$  está retrasada  $30^\circ$  respecto de la tensión simple  $U$ .

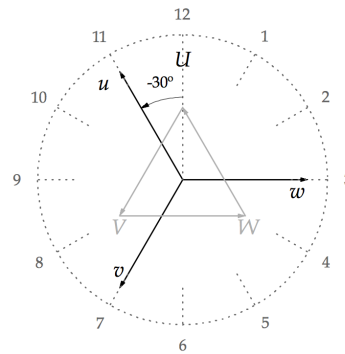


Fig. 40 Índice horario "11".

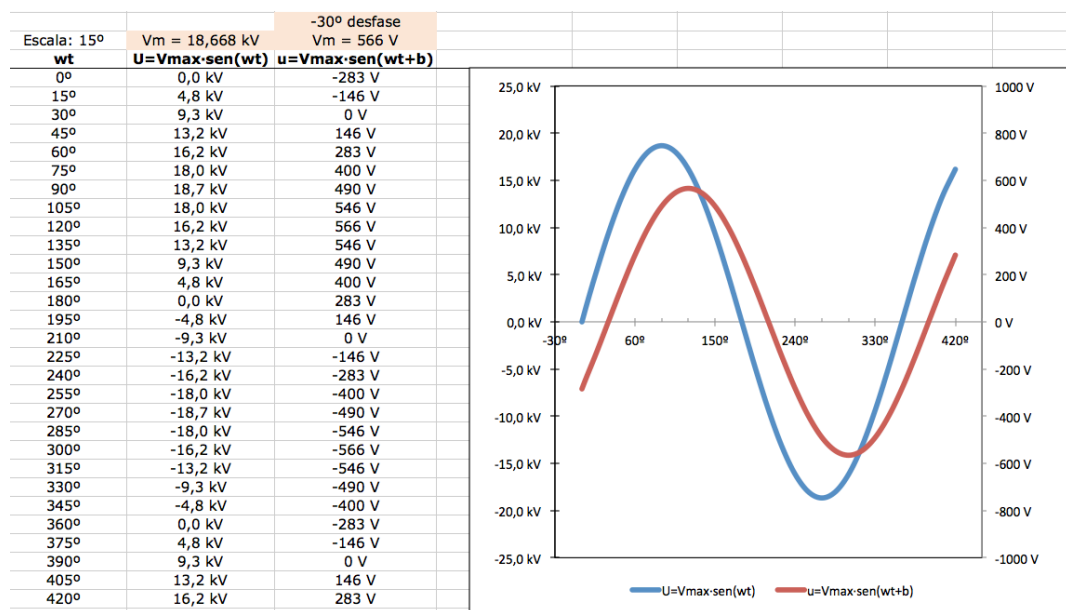


Fig. 41 Desfase de  $-30^\circ$  entre la onda de tensión azul (13.2 kV) y la roja (400 V).

#### GRUPOS DE CONEXIONES HABITUALES

La Fig. 42 representa los tipos de conexiones más frecuentes con su índice horario correspondiente.

Cada una implica ventajas e inconvenientes de cara a su uso por lo que se prefieren unas u otras en función de la función que deba cumplir cada transformador como iremos viendo a continuación.

#### CONEXIONES YD O DY

Un devanado está conectado en triángulo y el otro en estrella, con el neutro que puede ser accesible.

0 (0°)	Dd0		6 (180°)	Dd6	
	Yy0			Yy6	
	Dz0			Dz6	
5 (150°)	Dy5		11 (330°)	Dy11	
	Yd5			Yd11	
	Yz5			Yz11	

Fig. 42 Grupos de conexiones habituales. [JFM]

En las conexiones *Dy* o *Yd* el devanado en triángulo permite la circulación interna de las corrientes del tercer armónico que anulan los flujos debidos a los terceros armónicos de la intensidad, beneficiando la forma de onda de la red.

El triángulo también reequilibra moderadamente las intensidades cuando la carga del transformador está desequilibrada, pero siempre induce un desfase entre tensiones del primario y el secundario, lo que puede impedir conectar dos transformadores trifásicos en paralelo si sus desfases (índices horarios) no coinciden.

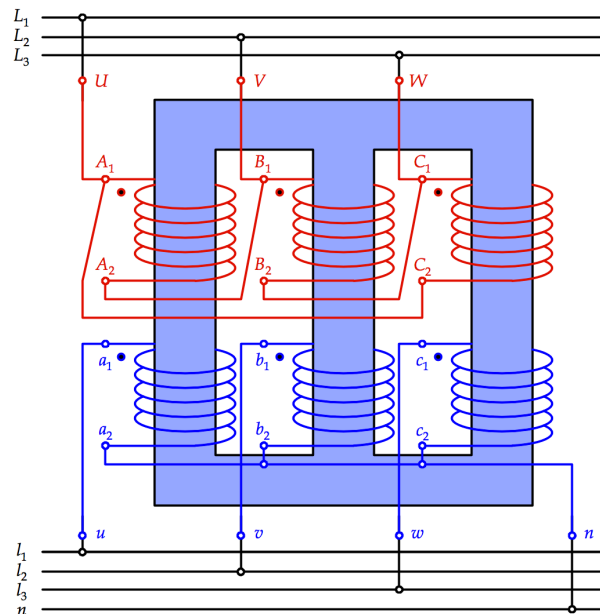


Fig. 43 Sentidos de arrollamiento y conexiones de la conexión Dyn11.

Por todo lo anterior, y porque el devanado en estrella permite extraer y distribuir el neutro y ofrecer a las cargas no solo las tensiones compuestas sino también las simples, son los preferidos para las redes de distribución de energía eléctrica.

Para diseñar una conexión de este tipo no es necesario representar los arrollamientos y los puentes entre con tanto detalle como en la Fig. 43. La información realmente relevante es la forma de arrollar las bobinas, lo que queda determinado por la posición de los puntos correspondientes, y las uniones entre las bobinas, y ambos datos pueden esquematizarse en diagramas como el de la Fig. 44.

El índice horario de la conexión de la Fig. 44 se puede determinar siguiendo los pasos siguientes:

- a) Representar los fasores  $V_1, V_2, V_3$ , de las tensiones a las que se someten las

bobinas del devanado de mayor tensión. La primera de ellas está conectada entre  $L_2$  y  $L_1$  (en el sentido de la flecha de la tensión  $V_1$  que es la que queremos representar), por lo que  $\vec{V}_1 = -\vec{U}_{L_1-L_2}$  (ver Fig. 35, p. 72). Y así con las otras tres tensiones.

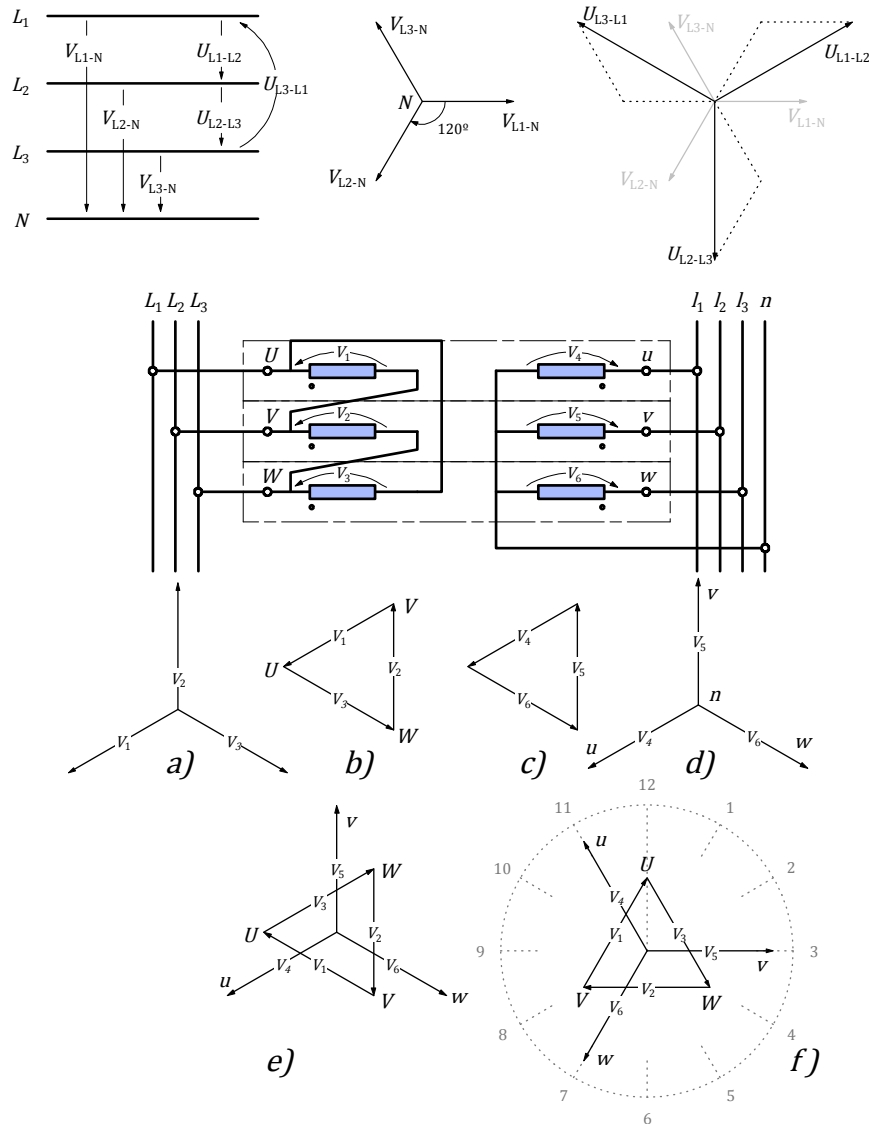


Fig. 44 Cableado y esquemas fasoriales de la conexión Dyn11.

- b) Mover los tres fasores anteriores para formar la figura que corresponda al modo de conexión: la punta de la flecha de  $V_2$  debe tocar el inicio de la flecha de  $V_1$ , y así sucesivamente. En la punta de  $V_1$  también está el terminal  $U$ . En este cambio los fasores se *arrastran*, nunca se *giran*.
- c) La primera bobina del devanado de menor tensión está *montada sobre la misma columna* del núcleo que la primera del devanado anterior, por lo que el flujo magnético para ambas es el mismo, y como la flecha de la tensión  $V_4$  *apunta también* hacia el punto correspondiente con la tensión de  $V_1$  (cuya flecha también apunta hacia el suyo), ambas tensiones están en fase. Si la flecha apuntara hacia el otro lado las tensiones serían opuestas (desfasadas  $180^\circ$ ).

Como en este caso están todas en fase, los fasores del esquema c) son como los del b), pero corresponden a las tensiones  $V_4, V_5, V_6$ .

- d) Se recolocan los fasores de c) para ilustrar el modo de conexión del devanado de menor tensión: como los inicios de las flechas de  $V_4, V_5, V_6$  salen del mismo punto eléctrico (terminal  $n$ ) se mueven para cumplir esta condición. Ya se pueden marcar las puntas de los fasores con  $u, v, w$ , pues las puntas de las flechas de  $V_4, V_5, V_6$  se dirigen hacia ellos.
- e) Se superponen centrados los esquemas b) y d).
- f) Se trasladan juntos al centro de la esfera de un reloj y se *giran* también juntos para hacer coincidir la posición del terminal  $U$  (mayor tensión) con las 12. La posición del terminal  $u$  (menor tensión), que en este caso cae sobre la 1, indica el desfase del devanado de menor tensión respecto del de mayor tensión. En este caso es +11 hora, es decir

$$+11 \times 30^\circ = +330^\circ = -30^\circ$$

En la Fig. 46, p. 80, se analiza otro grupo de conexión Dyn distinto, el Dyn7.

Las bobinas en triángulo soportan  $\sqrt{3}$  veces más tensión que las bobinas en estrella porque las primeras están sometidas a la tensión compuesta  $U$  de la red y las segundas solo a la tensión simple  $V$ .

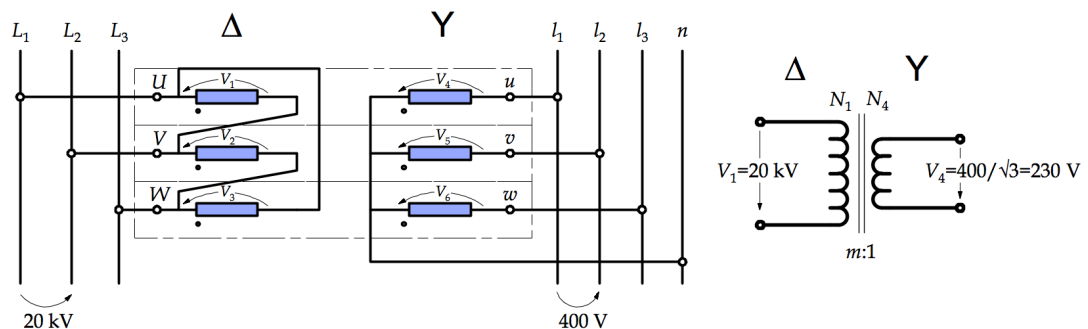


Fig. 45 En la conexión Dy la relación entre tensiones de línea no es la relación entre espiras.

Por definición la relación de transformación entre dos bobinas que abrazan el mismo flujo es el cociente entre su número de espiras. Pero esa relación *no es* la que se obtiene al considerar las tensiones de la línea a la que se conectan los transformadores tipo Dy. En la Fig. 45 se tiene que

$$\left. \begin{array}{l} U_1 = 20 \text{ kV} \\ U_2 = 400 \text{ V} \\ m = \frac{N_1}{N_4} = \frac{V_1}{V_4} \end{array} \right\} m = \frac{N_1}{N_4} = \frac{U_1}{U_2/\sqrt{3}}; \quad \frac{N_1}{N_4} = \sqrt{3} \frac{U_1}{U_2} = \sqrt{3} \frac{20 \text{ kV}}{0,4 \text{ kV}}$$

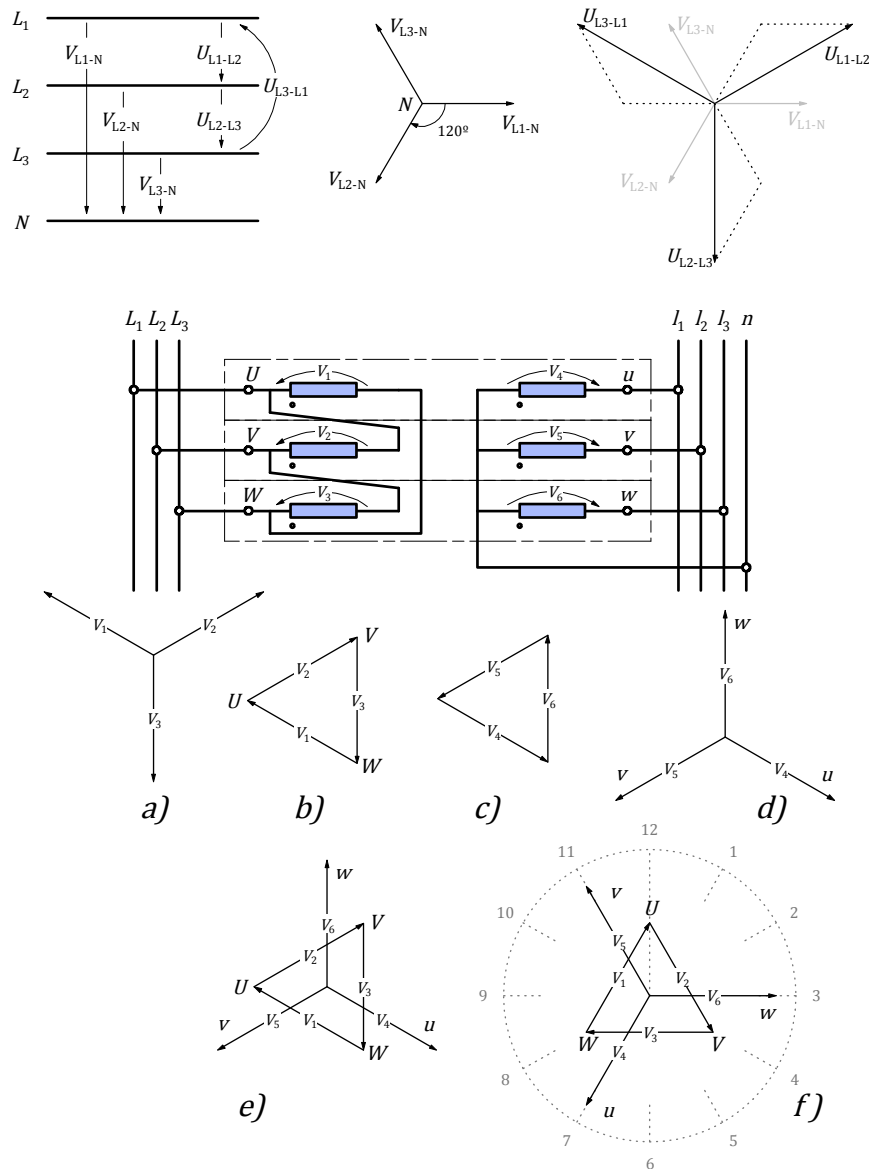


Fig. 46 Cableado y esquemas fasoriales de la conexión Dyn7.  
 El triángulo está conectado de la otra forma que admite (comparar con la Dyn11 de la Fig. 44).

### CONEXIONES YY

Los devanados en estrella no proporcionan filtrado de los terceros armónicos. Requieren conductores de mayor sección que los devanados en triángulo, porque a igual potencia, al estar sometidos a menor tensión necesitan soportar mayor intensidad. Al tener conductores de mayor sección resultan, sin embargo, más robustos frente a los esfuerzos dinámicos de los cortocircuitos.

Estos transformadores no inducen desfase entre las tensiones de primario y secundario, pero tampoco reequilibran las intensidades demandadas por cargas desequilibradas.

Son los preferidos para enlazar dos grandes sistemas de tensiones elevadas, como en la red de transporte.

## CONEXIONES DD

Son transformadores usualmente de baja tensión, que emplean conductores más finos y se comportan bien equilibrando las intensidades demandadas por la carga.

## CONEXIONES YZ

La conexión en zig-zag se emplea en los devanados de baja tensión de los pequeños transformadores de distribución porque permite extraer y distribuir el neutro y se comporta bien frente a desequilibrios en la carga.

### 1.6 Placa de características

La UNE-EN 60076-1 especifica, en el apartado 8, los contenidos mínimos de la placa de características de un transformador.

- Tipo de aparato (por ejemplo transformador, autotransformador, transformador serie, etc.).
- Número de la norma según la que se ha fabricado (la UNE-EN 60076).
- Nombre del fabricante, país y ciudad donde se montó el transformador.
- Número de serie del fabricante.
- Año de fabricación.
- Número de fases.
- Potencia nominal (en kVA o MVA).
- Frecuencia nominal (en Hz).
- Tensiones nominales para la toma principal y las demás tomas, en V o kV.
- Intensidades nominales (en A o kA).
- Grupo de conexión.
- Impedancia de cortocircuito medida expresada en tanto por ciento de la tensión de cortocircuito respecto de la tensión nominal para la toma central y, al menos, para las dos tomas extremas. En transformadores de más de dos devanados se tienen que indicar las impedancias para las diferentes combinaciones entre ellos, más los valores respectivos de la potencia de cada combinación.
- Tipo de refrigeración. Si el transformador tiene varios métodos de refrigeración aparte del nominal, los valores de las potencias correspondientes a cada modo

130

5

15

185

10.5

(MARCA Y DIRECCIÓN DEL FABRICANTE) CE

TRANSFORMADOR TRIFÁSICO 50 Hz REFRIGERACIÓN NATURAL

TIPO	ALTA TENSIÓN			
	POTENCIA ASIGNADA	POS. CONM. 1	POS. CONM. 2	TENSIÓN (V)
NÚMERO DE FABRICACIÓN		1		
NORMA UNE		2		
AÑO DE FABRICACIÓN		3		
SÍMBOLO DE ACOPLAMIENTO		4		
IMPEDANCIA CC A 75 °C (%)		5		
NIVEL POTENCIA ACÚSTICA 4B (A)		6		
PÉRDIDAS EN VACÍO (W)				
PÉRDIDAS DEBIDAS A LA CARGA 75 °C (W)				
CLASIFICACIÓN DE PÉRDIDAS				
MATERIAL CONDUCTOR AT/BT				
MASA DE LOS BOBINADOS (kg)				
VOLUMEN LÍQUIDO AISLANTE A 20 °C (l)				
MASA DEL LÍQUIDO AISLANTE A (kg)				
MASA A DESENCUBAR (kg)				
MASA TOTAL (kg)				

BAJA TENSIÓN

LÍNEA EN:	TENSIÓN (V)	CORRIENTE (A)	POTENCIA kVA
2U-2V-2W			

MATERIAL DEL CIRCUITO MAGNÉTICO

MATERIAL DEL CIRCUITO MAGNÉTICO (kg)

NIVEL DE AISLAMIENTO

	AT	u	AC
Um			
BT			

LÍQUIDO AISLANTE

Fig. 47 Placa de características de los transformadores fabricados en España según UNE 21428.



pueden expresarse en tantos por ciento de la potencia nominal (por ejemplo ONAN/ONAF 70/100%).

- n) Masa total, masa de transporte (si no coincide con la masa total), masa de desencubado (si la masa total sobrepasa 5 ton), y masa y tipo de líquido aislante, con referencia a la norma IEC correspondiente.
- p) Máxima potencia o intensidad de cortocircuito del sistema utilizada para determinar la capacidad de soportar cortocircuitos del transformador si no es infinita.
- q) Anotación abreviada según la UNE-EN 60076-3 de las tensiones soportadas por los aislamientos del transformador (niveles de aislamiento).
- r) Para todos los transformadores de intensidad instalados dentro del transformador, su posición, relación o relaciones de transformación, clases de precisión y potencia de precisión (en VA).

En los transformadores de más de dos devanados se debe dar la potencia nominal de cada uno de ellos. Se deben indicar también las combinaciones de carga, salvo si la potencia nominal de uno de los arrollamientos es igual a la suma de las potencias nominales de los demás arrollamientos.

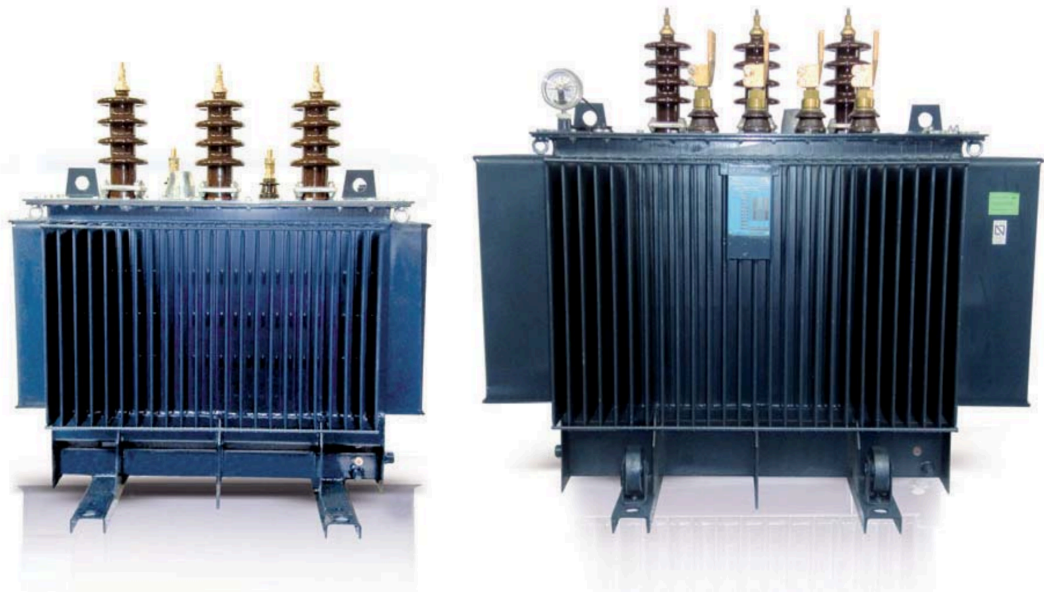
Puede ser necesario indicar más cosas en la placa si el transformador es especial o el fabricante o considera necesario para aclarar límites o condiciones de funcionamiento.

Además se deben suministrar placas con la identificación y características de los equipos auxiliares de acuerdo con las normas para tales equipos (aisladores, cambiadores de tomas, transformadores de intensidad, equipos especiales de refrigeración), bien sobre los propios componentes o bien sobre el transformador.

## **2 DISEÑO DE TRANSFORMADORES**

En este capítulo trataremos de cómo establecer los parámetros básicos que configuran un transformador de distribución.

No hay un orden único de pasos para llegar a una solución viable de una vez. Al contrario, y como ocurre en tantos ámbitos de la ingeniería, el camino es circular porque de un diseño preliminar de una parte se deducen restricciones para la siguiente que pueden ser inasumibles por ella, lo que obliga a regresar al principio y modificar lo ya calculado. El camino de diseño ha de verse, por tanto, más como *una espiral convergente a la solución* que como un sendero recto de inicio a fin.



TRANSFORMADOR / TRANSFORMER 250 kVA Serie 24 kV

TRANSFORMADOR / TRANSFORMER 630 kVA Serie 24 kV

Fig. 48 Transformadores de distribución sumergidos en aceite [GED].

## 2.1 Partes de un transformador trifásico

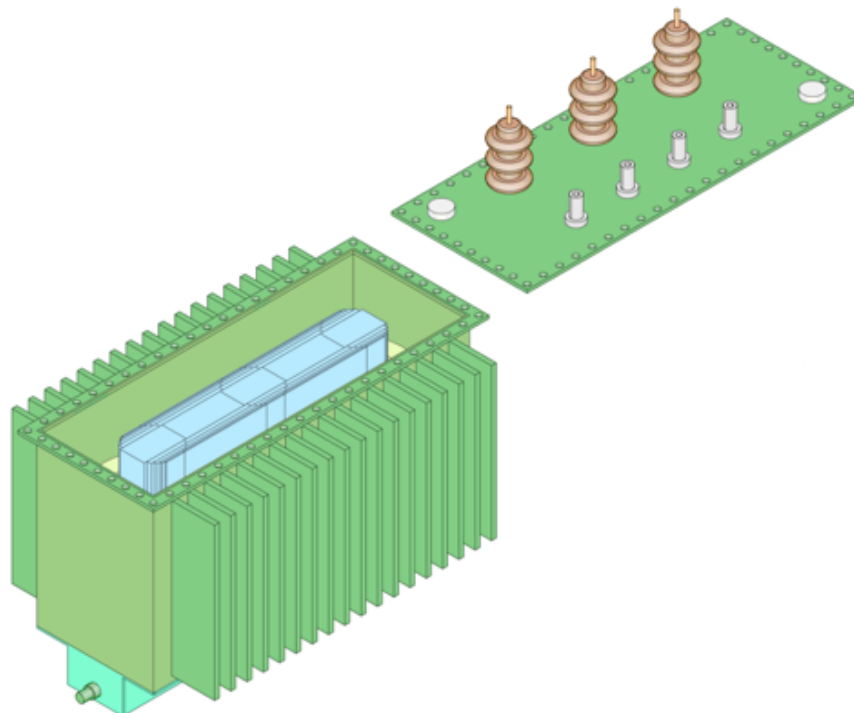


Fig. 49 Típico transformador trifásico de cuba elástica para llenado de aceite integral.

Un transformador refrigerado por aceite puede adoptar muchas formas dependiendo de su tamaño y requisitos de diseño, pero básicamente todos ellos se componen de una *parte activa* dentro de una *cuba* que contiene ese aceite refrigerante aislante (Fig. 49).

El sistema de refrigeración puede constar de aletas o de radiadores.

La *tapa* suele alojar los *bornes* a los que se conectan los devanados de que conste la máquina.

También lleva orificios para accesorios y el mando del conmutador o cambiador de tomas para alterar la relación de transformación.

Dada su posición sobre la tapa, junto a las bornas de alta tensión, nunca podrá ser un cambiador de tomas en carga (Fig. 50).

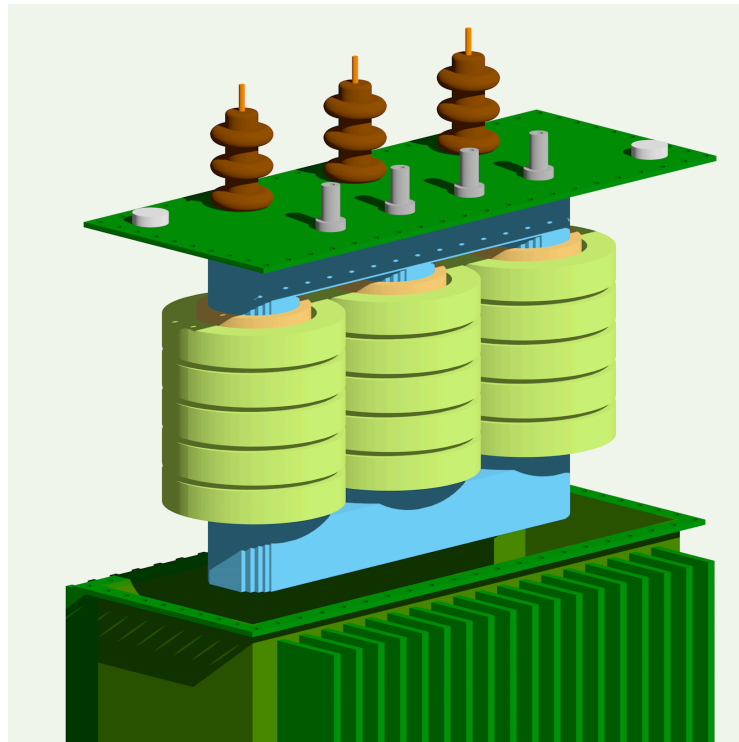


Fig. 50 Parte activa con tapa, lista para encubar.

Es habitual pasar de la representación 3D a 2D utilizando secciones paralelas al eje longitudinal de la máquina: en la Fig. 51 se ven rectángulos interiores altos y estrechos, rayados en diagonal y pegados a las columnas del núcleo, que representan las bobinas en color naranja de la Fig. 50: son las bobinas de baja tensión BT. Los pequeños rectángulos por fuera de los anteriores quieren representar las bobinas en color verde claro: son las bobinas de alta tensión AT, que se han construido como en "galletas" para dejar espacios de refrigeración entre ellas.

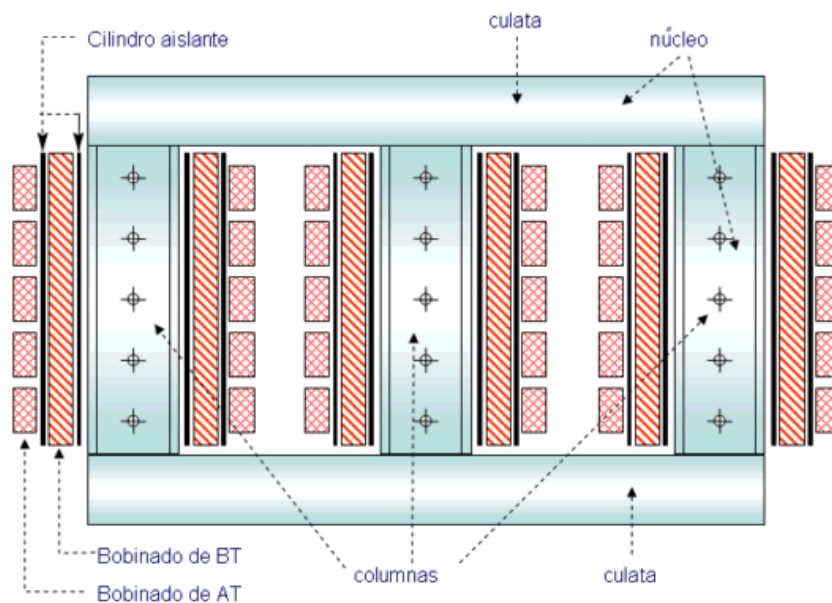


Fig. 51 Parte activa. Fuente: <http://endrino.pntic.mec.es>

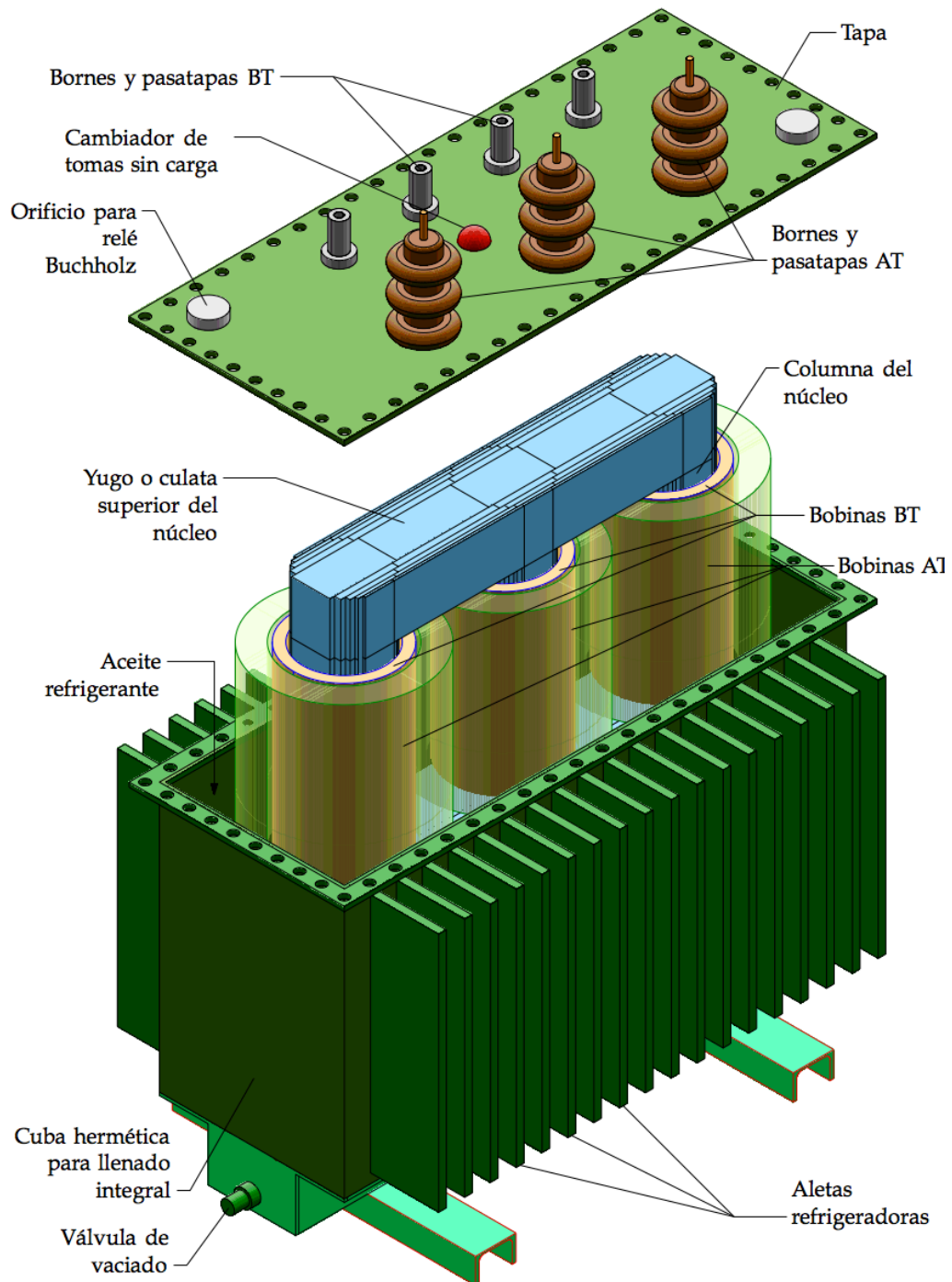


Fig. 52 Partes más importantes de un transformador de distribución.

El diseño completo de un transformador de este tipo implica resolver las ecuaciones que rigen sus parámetros eléctricos, y que son las que definen la forma de su parte activa (Fig. 53).

Después se diseñan los refuerzos y la tapa, y por último la cuba que contendrá a la parte activa completamente inmersa en aceite refrigerante y aislante.

Los ensayos de laboratorio determinarán si se ha conseguido construir la máquina con las prestaciones garantizadas.



Fig. 53 Parte activa sin tapa de un transformador de distribución durante un ensayo de cortocircuito. [GED]

## 2.2 Requisitos de diseño

Se trata de los parámetros impuestos por las necesidades a satisfacer. Normalmente vienen impuestas por el cliente, al que el fabricante solicita aclaraciones si es necesario.

- $S_N$  Potencia aparente nominal del transformador, en VA (aunque usualmente se da en kVA).
- $U_{1N}$  Tensión nominal primaria, en V (aunque si es el de mayor tensión, suele preferirse darla en kV). Es la tensión compuesta de la línea a la que se conectarán los bornes  $U, V, W$ , del primario del transformador.
- $U_{2N}$  Tensión nominal secundaria, en V. Es la tensión compuesta de la línea a la que se conectarán los bornes  $u, v, w$ , del secundario del transformador.
- [ ] El grupo de conexiones puede ser cualquiera de los estudiados, por ejemplo, Dyn11.
- $f$  Frecuencia de la red a la que va a conectarse, en Hz. En Europa son 50 Hz. En Estados Unidos son 60 Hz.
- $P_0$  Pérdidas en vacío, en W. Limitadas por el Reglamento (UE) 548/2014 de ecodiseño de transformadores (ver sección 1.2, p. 62).
- $P_k$  Pérdidas debidas a la carga, en W. Limitadas por el Reglamento (UE) 548/2014 de ecodiseño de transformadores (ver sección 1.2, p. 62).
- [ ] Requisitos especiales como:
  - Rango de tomas para modificar ligeramente la relación de transformación.
  - Tipo de cambiador de tomas a instalar (en carga, sin carga).

- Sobrecargas de funcionamiento previsible (tracción ferroviaria, parques fotovoltaicos).
- Altitud del emplazamiento sobre el nivel del mar (repercute negativamente en la refrigeración por la menor densidad del aire).
- Tipo de encapsulamiento (cuba elástica, cuba rígida con radiadores, sin cuba) y refrigeración (natural, forzada).
- Tres o más devanados.

### 2.3 Diseño del núcleo

El núcleo es un bastidor plano de tres columnas montadas sobre una viga base y cerradas por una viga superior o yugo.

Se construyen a partir de láminas de chapa ferromagnética de grano orientado, de menos de 1/4 de mm de espesor. Se cortan a partir de bobinas de diferentes anchos (Fig. 54) en una máquina de corte automático (Fig. 56).

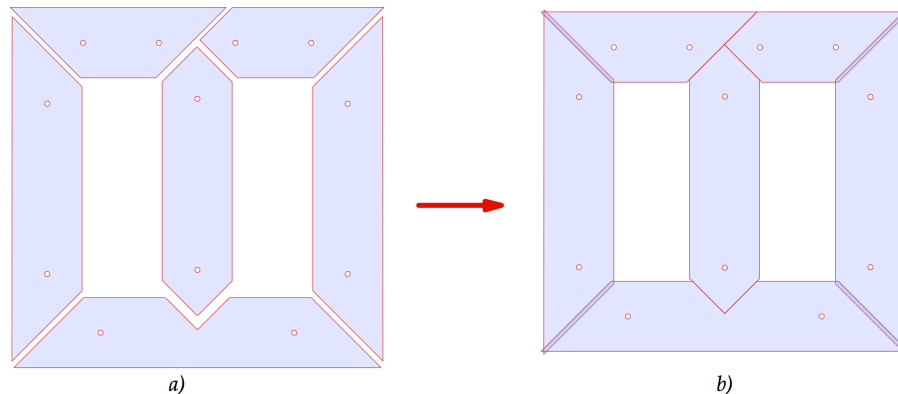


Fig. 54 Disposición habitual de chapas para núcleos.  
En máquinas pequeñas el yugo superior puede ser una sola pieza.



Fig. 55 Bobinas de chapa magnética sin cortar de distintos anchos. [GED]



Fig. 56 Máquina de corte automático de chapa ferromagnética. [GED]



Fig. 57 Chapas ya cortadas y punzonadas para un transformador de 50 kVA. [GED]



Fig. 58 Detalle del escalonamiento producido por la diferente longitud de cada chapa. [GED]

Como sugiere la Fig. 54 y se aprecia en la Fig. 58, cada chapa es de un tamaño ligeramente distinto de la anterior, de manera que se produce un escalonado que se ve correspondido por el yugo superior, que rellenará los huecos al encajar.

Las chapas se apilan cuidadosamente en horizontal (Fig. 59) con ayuda de pasadores que las dejan perfectamente centradas.

El resultado, tras un encintado para impedir que se desarme antes de recibir el yugo superior, es un núcleo preformado como los que se ven en la Fig. 60.



Fig. 59 Núcleo en proceso de apilamiento. [GED]



Fig. 60 Núcleos ya montados sobre la viga base con sus refuerzos de acero (culata). [GED]

En esta última imagen se pueden apreciar también las piezas de refuerzo de acero que se añaden a la viga inferior del núcleo para permitirle resistir los enormes esfuerzos durante un cortocircuito.

El diseño comienza a partir del diámetro del núcleo y de la selección del material para fabricarlo:

$D$  Diámetro del núcleo, en m.

$A_b$  Área o sección bruta del núcleo calculada a partir de su diámetro, en m<sup>2</sup>.

Como la sección es circular,  $A_b = \pi \frac{D^2}{4}$ .

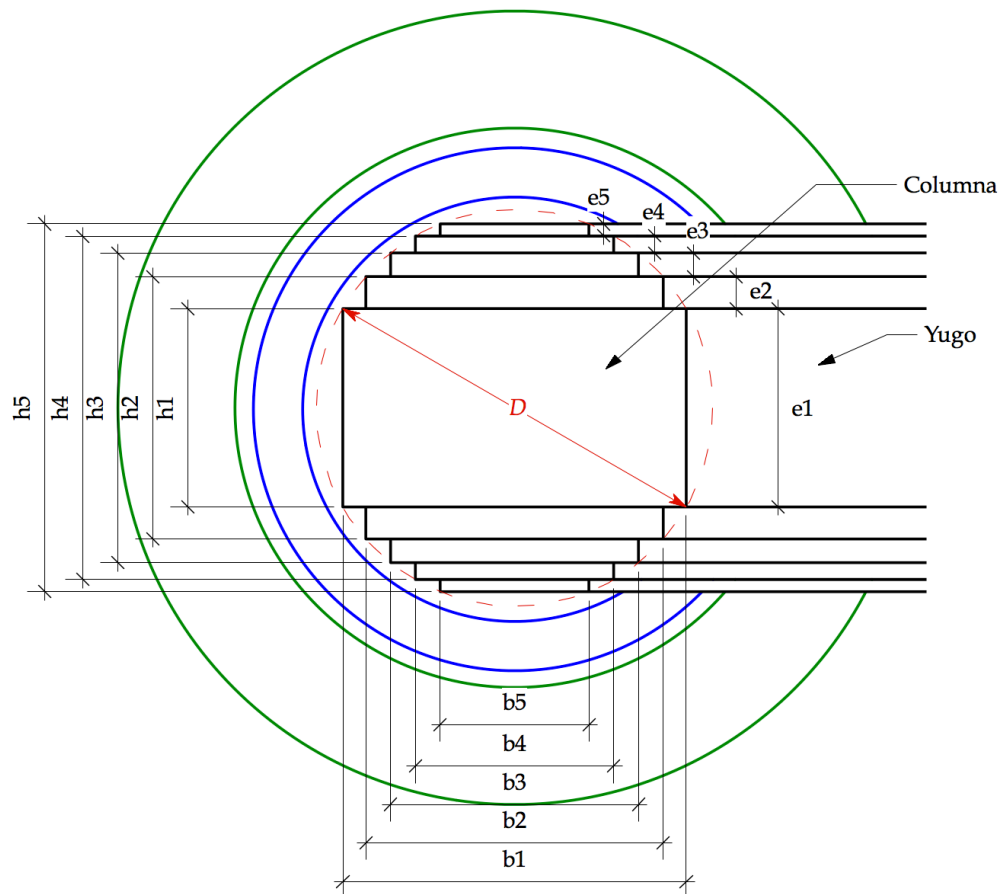


Fig. 61 Vista superior de una columna con detalle de los 5 escalones de que se compone.

$A$  Área neta de la sección del núcleo, que es la parte de la sección bruta efectivamente ocupada por chapa magnética (Fig. 61), en m<sup>2</sup>.

Para obtener el área neta  $A$  debemos considerar la forma real de construir un núcleo a partir de chapas magnéticas de diferente anchura  $b_i$  por escalones.

La altura  $h_i$  de cada escalón es función del número de chapas que se empleen en él, del espesor de cada una y del coeficiente de apilamiento:

$n_i$  Número de chapas de cada escalón.

$\delta$  Espesor de cualquier chapa, que será en todas el mismo, en m.

Modernamente se emplean espesores de 270  $\mu\text{m}$  y preferiblemente 230  $\mu\text{m}$  (230 micras,  $230 \times 10^{-6}$  m).



$k_0$  Coeficiente de apilamiento de las chapas ferromagnéticas, es decir, la relación entre el espesor real de cada escalón y el neto del material ferromagnético. Suele valer entre 1.03 y 1.08.

$e_i$  Espesor de cada escalón, en m.  
 $e_i = k_0 n_i \delta_i$

Para conseguir el mayor factor de ocupación con un determinado número de escalones, cada altura  $h_i$  y cada anchura  $b_i$  deben ajustarse a ciertas proporciones como las que se indican en la tabla:

SOLUCIÓN TRADICIONAL PARA UN NÚCLEO DE 5 ESCALONES

Escalón	1°	2°	3°	4°	5°
$C_b$	0.90	0.82	0.70	0.53	0.32
$C_h$	0.32	0.53	0.70	0.82	0.90

Los coeficientes de la tabla determinan la relación entre el diámetro  $D$  del núcleo y las dimensiones de cada escalón, de donde se deduce después el número de chapas que lo componen:

$$b_i \leq C_b D; \quad h_i \leq C_h D; \quad e_i = \frac{h_i - h_{i-1}}{2}; \quad n_i \leq 2 \frac{e_i}{k_0 \delta}$$

Para un núcleo como el mostrado en la Fig. 61 el área neta es la suma de las áreas de todos los escalones sin considerar el incremento por el factor de apilamiento  $k_0$ , es decir

$$A_i = n_i b_i \delta; \quad A = \sum A_i$$

El *factor de ocupación* del núcleo es la relación entre ambas áreas:

$$\text{Factor de ocupación}(\%) = \frac{A}{A_b} \times 100$$

Debe lograrse la mayor ocupación posible para que el núcleo rellene al máximo el interior hueco las bobinas y éstas no se deformen inaceptablemente en caso de tener que soportar las enormes intensidades de cortocircuito.

#### EJEMPLO 1

Núcleo de  $\varnothing$  165 mm, espesor chapa 230  $\mu$ m, factor apilamiento  $k_0 = 1.05$  y 5 escalones:

	1°	2°	3°	4°	5°	
$C_b$	0.95	0.85	0.71	0.56	0.43	
$C_h$	0.33	0.53	0.71	0.83	0.90	
$b_i$ (mm)	156	140	117	92	71	
$h_i$ (mm)	54	87	116	137	149	
$e_i$ (mm)	54	17	15	10	6	
$n_i$	223	140	120	86	50	
$A_i$ (mm <sup>2</sup> )	8001	4508	3229	1820	817	
$A$ (mm <sup>2</sup> )	18 375				factor ocupación (%)	85.9 %
$A_b$ (mm <sup>2</sup> )	21 382				total chapas $n$	619

Las vigas horizontales del núcleo (yugos) llevarán la misma composición que las columnas.

Las dimensiones geométricas permiten obtener el volumen de material ferromagnético y, con su densidad, la masa total de chapa empleada, que con la inducción nominal  $B_n$



de la máquina determinan las pérdidas en el núcleo por histéresis magnética y corrientes parásitas (ver apartado 2.7, p. 109).

### EJEMPLO 2

El ejemplo 1 anterior es una mera solución teórica porque no se pueden conseguir en el mercado chapas de cualquier ancho: se fabrican de 160 mm pero no de 156 mm, de 140 mm sí pero no de 117 ni de las demás medidas. Por tanto, el diseño es correcto teóricamente pero no es viable en la práctica.

Esta otra solución también es para un núcleo de  $\varnothing 165$  mm, espesor chapa 230  $\mu$ m, factor apilamiento  $k_0 = 1.05$ , pero con chapas de ancho comercial:

	1°	2°	3°	4°	5°
$C_b$	0.970	0.848	0.727	0.606	0.364
$C_h$	0.244	0.529	0.686	0.795	0.932
$b_i$ (mm)	160	140	120	100	60
$h_i$ (mm)	40	87	113	131	154
$e_i$ (mm)	40	24	13	9	11
$n_i$	167	194	108	74	94
$A_i$ (mm <sup>2</sup> )	6146	6247	2981	1702	1297
$A$ (mm <sup>2</sup> )	18 372			factor ocupación (%)	85.9%
$A_b$ (mm <sup>2</sup> )	21 382			total chapas $n$	637

### EJEMPLO 3

Esta es también una solución para el caso del Ejemplo 2 pero se ha logrado mejorar el factor de ocupación sin aumentar el número de chapas, con lo que el núcleo conferirá al transformador mayor robustez mecánica frente a esfuerzos por cortocircuitos:

	1°	2°	3°	4°	5°
$C_b$	0.970	0.848	0.727	0.545	0.364
$C_h$	0.244	0.529	0.686	0.838	0.932
$b_i$ (mm)	160	140	120	90	60
$h_i$ (mm)	40	87	113	138	154
$e_i$ (mm)	40	24	13	13	8
$n_i$	167	194	108	104	64
$A_i$ (mm <sup>2</sup> )	6146	6247	2981	2153	883
$A$ (mm <sup>2</sup> )	18 409			factor ocupación (%)	86.1 %
$A_b$ (mm <sup>2</sup> )	21 382			total chapas $n$	637

### Notas para el cálculo

- Los parámetros de diseño son el diámetro  $D$  (mm) del núcleo y la anchura  $b_i$  (mm) de las chapas disponibles. Se busca la combinación de chapas que permita obtener el factor de ocupación (%) más alto posible.
- A partir de cada anchura  $b_i$  (mm) se calculan los coeficientes  $C_b = b_i/D$ .
- Por el teorema de Pitágoras se calculan ahora los  $C_h = \sqrt{1 - C_b^2}$ .
- Ya se pueden obtener los  $h_i = C_h D$  (mm).
- El espesor del escalón central  $e_1$  coincide con el valor de  $h_1$ . Para los demás

se cumple lo ya visto de  $e_i = \frac{h_i - h_{i-1}}{2}$ .

- f) El número de chapas del escalón central es  $n_1 \leq \frac{e_1}{k_0 \delta}$ . Para los demás se calcula como  $n_i \leq 2 \frac{e_i}{k_0 \delta}$ .
- g) Conocidos el número de chapas, su anchura y su grosor se calculan el área neta de cada escalón y el área neta total:  $A_i = n_i b_i \delta$ ;  $A = \sum A_i$
- h) El factor de ocupación (%) es la relación entre el área neta ocupada por la chapa magnética  $A$  y el área bruta  $A_b$  disponible para el núcleo así:  $100 \times A / \pi D^2$ .

## 2.4 Diseño de los bobinados

De los requisitos de diseño del apartado 2.3, p. 86, se deducen ya algunas magnitudes eléctricas fundamentales para la máquina:

$I_{1N}$  Intensidad nominal primaria, en A. Es la intensidad de cada borna del primario del transformador.

$I_{2N}$  Intensidad nominal secundaria, en A. Es la intensidad de cada borna del secundario del transformador.

La relación entre la potencia, las tensiones nominales y las intensidades nominales siempre es, para cualquier grupo de conexiones del transformador:

$$S_N = \sqrt{3} U_{1N} I_{1N} = \sqrt{3} U_{2N} I_{2N}$$

$V_{F1}$  Tensión a la que se somete cada bobina del devanado primario, en V.

$V_{F2}$  Tensión a la que se somete cada bobina del devanado secundario, en V.

En función del tipo de conexión de cada devanado se tiene que:

	Triángulo $\Delta$	Estrella Y
Primario	$V_{F1} = U_1$	$V_{F1} = U_1 / \sqrt{3}$
Secundario	$V_{F2} = U_2$	$V_{F2} = U_2 / \sqrt{3}$

Como ya vimos en la sección 1.1 a partir de la pág. 53, el valor eficaz de la tensión inducida en los bobinados lo proporciona la ley de Faraday:

$$e = N \frac{d\Phi}{dt}; \quad \Phi = \frac{1}{N} \int e dt$$

Esa tensión es prácticamente la misma que la tensión simple  $v$  de la red a la que se conecta el devanado que corresponda. Por ello pudimos entonces calcular el flujo a que da lugar, y que es el flujo siempre presente en el núcleo, así:

$$v = V_m \cos \omega t = \sqrt{2} V_F \cos \omega t$$

$$\Phi = \frac{1}{N} \int v dt = \frac{1}{N} \int \sqrt{2} V_F \cos \omega t dt = \frac{\sqrt{2} V_F}{N \omega} \sin \omega t$$



Esto da para el flujo máximo el valor

$$\Phi_m = \frac{\sqrt{2}V_F}{N\omega}, \text{ con } \omega = 2\pi f$$

que, como se dijo en su momento, viene *exclusivamente* impuesto por la red a través de  $V_F$  y  $f$ , y por el número de espiras  $N$  de la bobina conectada a la red, todos valores constantes. Por eso se puede hablar del *flujo en el núcleo*.

Al despejar  $V_F$  de la última ecuación se obtiene la ecuación fundamental de diseño eléctrico de una máquina de inducción en corriente alterna, que relaciona la tensión  $V_F$  aplicada a una bobina y su frecuencia  $f$  con ese flujo máximo en su núcleo cuando el solenoide tiene  $N$  espiras :

$$V_F = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f N \Phi_m$$

Como la definición del flujo magnético  $\Phi$  en el interior de un solenoide a través de una sección perpendicular  $A_b$  es simplemente

$$\Phi = B S = B A_b, \text{ y para los valores máximos } \Phi_m = B_m A_b$$

se llega a la ecuación de diseño más usada, que proporciona el número de espiras de un solenoide en función de la inducción máxima  $B_m$  (en T, teslas) asignada a su núcleo y el área bruta  $A_b$  de este, para una tensión  $V$  y frecuencia de red  $f$  dadas:

$$V_F = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f N B_m A_b; \quad N = \frac{\sqrt{2}}{2\pi f B_m A_b} V_F$$

donde:

- $V_F$  Valor eficaz de la tensión alterna aplicada a la bobina, en V.
- $f$  Frecuencia de esa tensión alterna, en Hz.
- $N$  Número de espiras de la bobina.
- $B_m$  Inducción máxima asignada al núcleo, en T.
- $A_b$  Área de la sección perpendicular del núcleo de esa bobina, en m<sup>2</sup>.

Y un parámetro muy útil también es el de voltios por espira, que se obtiene a partir de la tensión nominal de cada bobina entre el número de espiras de esta:

- $V_T$  Valor eficaz de la tensión inducida en cada espira, usualmente llamado *voltios por espira*, en V:

$$V_T = \frac{V_F}{N} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f B_m A_b$$

Es el mismo valor para todos los devanados salvo por los errores de redondeo al tener que ser el número de espiras un número natural:

$$V_{T1} = \frac{V_{F1}}{N_1} \approx V_{T2} = \frac{V_{F2}}{N_2}$$

#### EJEMPLO 4

Vamos a empezar el diseño de un transformador Dyn11, 20 kV  $\pm 2 \times 2.5\%$ /420 V,  $B_m = 1.45$  T, con el núcleo definido en el Ejemplo 3 anterior:

$$\text{Para el primario } N_1 = \frac{\sqrt{2} V_{F1}}{2\pi f B_m A_b} = \frac{\sqrt{2}}{2\pi} \frac{20\,000}{50 \times 1.45 \times \pi \frac{0.165^2}{4}} \approx 2904 \text{ espiras}$$

$$\text{Para el secundario } N_2 = \frac{\sqrt{2} V_{F2}}{2\pi f B_m A_b} = \frac{\sqrt{2}}{2\pi} \frac{\frac{420}{\sqrt{3}}}{50 \times 1.45 \times \pi \frac{0.165^2}{4}} \approx 35 \text{ espiras}$$

$$V_{T1} = \frac{V_{F1}}{N_1} = \frac{20\,000}{2904} = 6.89 \text{ V}$$

*Voltios por espira*

$$V_{T2} = \frac{V_{F2}}{N_2} = \frac{\frac{420}{\sqrt{3}}}{35} = 6.93 \text{ V}$$

donde la diferencia entre  $V_{T1}$  y  $V_{T2}$  se debe al redondeo en el número de espiras.

Cuando hay un cambiador de tomas que permite modificar la relación de transformación el número de espiras aumenta en consecuencia. En este caso en el primario hay que prever un  $+2 \times 2.5\% = 5\%$  más de espiras y por ello habrá que diseñar ese devanado para

$$N'_1 = 1.05 N_1 = 1.05 \times 2904 = 3049 \text{ espiras}$$

La geometría de la bobina (Fig. 75) viene impuesta por el diámetro del núcleo:

- En un arrollamiento concéntrico, donde una bobina está dentro de la otra y ambas tienen la misma longitud axial, el núcleo determina el diámetro interior solo de la bobina de baja tensión.
- En arrollamientos por discos o "galletas" ambos conjuntos de bobinas, baja tensión y alta tensión, tienen el mismo diámetro interior impuesto por el diámetro del núcleo.

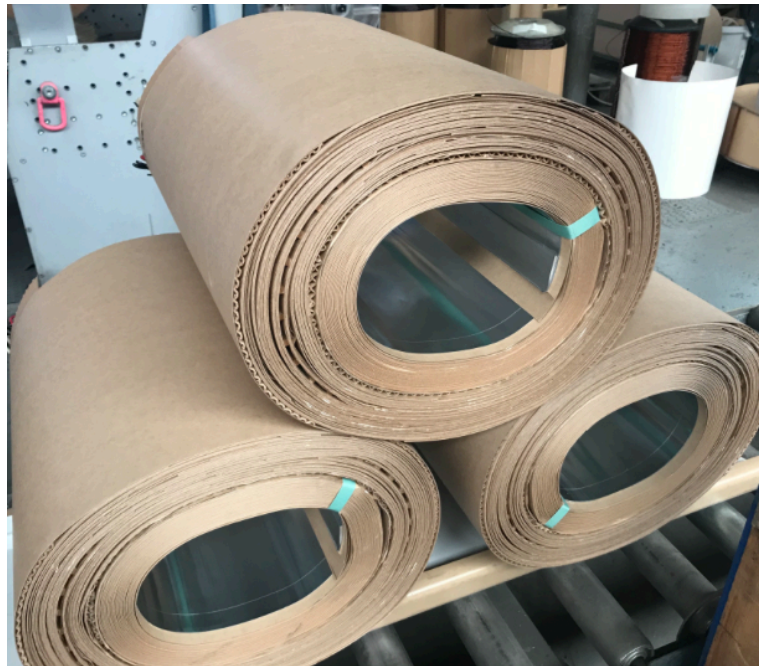


Fig. 62 Bobinas concéntricas, BT interior y AT exterior. [GED]

La longitud de las bobinas concéntricas suele determinarla la anchura de la banda conductora con la que se construye el devanado de baja tensión (Fig. 63). Después el devanado de alta tensión se enrolla encima (Fig. 64 y Fig. 65) en una máquina bobinadora distinta, que emplea hilo de sección circular (Fig. 66).



Fig. 63 El operario comienza a enrollar banda conductora para la bobina de BT. [GED]



Fig. 64 Después se pasa a bobinar encima las capas de la bobina AT. [GED]



Fig. 65 Bobinando las capas del devanado AT. [GED]



Fig. 66 Parte trasera de la bobinadora AT y carrete de hilo (abajo derecha). [GED]



Fig. 67 El calor seca y endurece las bobinas. [GED]



Fig. 68 Línea de montaje para ensamblado y conexionado de la parte activa. [GED]

Las resinas del papel aislante con el que se separan las capas de las bobinas se endurecen por efecto del calor (Fig. 67), que también retira buena parte de la humedad contenida en los aislantes. La parte eléctrica del transformador trabajará inmersa en aceite aislante, y cualquier vestigio de humedad es altamente perjudicial.

A continuación las bobinas se apilan por tamaños (Fig. 69) y están listas para ser insertadas en los núcleos prefabricados ya en la línea de conexionado eléctrico interno (Fig. 68). Entran con cierto esfuerzo si el coeficiente de ocupación del núcleo es elevado y no se ha previsto la holgura necesaria (Fig. 70).



Fig. 69 Bobinas endurecidas y secas, listas para insertarlas en los núcleos prefabricados. [GED]



Fig. 70 Después se encajan a presión en las columnas del núcleo. [GED]

El núcleo con las bobinas ya insertadas se cierra con el yugo y se refuerza con vigas (Fig. 71) que le aporten solidez frente a los enormes esfuerzos que inducirán los cortocircuitos que deba soportar la máquina durante su vida útil.



Fig. 71 Sobre el yugo de cierre del núcleo se colocan los separadores y la culata de refuerzo. [GED]

Las fuerzas internas en los devanados derivan de la interacción entre los campos electromagnéticos que crean todas las corrientes eléctricas, que se agrandan decenas o cientos de veces durante los cortocircuitos externos que alimenta el transformador. Su análisis suele requerir análisis numéricos por métodos computerizados, normalmente mediante elementos finitos. Son fundamentalmente de dos tipos:

- *Radiales*: las bobinas tienden a dilatarse y encogerse en el sentido de su anchura

(radio). Ocurren los siguientes fenómenos mecánicos:

- *Dilatación*: la tensión soporta sin problemas el hilo, pletina o banda conductora, que trabajan a tracción. No deforman permanentemente las bobinas.
- *Contracción*: las bobinas se comprimen hacia el interior, y tienden a pandear por secciones, arrugándose. El núcleo es el que proporciona la resistencia necesaria para evitar que el pandeo y la consiguiente deformación permanente se produzcan.
- *Longitudinales*: las bobinas se estiran y se contraen en el sentido de su altura (Fig. 73), desplazándose las de alta tensión respecto de las de baja tensión, vibrando terriblemente. Este temblor tiende a deformar permanentemente los devanados y a desencajar también el núcleo de forma permanente.

El diseñador debe contrarrestar estas vibraciones mediante sujeciones mecánicas suficientes. Por eso se han intercalado calzos de nylon, de color claro en la Fig. 71, entre las bobinas y las vigas de refuerzo.

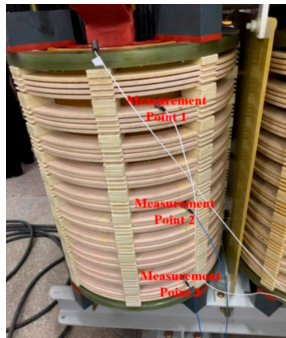


Fig. 72 Devanado AT en discos o "galletas" [YAN]

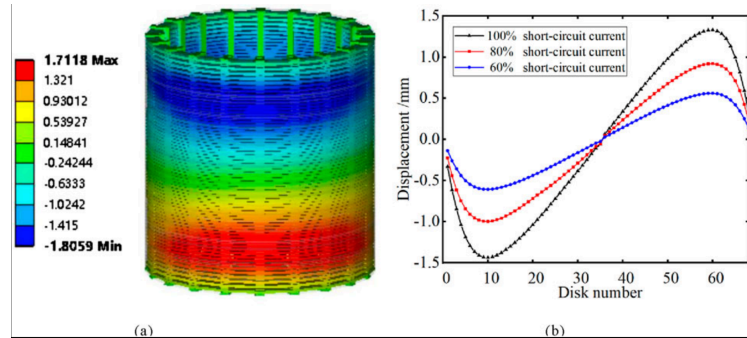


Fig. 73 Estado del devanado anterior, estirado verticalmente, a los 10 ms de iniciado el cortocircuito [YAN]

Los compradores suelen exigir verificar el aguante de los transformadores frente a cortocircuitos requiriendo ensayos reales, en verdadera magnitud, que se llevan a cabo en laboratorios electrotécnicos especializados. Esto solo es posible para transformadores de distribución y pequeña potencia (hasta 3 MVA aproximadamente). A partir de ahí solo puede demostrarse el aguante mediante cálculos.

Después de colocadas las bobinas, el yugo que cierra el núcleo por arriba y las vigas y refuerzos de todo, se pone la tapa con todos sus elementos y es cuando se interconectan las bobinas y sus bornes. Con un aparato específico se comprueban ahora las conexiones (Fig. 74).



Fig. 74 Parte activa con tapa ya instalada, durante la comprobación de continuidad y del grupo de conexiones. [GED]

A partir de la restricción impuesta por la anchura de la banda empleada en la baja tensión se puede configurar fácilmente toda la parte activa que se representa en la Fig. 76.

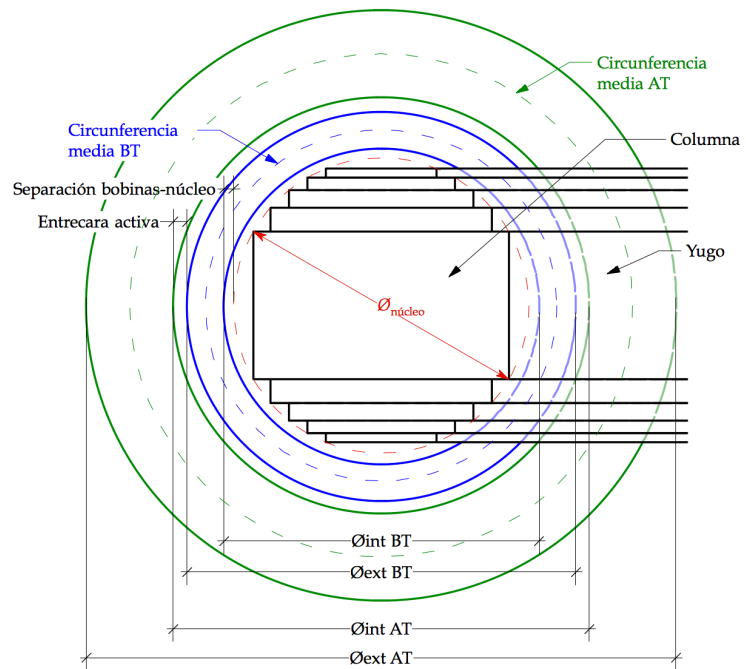


Fig. 75 Dimensiones del bobinado concéntrico (BT interior, AT exterior)

#### EJEMPLO 5

Parte activa de transformador de distribución definido en el Ejemplo 4:

- Baja tensión: 35 vueltas de banda de 600 mm de ancho y 1.10 mm de espesor, con separador aislante de 0.15 mm entre vuelta y vuelta. Para 550 A de intensidad nominal.
- Alta tensión:  $2904+5\%=3049$  vueltas de hilo de  $7.55 \text{ mm}^2$  de sección ( $\varnothing 3.10 \text{ mm}$ ), con barnices aislantes de  $100 \mu\text{m}$  de espesor y cartón separador aislante entre capas de espiras de 1.00 mm de espesor. Para 6.667 A de intensidad nominal.
- Canal separador entre bobinas AT-BT, llamado entrecara activa:  $a = 16 \text{ mm}$ .
- Holgura entre núcleo y bobina BT para posibilitar el montaje: 5 mm.

Si es la anchura de la banda de BT la que impone la longitud de la bobina, la solución puede ser la siguiente:

Devanados concéntricos	AT	BT
Forma conductor	Circular	Rectangular
Altura conductor (mm)	3.10	600 (1)
Anchura (grosor) conductor (mm)	3.10	1.10 (2)
Espesor aislamiento conductor (mm)	0.10 (3)	0.00
Espesor aislamiento capa (mm)	1.00 (3)	0.15 (3)
Sección conductor ( $\text{mm}^2$ )	7.55	660.00
Densidad de corriente ( $\text{A}/\text{mm}^2$ )	0.88 (4)	0.83 (4)
Altura parte activa bobina $L_b$ (mm)	600	600
Altura por espira (mm)	3.3	600
Espiras por capa	181	1
Capas teóricas	16.85	35.00
Capas adoptadas	17	35
Espiras de la última capa	153	1



<b>Devanados concéntricos</b>	<b>AT</b>	<b>BT</b>
Espesor bobina $b$ (mm)	74	44
Separación núcleo-bobina (mm)	5.0 (3)	
Ancho entre cara activa $a$ (mm)	16.0	
$\emptyset$ interior bobina (mm)	295	175
$\emptyset$ exterior bobina (mm)	443	263
$\emptyset$ medio bobina (mm)	369	219
L espira media (m)	1.159	0.688
Longitud total conductor (m)	3534.55	24.08
Volumen neto conductor (dm <sup>3</sup> )	26.678	15.893

- (1) Disponible de 400 mm a 1200 mm en saltos de 50 mm.
- (2) Disponible de 0.5 mm a 1.5 mm en saltos de 0.1 mm.
- (3) Esta medida no puede variar.
- (4) Conviene que la densidad de corriente en ambos devanados sea lo más parecida posible para que no haya problemas de refrigeración en la máquina.

Una vez definidas las bobinas y la forma de cada columna y yugo del núcleo, ya se pueden ajustar las dimensiones geométricas de éste:

#### EJEMPLO 6

Para el mismo transformador del ejemplo anterior las dimensiones principales del núcleo se obtienen a partir de la Fig. 76 teniendo en cuenta que hay que dejar una holgura de 10 mm entre bobinas, y la misma entre bobinas y yugos, para dar los resultados de la tabla siguiente:

Datos:	
Diámetro del núcleo (mm)	165
Área bruta sección núcleo $A_b$ (m <sup>2</sup> )	0.0214
Área neta sección núcleo $A$ (m <sup>2</sup> )	0.0184
Altura bobinas $L_b$ (mm)	600
$\emptyset$ exterior bobinas (mm)	443
Holguras (mm) (1)	10 (*)
Ancho cinta lateral protecc. bobinas (mm) (2)	15 (*)
Cálculos:	
Altura libre columna (mm) (3)	650
Altura total núcleo (mm) (4)	970
Ancho de ventana (mm) (5)	293
Longitud total núcleo (mm) (6)	1066
Volumen por yugo (dm <sup>3</sup> ) (7)	19.62
Volumen por columna (dm <sup>3</sup> ) (7)	11.97
Volumen neto núcleo $V_{Fe}$ (dm <sup>3</sup> ) (8)	75.15

- (\*) Estas medidas no se pueden variar para no comprometer el montaje de las bobinas en el núcleo.
- (1) Se dejan entre bobinas adyacentes y también entre las bobinas y el yugo inferior y superior, es decir, es la *separación bobina-yugo* de la Fig. 76.
- (2) Para proteger los bordes de las bobinas y evitar fallos de aislamiento, se fabrican con cintas de refuerzo en ambos extremos (arriba y abajo), de 15 mm de ancho, que alargan por tanto la longitud de las bobinas en 30 mm.

- (3) Altura de las bobinas, más las cintas de borde, más las holguras hasta el yugo inferior y superior.
- (4) Altura libre de ventana más dos veces el ancho del primer escalón del núcleo ( $b_1$ ).
- (5) Diámetro exterior de la bobina más externa ( $AT$ ), más la holgura entre bobinas, menos el ancho del primer escalón del núcleo ( $b_1$ ).
- (6) Tres veces el ancho del primer escalón del núcleo ( $b_1$ ) más dos veces el ancho de la ventana.
- (7) Longitud total núcleo o Altura libre columna por la sección neta del núcleo  $A$ .
- (8) Suma de todos los volúmenes parciales (tres columnas y dos yugos).

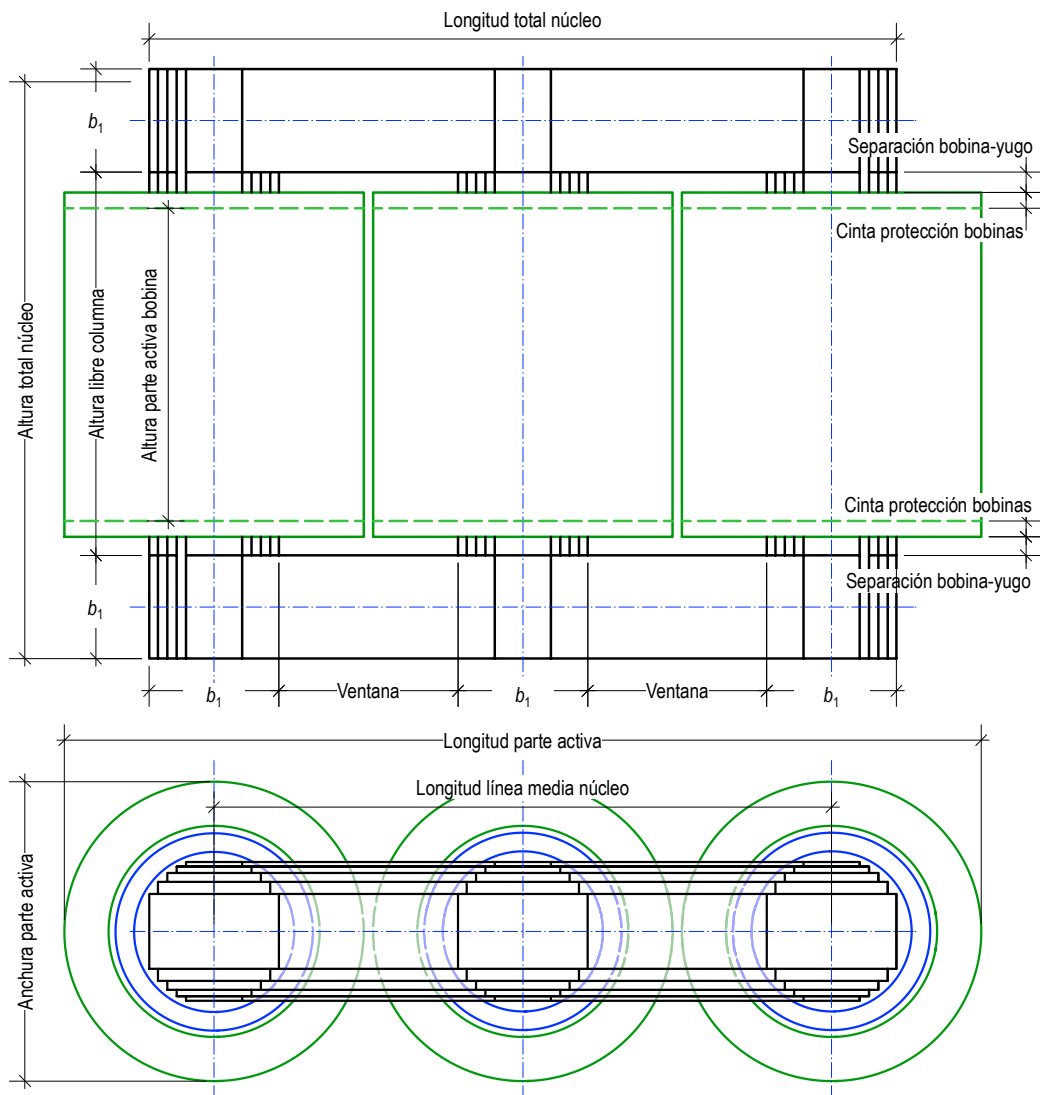


Fig. 76 Medidas generales de la parte activa de un transformador de bobinas concéntricas.

#### IMPEDANCIA DE CORTOCIRCUITO

Un requisito de las normas de fabricación de transformadores es la impedancia interna del transformador en caso de cortocircuito. Se trata de la impedancia  $Z_{cc}$  que opone la máquina cuando se la ensaya en condiciones de cortocircuito.

Puede expresarse en ohmios, pero normal es darla en porcentaje de la impedancia del transformador en condiciones nominales  $z_{cc}\% = (Z_{1cc}/Z_{1N}) \times 100$ . Este porcentaje es el mismo que el que representa la tensión a la que se hace el ensayo de cortocircuito respecto de la tensión nominal del devanado al que se aplica  $v_{cc}\% = (V_{1cc}/V_{1N}) \times 100$  y por eso a este número se le denomina indistintamente *impedancia de cortocircuito* o *tensión de cortocircuito*.

En efecto, el número coincide: en la Fig. 77 la impedancia nominal del circuito es, para los valores nominales de la tensión y la intensidad,  $Z_{1N} = V_{1N}/I_{1N}$ . Como en el ensayo de laboratorio se miden esos parámetros en cortocircuito, lo que se halla es  $Z_{1cc} = V_{1cc}/I_{1cc}$ . Multiplicando numerador y denominador por  $V_{1N}$  y recordando que en el ensayo se busca que  $I_{1cc} = I_{1N}$ , se comprueba que

$$Z_{1cc} = \frac{V_{1cc} V_{1N}}{I_{1cc} V_{1N}} = \frac{v_{cc}\% V_{1N}}{100 I_{1N}} = \frac{v_{cc}\%}{100} Z_{1N}; \quad z_{cc}\% = \frac{Z_{1cc}}{Z_{1N}} \times 100 = v_{cc}\%$$

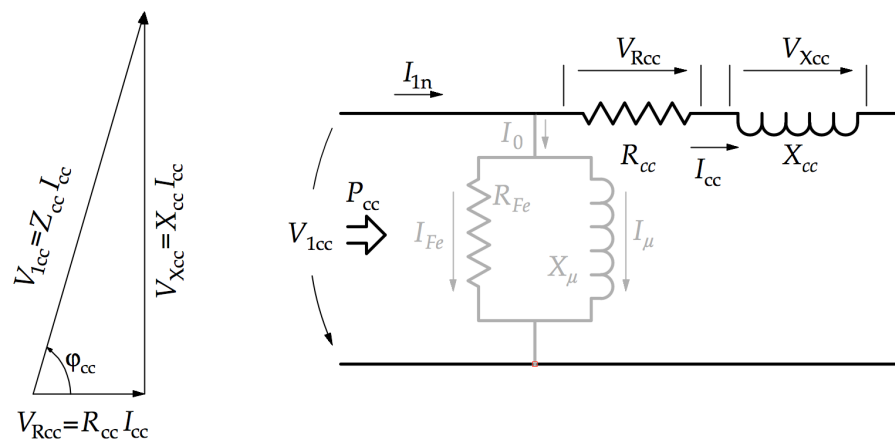


Fig. 77 Ensayo de cortocircuito de una fase de un transformador.

Lo normal es suponer que esa impedancia es prácticamente reactiva, pues la parte real resistiva es de ínfimo valor en comparación. Por eso se llama *reactancia de cortocircuito* a ese mismo valor, así:

$$Z_{1cc} \approx X_{cc}; \quad z_{cc}\% = X_{cc}\%$$

El valor de la reactancia se calcula a partir de las fórmulas de la Fig. 14, pág. 57. Según ellas se tiene, para cada devanado, que

$$L = -N \frac{d\Phi}{di}, \quad X = L\omega = L 2\pi f$$

Aunque para muchos casos es suficiente considerar solo el flujo principal, cuando se trata de precisar más, como ocurre en este caso, se necesita considerar todos los flujos involucrados, es decir, el *flujo de dispersión* que produce cada devanado y que atraviesa su propia masa de espiras, más el de dispersión de los demás devanados que puedan existir.

En efecto, no todas las líneas de fuerza del campo magnético recorren el núcleo del transformador, sino que algunas se cierran por fuera, a través del aceite, del cartón aislante y de la cuba metálica que rodean las bobinas, y de las propias bobinas (Fig. 78). Esta parte del flujo no interviene en el intercambio de energía entre primario y secundario, sino que genera pérdidas y caídas de tensión:

En la cuba las líneas de flujo dispersas van a producir circulación de corrientes generando unas pequeñas *pérdidas adicionales* que presentará la máquina.

En el interior de las propias bobinas inducen corrientes (ley de Faraday) opuestas a las principales (signo de Lenz) que en Electricidad se modelan como una caída de tensión retrasada  $90^\circ$  eléctricos, es decir, inductiva, como las que producen las reactancias. Se habla, entonces, de la reactancia causada por el flujo disperso, o *reactancia de dispersión*.

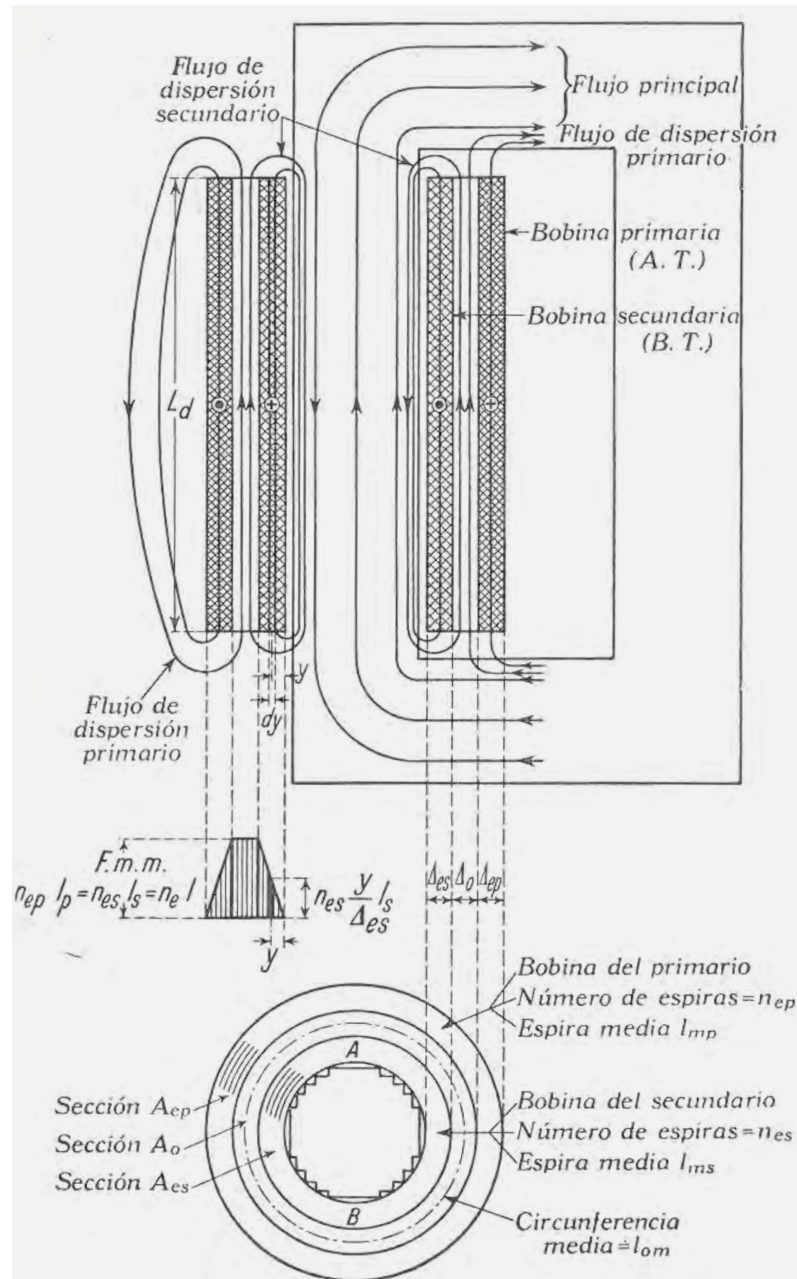


Fig. 78 El coeficiente de autoinducción  $L$  de ambos bobinados se calcula considerando el flujo principal y también todos los de dispersión [COR pág. 78].

La enorme variedad de medios que recorre el flujo disperso impide deducir con precisión una fórmula que proporcione el coeficiente  $L$  de toda la máquina. Pero pueden deducirse, sin embargo, fórmulas muy aproximadas para estimar  $L$  con bastante precisión, haciendo algunas simplificaciones al considerar la geometría de todos los devanados y los huecos entre ellos.



Esta es una de esas fórmulas, habitual para devanados concéntricos como los que llevamos vistos [BHL, capítulo 9]:

$$X_{cc} \% = K_b \frac{A_T}{L_d V_T} K_D \quad \text{con} \quad \begin{cases} K_b = \omega \mu_0 \frac{L_{mAT} + L_{mBT}}{2} \\ L_d = 2 (L_b + b_{AT} + b_{BT}) \\ K_D = a + \frac{b_{AT}}{3} + \frac{b_{BT}}{3} \end{cases}$$

- $K_b$  Constante de los devanados.
- $A_T$  Amperios vuelta del bobinado AT para la toma nominal, en A.
- $L_d$  Longitud del circuito magnético de dispersión, en m.
- $V_T$  Tensión por espira, en V.
- $K_D$  Constante geométrica, en m.
- $\omega = 2\pi f$  Pulsación nominal de la red, de frecuencia  $f$  en Hz.
- $\mu_0$  Permeabilidad magnética del aire =  $4\pi \times 10^{-7}$  en unidades S.I.
- $L_{mAT} L_{mBT}$  Longitudes de la espira media de los devanados AT y BT, en m.
- $L_b$  Longitud de la bobina más alta, en m.
- $b_{AT} b_{BT}$  Anchura (espesor) de la bobina AT y de la bobina BT, en m.
- $a$  Anchura (espesor) de la entrecara activa (separación entre la bobina BT y la bobina AT), en m.

#### EJEMPLO 7A

Con los datos de la tabla siguiente comprobar si la reactancia de cortocircuito de los bobinados del Ejemplo 6 ronda el  $4 \pm 10\%$  (entre 3.60% y 4.40%) empleando la fórmula anterior [BHL]:

	AT	BT
Datos:		
Ø medio bobina (mm)	369	219
Separación núcleo-bobina (mm)	5	
Ancho entrecara activa $a$ (mm)	16	
Espesor bobina $b$ (mm)	74	44
Vueltas nominales por bobina N	2904	35
Intensidad nominal por fase $I_F$	6.667 A	550 A
Altura bobina (mm)	600	600
Voltios por espira $V_T$	6.89 V	6.93 V
Frecuencia nominal	50 Hz	
Cálculos:		
Constante de los devanados $K_b$	0.000 3646	
Amperio vueltas $A_T$ (A)	19 360	19 245
Constante geométrica $K_D$ (m)	0.055 33	
Reactancia aproximada(%)	3.95% $\pm 10\%$	CUMPLE

Otra fórmula muy utilizada en España se deduce en el libro del Dr. Ingeniero Industrial D. JUAN CORRALES MARTÍN (*Teoría, cálculo y construcción de transformadores*, Editorial Labor S.A., Barcelona 1969, [COR]) y es la siguiente:



$$X_{cc}\% = 5.4 \times 10^{-6} f \frac{A_T}{V_T} A_d \quad \text{con} \quad \begin{cases} A_d = S_a + \frac{S_{BT} + S_{AT}}{3} \\ S = \pi \left( \frac{\varnothing_{ext}^2}{4} - \frac{\varnothing_{int}^2}{4} \right) \end{cases}$$

- $f$  Frecuencia de la red, en Hz.
- $A_T$  Amperios vuelta del bobinado AT, en A.
- $V_T$  Tensión por espira del bobinado AT, en V.
- $A_d$  Área de dispersión, en m<sup>2</sup>.
- $S_a$  Sección de la entrecara activa, en m<sup>2</sup>.
- $S_{AT} \ S_{BT}$  Sección de las bobinas AT y BT, calculadas a partir de sus diámetros exteriores e interiores  $\varnothing_{ext} \ \varnothing_{int}$ , en m<sup>2</sup>.

### EJEMPLO 7B

Con los datos de la tabla siguiente comprobar si la reactancia de cortocircuito de los bobinados del Ejemplo 6 ronda el  $4 \pm 10\%$  (entre 3.60% y 4.40%) empleando la fórmula anterior [COR]:

	AT	BT
Datos:		
Frecuencia nominal	50 Hz	
Vueltas nominales por bobina N	2904	
Voltios por espira $V_T$ (V)	6.89	
Amperio vueltas $A_T$ (A)	19 360	
$\varnothing$ interior bobina (mm)	295	175
$\varnothing$ exterior bobina (mm)	443	263
Cálculos:		
Sección bobina BT $S_{BT}$ (m <sup>2</sup> )	0.0303	
Sección entrecara activa $S_a$ (m <sup>2</sup> )	0.0140	
Sección bobina AT $S_{AT}$ (m <sup>2</sup> )	0.0858	
Área de dispersión $A_d$ (m <sup>2</sup> )	0.0527	
Reactancia aproximada (%)	4.00% $\pm 10\%$	CUMPLE

## 2.5 Pantalla electrostática

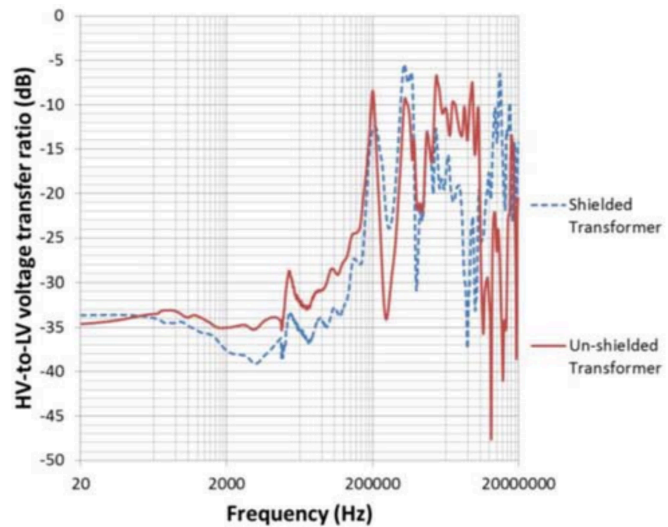
En ocasiones se coloca una espira de lámina metálica que abraza toda la bobina de baja tensión y que se suele conectar a tierra. Forma una pantalla electrostática que separa la bobina de alta de la de baja tensión. Se suele fabricar de cobre o aluminio y su utilidad es la siguiente:

Los devanados de alta y baja tensión se comportan como un condensador al estar muy próximos entre sí. Y un condensador permite el paso de corrientes de muy alta frecuencia, como las de los fenómenos transitorios en la red de alta tensión (maniobras, descargas atmosféricas) y las de aparatos electrónicos (variadores de frecuencia, convertidores cc/ca) con gran cantidad de componentes armónicas de alta frecuencia, en la red de baja tensión. La pantalla puesta a tierra intercepta estas corrientes que no pasan de un devanado al otro.

Así, la pantalla protege a los receptores de baja tensión alimentados por el transformador frente a las caídas de rayos, y frente a interferencias de alta frecuencia y ruidos eléctricos en la red de alta tensión.

Sin embargo, esa protección no es igualmente eficaz para todas las frecuencias.

Fig. 79 Alteración de la tensión del devanado BT al excitar el de AT con tensión de frecuencia creciente [KHA]



## 2.6 Conexiones entre bobinados y cambiadores de tomas

Las conexiones entre bobinas determinan el grupo de conexión normalizado requerido por cada modelo concreto. El fundamento teórico se explicó en la sección 1.5 Conexiones entre devanados, p. 71 ss. Aquí veremos cómo dotar a las máquinas de un número de tomas variable desde el exterior.

### CAMBIO DE TOMAS

Los cambiadores de tomas conmutan las conexiones que se sacan fuera de las bobinas para poder alimentar diferente número de espiras cada vez. La Fig. 80 representa varias posibilidades para hacerlo en un devanado trifásico conectado en triángulo. Generalmente la opción *b)* es la preferida y es la que se muestra en la Fig. 82. Es la mejor opción porque si las espiras extra que se colocan para dar las mayores relaciones de transformación están en el centro, no desequilibran la bobina cuando soporta los enormes esfuerzos mecánicos de las corrientes de cortocircuito que la máquina pueda sufrir a lo largo de su vida útil.

Sin embargo, esta opción complica algo más la fabricación de las bobinas y algunos fabricantes optan por *a)* (Fig. 81) y reforzar la estructura interior del transformador, calzando mejor las bobinas contra los yugos inferior y superior mediante gruesos tacos de nylon, como los que se muestran en la Fig. 74.

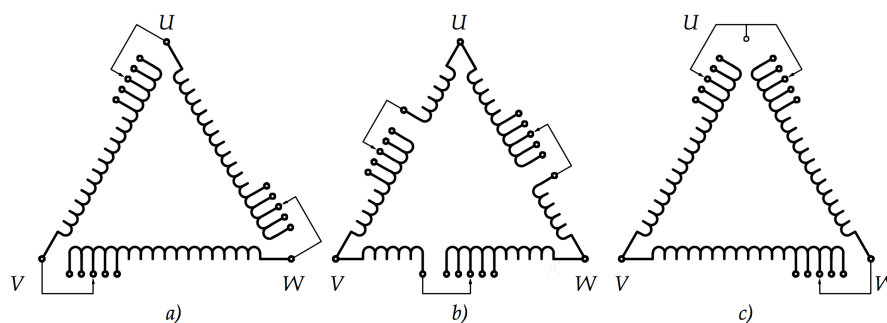


Fig. 80 Diferentes formas de organizar un cambio de tomas en un devanado en  $\Delta$ .

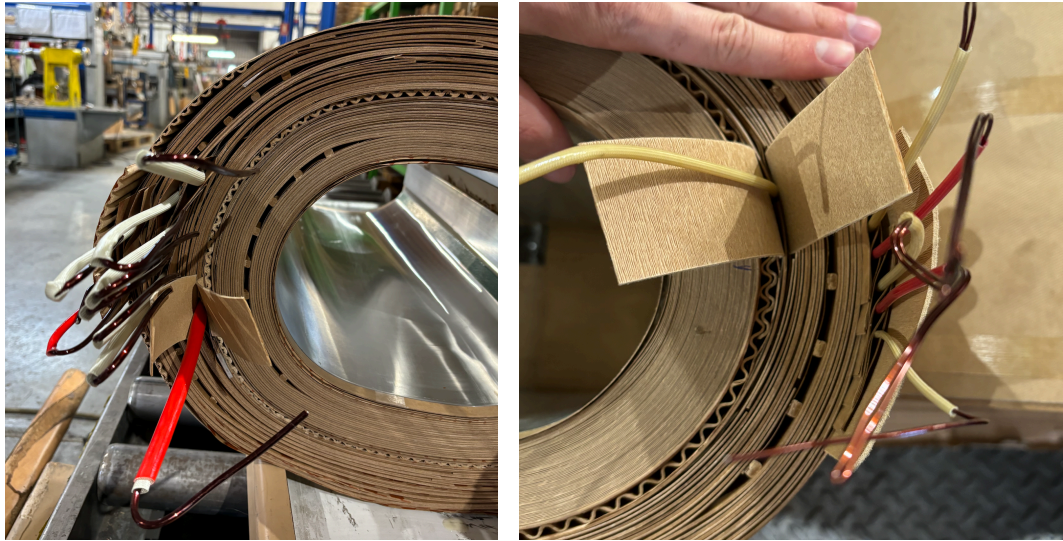


Fig. 81 Bobinas con las tomas en la parte exterior del devanado AT

Los cambiadores en tomas sin carga se manipulan con el transformador totalmente desconectado de las redes de alta y baja tensión. Son un mecanismo deslizante (Fig. 84) que, mediante al acción del operario en un solo mando, mueven tres contactos dobles a la vez, para accionar el cambio en las tres bobinas a la vez.

Los cambiadores de tomas en carga son aparatos muchísimo más complicados y los vemos más adelante.

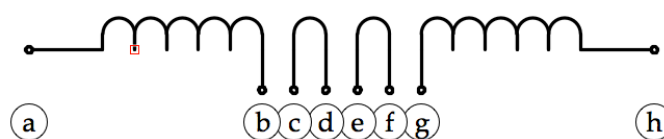
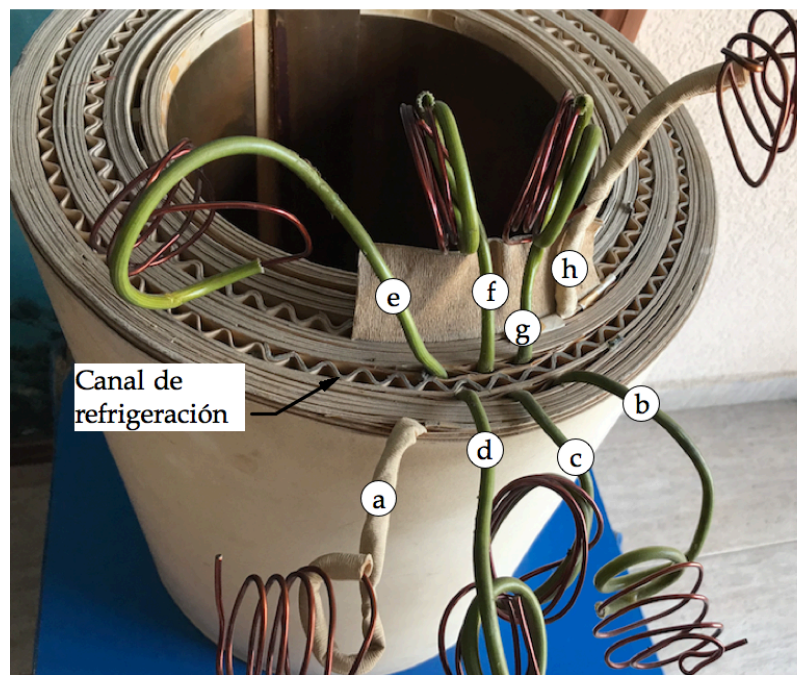


Fig. 82 Bobina con los extremos de las tomas del arrollamiento AT en la parte central del devanado [GED]

En la Fig. 83 a) se explica cómo se conectaría ese cambiador de tomas: en la posición 1 del cambiador, que puentea los dos contactos rojos de la izquierda, la corriente recorre las 10 espiras representadas en ese bobinado idealizado en *color negro*. Pero en la posición 3 el puente entre el *hilo verde y naranja* incorpora las 12 espiras al circuito.

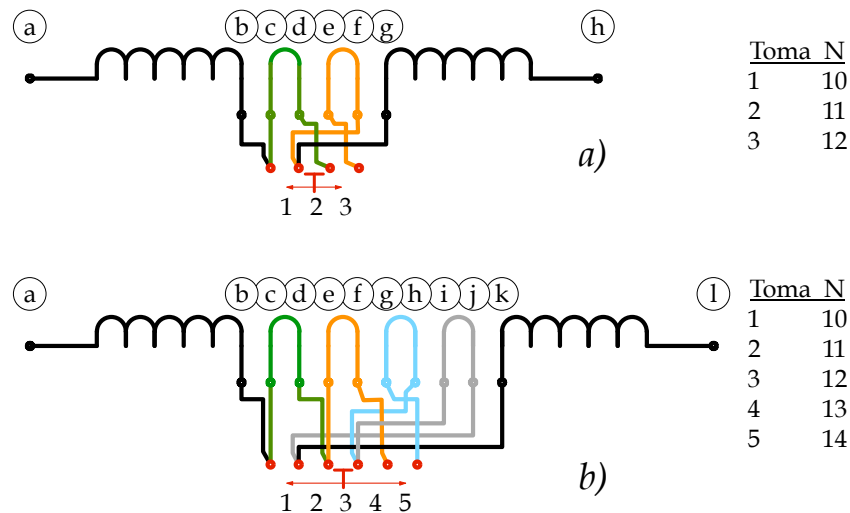


Fig. 83 El cambiador de tomas para la bobina de la Fig. 82 está representado en color rojo en la parte a) y es de 3 tomas. En b) se aprecia un cambiador para 5 tomas.

En la b) se aprecia un arrollamiento con 4 extremos más (hilos azul y gris) que permite instalar un cambiador de 5 tomas:

En la posición central 3 el puente del cambiador permite que la corriente circule por los hilos de colores negro, verde y gris (12 espiras), y en la posición 4 se añade el naranja (13 espiras). El azul entra en la posición 5 (14 espiras). No hay menos que en la posición 1 (10 espiras).

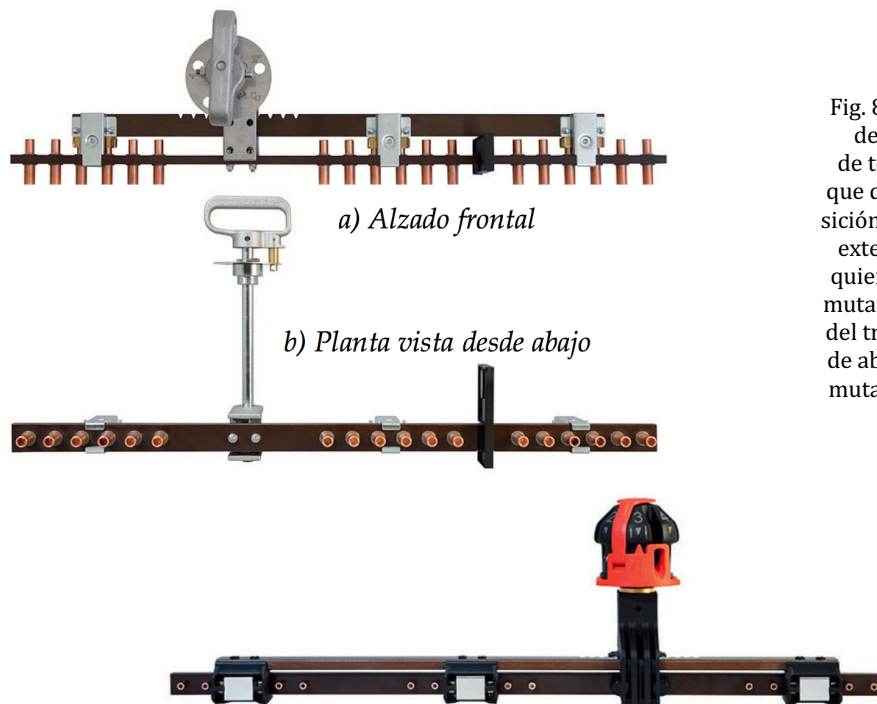


Fig. 84 Dos modelos de cambiadores de tomas sin carga, que difieren en la posición del conmutador externo. El de la izquierda es para conmutar desde el lateral del transformador. El de abajo es para conmutar desde su tapa.

El conmutador se instala normalmente bajo la tapa del transformador, encima de la culata, es decir, de los refuerzos del yugo superior (Fig. 86).



Fig. 85 Detalle de salida de cables hacia el cambiador. [GED]



Fig. 86 Detalle de espaciadores entre yugo y bobinas, refuerzos del yugo y salida de cables al cambiador de tomas. [GED]

Para seleccionar las diferentes tomas se accionará el conmutador que sobresale a través de la tapa del transformador (Fig. 87).

Esta operación nunca debe hacerse con el transformador en tensión, pues la posición del conmutador no es segura: al acceder a él el operario se acerca inaceptablemente a las bornas de alta tensión, poniendo innecesariamente en riesgo su vida. Es obligatorio desconectar la máquina de ambas redes (AT y BT) antes.

Por otra parte, la hipotética manipulación de este tipo de cambiadores con el transformador en tensión conllevaría necesariamente un apagado de la máquina, pues se pierde la continuidad del circuito al paso del mecanismo de una toma a otra.

Por eso este sistema de conmutación se denomina cambiador de tomas sin carga: no es apto para mantener durante la conmutación la tensión en la máquina.

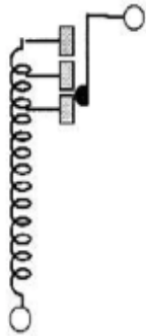


Fig. 87 El cilindro negro central es el conmutador del cambiador de tomas. [GED]

La Fig. 88 muestra en primer plano un cambiador de tomas en carga (OLTC, *On Load Tap Changer*) instalado bajo la tapa, junto a la parte activa, y que quedará dentro de la cuba de un transformador de potencia.

Este complejo mecanismo está internamente motorizado, dispone de un accionamiento remoto totalmente seguro, y es capaz de conmutar entre dos tomas contiguas sin perder en ningún momento la tensión en los devanados de la máquina.

Esta operación es compleja porque solo deslizar el conmutador entre tomas no basta. Como muestra el dibujo de la izquierda ¡en la posición intermedia se cortocircuitan espiras!



Esto resulta enormemente peligroso. Si por ejemplo la tensión entre espiras consecutivas es de 6.10 V y cada toma implica un salto de 328 espiras, cortocircuitar dos tomas cuando el cursor pasa de una a otra sin interrumpir la corriente (es decir, manteniendo alimentada la carga) equivale a cortocircuitar una fuente de

$$6.10 \frac{V}{\text{espira}} \times 328 \text{ espiras} = 2000 \text{ V}$$

Por eso hay que emplear un complejo dispositivo como el de la Fig. 88, que efectúa la secuencia que se indica a continuación:

Secuencia de maniobras para la conmutación en carga

- 1) Cambiador en toma 1, interruptor puente cerrado, selector en A+B
- 2) Selector solo en A
- 3) Abre el interruptor puente
- 4) Cambiador en toma 1 y 2
- 5) Cierra el interruptor puente
- 6) Selector solo en B
- 7) Abre el interruptor puente
- 8) Cambiador en toma 2
- 9) Cierra el interruptor puente
- 10) Selector en A+B



Fig. 88 Cambiador de tomas en carga (OLTC). [GED]

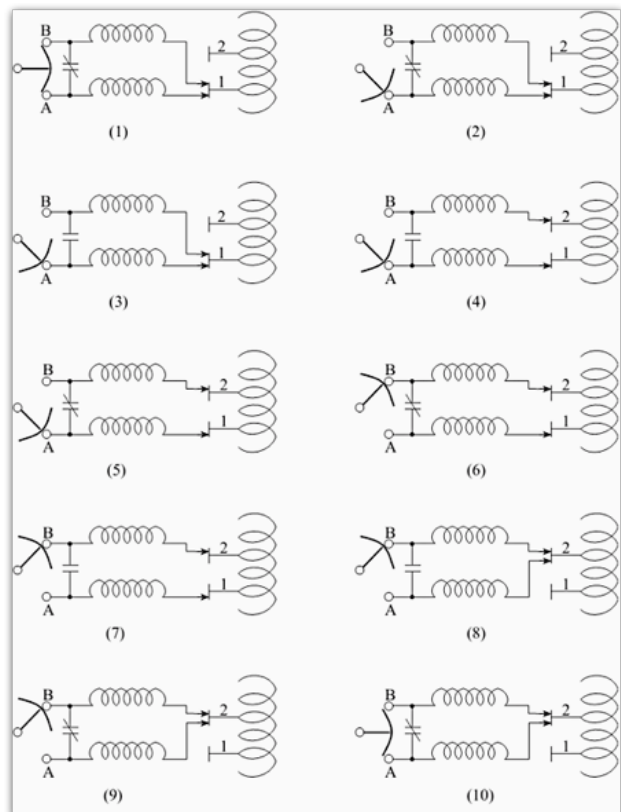


Fig. 89 Secuencia de un cambio de tomas en carga. [https://electrical-engineering-portal.com]

El cambiador de tomas en carga es, como puede suponerse, un mecanismo de relojería complejo y caro, que puede suponer 1/3 del precio total de la máquina. Sólo se instalan en entornos industriales donde resulte crítico mantener la tensión estable entre márgenes muy pequeños, y en subestaciones de la red pública de distribución de energía eléctrica.



Fig. 90 Pequeña subestación eléctrica en una mina al aire libre.  
El armario grande del transformador controla localmente el cambiador de tomas en carga.

## 2.7 Pérdidas

### PÉRDIDAS EN VACÍO

Las pérdidas en vacío se deben al calentamiento del núcleo a causa de las pérdidas por histéresis magnética y por circulación de corrientes parásitas o de Foucault.

El calentamiento de los conductores del devanado primario con la intensidad de vacío es despreciable, puesto que esta intensidad es apenas del 0.3% de la intensidad nominal o de plena carga del primario.

Las pérdidas por calentamiento del núcleo dependen del material empleado, de la inducción máxima que se le aplique y del tamaño de este:

En cuanto al material, se tratará de chapa magnética de grano orientado en láminas finísimas, cuyas características de eficiencia energética se proporcionan habitualmente en forma de gráfica como la de la Fig. 91, que relaciona los vatios por kilogramo de chapa para cada nivel de inducción  $B_m$  (T) aplicado.

Aunque leer los datos de la gráfica es muy rápido, para automatizar el diseño es conveniente sustituirla por una ecuación que proporcione los mismos valores o los más similares posible. Es lo que se ha hecho en la Fig. 92: en la tabla que la acompaña figuran los puntos discretos obtenidos de la gráfica para determinados valores de  $B_m$ . Mediante técnicas de regresión sencillas (método de los mínimos cuadrados por ejemplo) se puede obtener la ecuación de una curva muy parecida a la de la gráfica, que se utilizará para obtener cualesquiera valores durante el cálculo.

En este caso se ha obtenido gracias a la opción ofrecida por *Excel™* de MICROSOFT. El ajuste logrado es tanto mejor cuanto más se acerque  $R$  a uno.

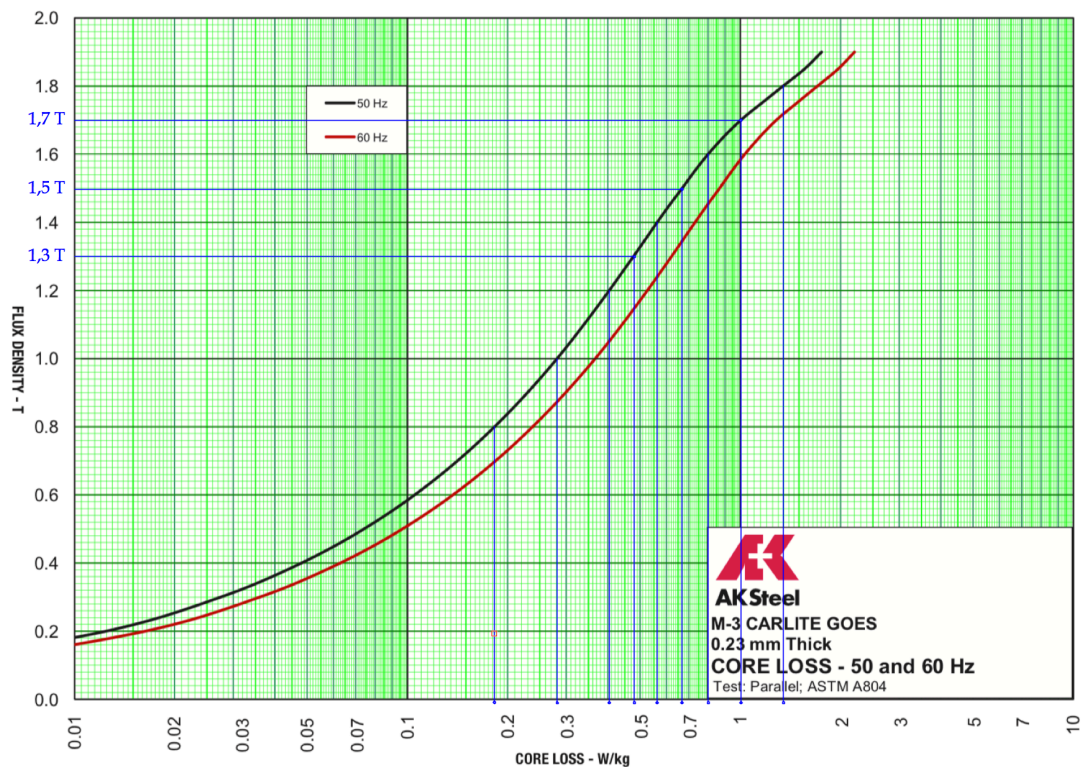


Fig. 91 Relación entre pérdidas de energía por calentamiento y densidad de flujo  $B_m$  para la chapa Carlite M-3

$B_m$ (T)	$P_0$ (W/kg)
0.2	0.015
0.4	0.048
0.6	0.110
0.8	0.185
1.0	0.280
1.2	0.405
1.3	0.480
1.4	0.560
1.45	0.615
1.5	0.670
1.6	0.800
1.7	1.000
1.8	1.350

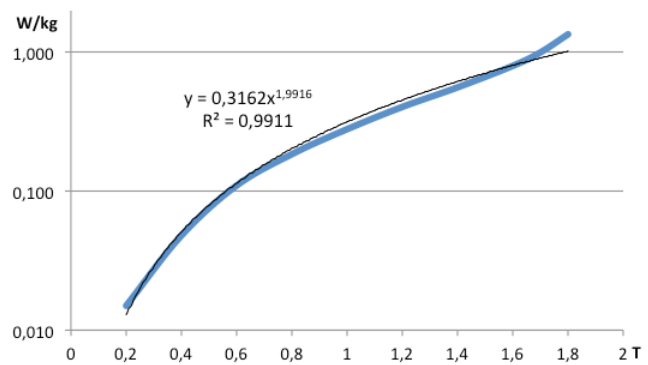


Fig. 92 La tabla está extraída de la Fig. 91.  
 La curva de regresión puede usarse en su lugar, con las debidas precauciones.

### EJEMPLO 8

Seguimos con el desarrollo del mismo transformador de distribución de los ejemplos anteriores, recordando que en el Ejemplo 6 se calcularon las dimensiones del núcleo:

Datos:

Volumen neto núcleo $V_{Fe}$ (dm <sup>3</sup> )	75.15
Chapa ferromagnética	Carlite
Espesor chapa ferromagnética (mm)	0.23
Coefficiente de apilamiento $k_0$	1.05
Densidad chapa ferromagnética (kg/m <sup>3</sup> )	7650
Inducción magnética $B_m$ (T)	1.45



Cálculos:

Masa neta núcleo (kg)	574.9
Pérdidas (W/kg)	0.615
Pérdidas en vacío $P_0$	
Máximo garantizado $P_{0max}$ (W)	387
Pérdidas calculadas $P_0$ (W)	354
Relación $P_0/P_{0max}$ (%)	91.4% CUMPLE

PÉRDIDAS DEBIDAS A LA CARGA

Estas pérdidas se generan por calentamiento de los conductores del primario y del secundario. Hay que calcularlas para la intensidad nominal o de plena carga de la máquina y a la temperatura de máximo calentamiento de los devanados admisible.

En la sección 1.2 Pérdidas de los transformadores, p. 62, vimos que la resistencia se calculaba a partir de la resistividad del conductor corregida en función de la temperatura según UNE 21096 para el aluminio y UNE 20003 para el cobre.

La temperatura máxima de los devanados puede ser un requisito del cliente o se puede considerar limitada por la norma de fabricación aplicable.

EJEMPLO 9

Transformador de distribución de los ejemplos anteriores. Devanados de aluminio. Temperatura máxima de los devanados 75°C.

	AT	BT
Datos:		
Longitud N espiras (m)	3366.46	24.08
Cálculos:		
Temperatura conductores (°C)	75	75
Resistencia conductor ( $\Omega/m$ )	0.0045	0.000052
Resistencia bobina ( $\Omega$ )	15.2843	0.001250
Pérdidas debidas a la carga $P_k$		
Máximo garantizado $P_{kmax}$ (W)	3250	
Devanado primario (W)	2038	
Devanado secundario (W)	1134	
Pérdidas calculadas $P_k$ (W)	3172	CUMPLE
Relación $P_k/P_{kmax}$ (%)	97.60%	

Se ha tenido en cuenta que  $R = \rho \frac{L}{S}$  con  $\rho_{Al} \left( \frac{\Omega \text{ mm}^2}{\text{m}} \right) = 0.028 [1 + 0.00407(\theta_c - 20)]$

RENDIMIENTO NOMINAL

El rendimiento nominal de la máquina se obtiene a partir de la potencia que puede perder cuando está trabajando en condiciones nominales o de plena carga, y su potencia nominal. Por las características del transformador no será su rendimiento máximo, que se obtiene a cargas ligeramente menores, pero estará próximo a él.

$$\eta_N(\%) = \left( 1 - \frac{P_P}{P_N} \right) \times 100$$

En fase de cálculo la potencia perdida  $P_P$  (W) es la suma de las pérdidas en vacío  $P_0$  y las debidas a la carga  $P_k$ , pero las pérdidas medidas en laboratorio sobre el

transformador terminado suelen ser ligeramente superiores porque aparecerán las *pérdidas adicionales*, generalmente debidas al calentamiento causado por el flujo de dispersión. Esto hay que tenerlo en cuenta para no diseñar al límite de los valores admisibles, sino que hay que dejar un margen prudente para que las pérdidas adicionales no eleven la suma total por encima de los valores totales admisibles.

La potencia nominal  $P_N$  (W) es la potencia aparente nominal  $S_N$  en vatios, pues si la carga alimentada desde el transformador fuera puramente resistiva, podría llegarle a suministrar hasta ese valor de potencia en vatios.

#### EJEMPLO 10

Transformador de los ejemplos anteriores. El cálculo teórico de pérdidas y rendimiento es el siguiente

$$S_N = 400 \text{ kVA} \quad P_p = P_0 + P_k = 354 + 3172 = 3526 \text{ W}$$

$$\eta_N(\%) = \left(1 - \frac{P_p}{P_N}\right) \times 100 = \left(1 - \frac{P_0 + P_k}{P_N}\right) \times 100 = \left(1 - \frac{354 + 3172}{400\,000}\right) \times 100 = 99.12\%$$

Por lo dicho más arriba, las pérdidas totales serán ligeramente superiores al valor teórico calculado pues habrá pérdidas adicionales. Luego el rendimiento nominal será ligeramente inferior.

## 2.8 Diseño de la cuba

Hay muchos tipos de cubas pero en lo esencial, todas ellas deben contener el aceite refrigerante y dar solidez al conjunto del transformador. En algunas ocasiones, además, deben resistir la presión atmosférica absoluta, pues en los transformadores medianos y grandes se les hace el vacío completo durante la fase de secado final de las bobinas.

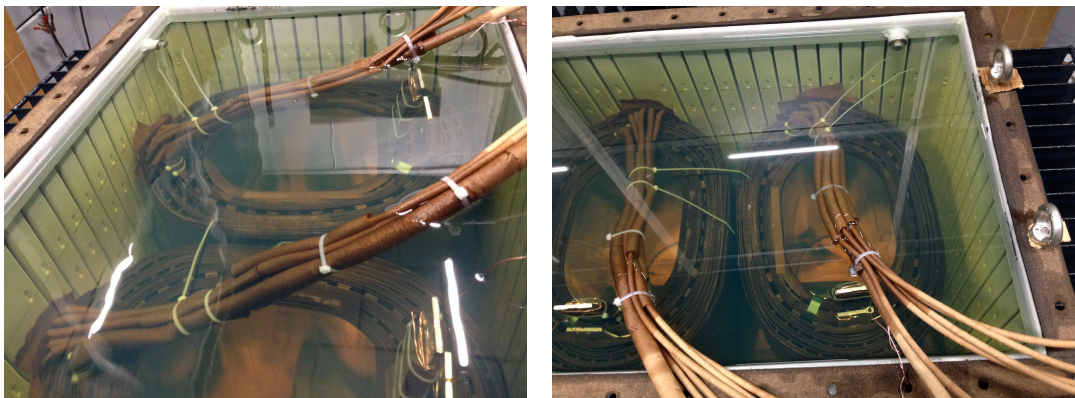


Fig. 93 Bobinas sin núcleo sumergidas en aceite dentro de su cuba de aletas elásticas durante una prueba de calentamiento. [GED]

Los transformadores de distribución generalmente llevan cubas de aletas elásticas para llenado integral de aceite (Fig. 93). Esto quiere decir que cuando el aceite se dilata o contrae por efecto de la temperatura son las aletas las que se hinchan y deshinchon proporcionalmente para absorber esos cambios de volumen, ya que dentro de la cuba no puede quedar gas alguno (ni aire ni humedad-vapor de agua).

Evidentemente la cuba debe poder alojar toda la parte activa con la holgura suficiente para permitir que el aceite circule por convección entre los bobinados y las aletas

refrigeradoras, y para garantizar el nivel de aislamiento de diseño requerido (que es el impuesto por las sobretensiones atmosféricas según el Reglamento de alta tensión).

Al fondo de la cuba se le sueldan las vigas soporte de las ruedas, y sobre ese fondo se sueldan también las paredes de aletas ya plegadas. Por último se suelda el marco de la tapa y se comprueba que el conjunto ha quedado suficientemente estanco y sin poros.

## 2.9 Diseño de la refrigeración

La refrigeración del transformador evacúa el calor generado en el núcleo y en los devanados para limitar el calentamiento de la máquina a un valor máximo garantizado por encima de la temperatura ambiente.

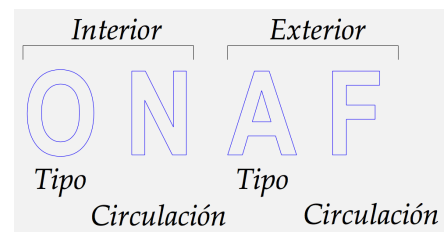
Designación normalizada de los sistemas de refrigeración de un transformador UNE-EN 60076-2

Tipo de fluido aislante caloportador:

<i>O</i>	aceite mineral o sintética inflamable a $\leq 300^{\circ}\text{C}$
<i>K</i>	líquido (aceite vegetal) inflamable a $> 300^{\circ}\text{C}$
<i>A</i>	aire
<i>W</i>	agua

Circulación del fluido:

<i>N</i>	convección natural (termosifón)
<i>F</i>	forzada exterior (motores) / natural interior
<i>D</i>	forzada exterior e interior



Dado que la parte activa está inmersa en aceite, es este fluido el que lleva el calor desde el núcleo y los devanados hasta las paredes de la cuba, donde se produce el intercambio con el aire que circunda el transformador, aunque hay algunos diseños de transformadores grandes donde el papel del aire lo juega un circuito refrigerante de agua.

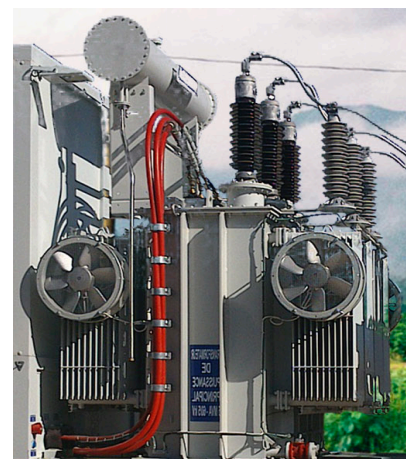
Los flujos de aceite y de aire (y de agua) pueden ser por convección natural, o tratarse de flujos forzados mediante electrobombas o ventiladores, y hay una designación normalizada para las distintas combinaciones:

Es normal que un mismo transformador pueda tener una potencia nominal distinta según el sistema de refrigeración adoptado.

### EJEMPLO

Un transformador 6.5 MVA ONAF - 5.5 MVA ONAN es capaz de proporcionar 1 MVA más de potencia aparente cuando se activan los ventiladores que refrigeran por fuera su cuba (normalmente estará dotada de radiadores), que cuando estos permanecen apagados.

Fig. 94 Transformador del ejemplo: 6.5 MVA ONAF - 5.5 MVA ONAN. [GED]



Las aletas de las cubas elásticas para llenado integral aumentan la superficie de intercambio de calor con el aire que circunda el transformador. Normalmente solo se emplean en refrigeraciones tipo ONAN (el aceite y el aire circularán por convección natural, no forzada), que son las habituales en transformadores de distribución de energía eléctrica.

El fabricante aprovechará de una a cuatro caras de la cuba del transformador para instalar en ella aletas refrigerantes, que al llenarse de aceite incrementarán muchísimo la superficie de intercambio de calor con el aire exterior (Fig. 95).

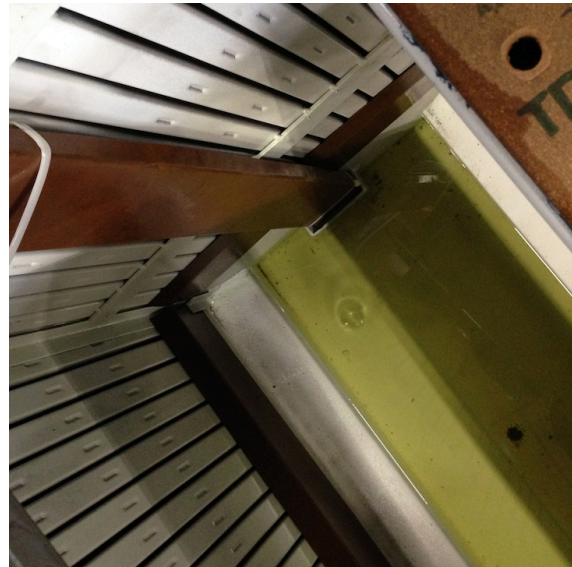


Fig. 95 Detalle del interior de una cuba de llenado integral con algo de aceite dieléctrico en su fondo. [GED]

Para calentamientos por encima de la temperatura ambiente de unos 60°C las aletas refrigeradoras pueden llegar a disipar de 6 a 8 W/(m<sup>2</sup> °C). Calcular cuántas aletas y de qué tamaño es necesario instalar resulta sencillo. Tan solo hay que conseguir que la potencia disipable sea superior a las pérdidas totales de la máquina a plena carga.

#### EJEMPLO 11

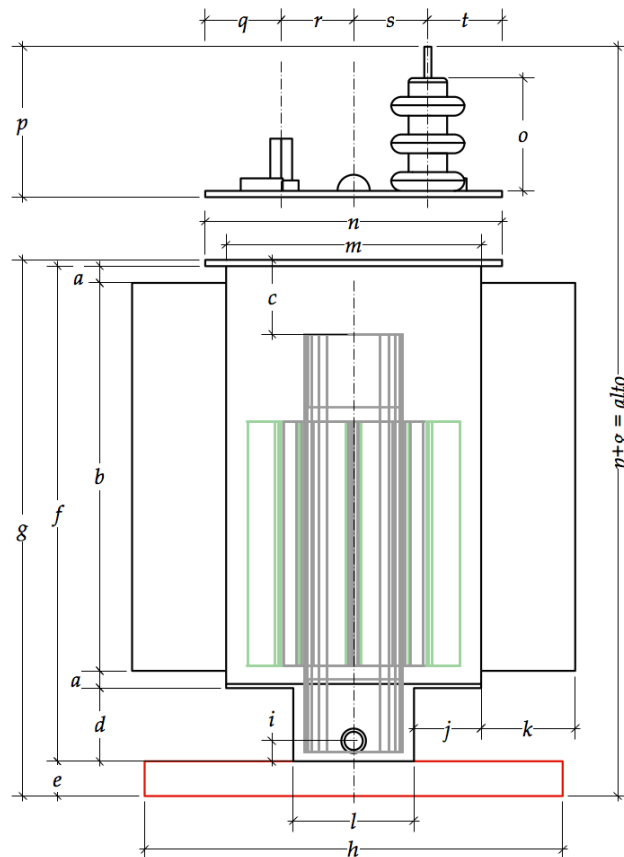
CUBA ELÁSTICA LLENADO INTEGRAL		Notas:
Holgura entre bobinas adyacentes (mm)	10	
Largo mínimo cuba interior (mm)	1370	3 Øext. de bobinas + 4 holguras entre bobinas, redondeado por exceso a múltiplos de 10 mm
Ancho mínimo cuba interior (mm)	470	Øext. de bobinas + 2 holguras entre bobinas, redondeado por exceso a múltiplos de 10
Altura total núcleo (mm)	970	Ver Ejemplo 6
Distancia yugo superior- tapa (mm)	180	Nunca menos de 180 mm
Altura mínima cuba interior (mm)	1150	Altura de núcleo + distancia yugo-tapa
Longitud aletas refrigeradoras (mm)	900	Altura interior cuba - Ø núcleo, redondeado por defecto a múltiplos de 50, menos 50 mm
Equidistancia aletas aprox. (mm)	60	40 - 50 - 60 - 70 mm
Número aletas lado largo	21	Largo cuba / equidistancia aletas, redondeado por defecto, menos una
Número aletas lado corto	6	Ancho cuba / equidistancia aletas, redondeado por defecto, menos una
Anchura de las aletas (mm)	180 (1)	80 - 100 - 120 - 140 - 160 - 180 - 200 - 220 mm
Núm. lados largos con aletas	2	
Núm. lados cortos con aletas	0	
Núm. total aletas	42	
Superficie radiante aletas S (m <sup>2</sup> )	13.61	Irradian por ambas caras

CUBA ELÁSTICA LLENADO INTEGRAL

		Notas:
Potencia disipante máxima $h$ (W/(m <sup>2</sup> °C))	6.00	Entre 6.00 y 8.00 W/(m <sup>2</sup> °C)
Calentamiento s/ ambiente $\Delta T$ (°C)	50	Habitualmente entre 50 y 65°C, a petición del comprador
Potencia disipable (W/m <sup>2</sup> )	300	$h \Delta T$
Potencia disipable total (W)	<b>4082</b>	$h \Delta T S$ No se considera el efecto refrigerante de la tapa y del resto de la cuba
Pérdidas totales (W)	3525	Ver Ejemplo 10
Canto (altura) vigas soporte (mm)	80	UPN 80 es usual
Largo cuba (mm)	1400	102% del largo interior + aletas (si procede), redondeado a múltiplos de 25
Ancho cuba (mm)	875	105% del ancho interior + aletas (si procede), redondeado por exceso a múltiplos de 25
Alto cuba (mm)	1290	105% del alto interior + canto vigas soporte, redondeado a múltiplos de 5
Masa aproximada cuba (kg)	240	El 2% aproximadamente del volumen en m <sup>3</sup> , redondeado a múltiplos de 5 kg

- (1) Las aletas estrechas son muy poco elásticas y la mayor rigidez de la cuba limitará los años de duración de la máquina. Siempre tiene que haber aletas de al menos 140 mm.

Se comprueba que esta refrigeración es ampliamente suficiente pues la potencia disipable supera con creces las pérdidas calculadas (lo que deja un amplio margen también para compensar las pérdidas adicionales).



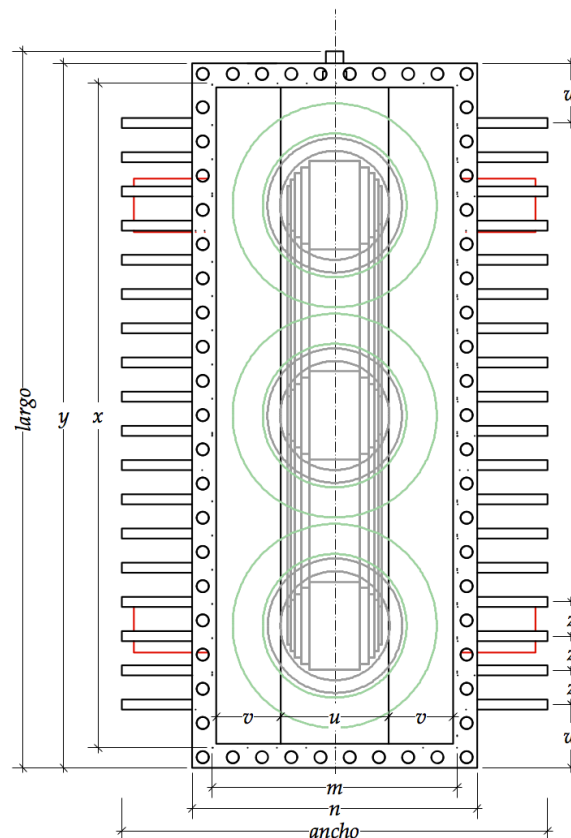


Fig. 96 Algunas medidas esenciales para definir la envolvente y la refrigeración del transformador.

### EJEMPLO 12

La cantidad de aceite necesaria se estima deduciendo del volumen interior de cuba y aletas los volúmenes que ocupan el núcleo y las bobinas, con algunas simplificaciones, pues este cálculo no es crítico y tan solo servirá para orientar acerca de las necesidades de fabricación:

#### VOLUMEN DE ACEITE

Densidad aceite a 25°C (kg/dm <sup>3</sup> )	0.91	Notas:
Anchura canal interior aleta (mm)	5.00	Normalmente 5.00 mm
Volumen aceite por aleta (dm <sup>3</sup> )	0.81	Longitud · anchura de las aletas, ignorando el espesor de su chapa
Volumen aceite en aletas (dm <sup>3</sup> )	34	Según el número total de aletas
Volumen interior cuba (dm <sup>3</sup> )	740	Considerando las medidas interiores, sin redondear
Volumen núcleo $V_{Fe}$ (dm <sup>3</sup> )	75.15	Ver Ejemplo 3
Volumen aprox. bobinas (dm <sup>3</sup> )	245.9	3 cilindros huecos de base $\varnothing_{ext}$ descontando $\varnothing_{int}$ , y de altura $l_a$ de las bobinas con sus cintas de protección arriba y abajo
Vol. aprox. accesorios y otros (dm <sup>3</sup> ) (*)	74.0	Se estima como el 10% del volumen interior de la cuba
Volumen aproximado aceite (dm <sup>3</sup> )	379.5	Volúmenes de aletas + cuba - núcleo - bobinas - accesorios
Peso aproximado aceite (kg)	345	Según la densidad

(\*) Se debe tener en cuenta que aparte del núcleo y las bobinas hay cambiador de tomas y un elevado número de cables que conectan con él, además de las conexiones a las bornas



pasatapas. Y que todos los cables y pletinas están forrados de papel y cartón, aparte de otras protecciones de ese material en otros elementos. Y que en el interior también están las vigas metálicas y los pasadores de refuerzo del núcleo, y los calzos de nylon que sujetan las bobinas.

## 2.10 Diseño de la tapa

La tapa va solidaria con la parte activa y de sus cáncamos de elevación es de donde se suspende el conjunto para encubar y desencubar, por lo que tendrá una rigidez mecánica elevada (ver Fig. 50 Parte activa con tapa, lista para encubar, pág. 78).

Resulta esencial mantener las distancias requeridas por la instrucción técnica 12 del Reglamento de Alta Tensión (tabla 1 ITC-RAT 12) según el nivel de aislamiento solicitado por el cliente. Para transformadores de distribución donde la tensión nominal primaria no suele superar los 20 kV, las distancias a mantener entre las bornas y la tapa (medida "o" Fig. 96), y entre borna y borna, es de 220 ó 270 mm, según el nivel de aislamiento asignado.

### EJEMPLO 13

Valores usuales para transformadores de 20 kV en España:

DISEÑO DE LA TAPA	
Tabla 1	ITC-RAT 12
Tensión nominal más elevada $U_N$ (kV)	20
Tensión más elevada para el material $U_m$ (kV)	24
Tensión de cresta impulsos tipo rayo (kV)	125 ó 145
Separación fase-fase / fase-tierra (mm)	220 ó 270

## 2.11 Características finales aproximadas

Las indicaciones dadas en las secciones precedentes conducen a predimensionar aproximadamente un transformador, y los resultados obtenidos suelen ser válidos para que los departamentos de ofertas estimen rápidamente el coste y los parámetros fundamentales de cada máquina que se solicite al fabricante.

### EJEMPLO 14

DIMENSIONES RESULTANTES		
		Notas:
Largo transformador (mm)	1400	Ver Ejemplo 10
Ancho transformador (mm)	875	Ver Ejemplo 10
Alto transformador (mm)	1560	Tomando 270 mm de separación fase-tierra
Masa aproximada aceite (kg)	345	Ver Ejemplo 12
Masa aproximada a desencubar (kg)	1010	Peso del núcleo y los bobinados, incrementado un 10% para considerar la tapa y los accesorios, redondeado a múltiplos de 5
Masa aproximada cuba (kg)	240	Ver Ejemplo 11
Masa total en servicio (kg)	1595	Suma de las tres cantidades anteriores

Los departamentos de diseño mecánico y eléctrico afinarán los cálculos muchísimo más, pues hay aún multitud de detalles que precisar hasta conseguir un diseño auténticamente viable. Pero el precálculo mostrado hasta aquí es valioso por cuanto

proporciona una indicación ya muy acertada de las características finales del transformador.

## 2.12 Accesorios

Además de las bornas en la tapa, los transformadores de distribución tienen otros accesorios como el que se muestra en la Fig. de la derecha. Se trata de un dispositivo que combina, en un solo aparato:

- Un *termómetro* (aguja negra) con indicador (aguja roja) de la máxima temperatura alcanzada desde el último reinicio.
- Dos *interruptores termostáticos* ajustables, para activación de alarma (umbral inferior) y disparo de la protección del transformador (umbral superior).
- *Presostato* ajustable para disparar la protección en caso de sobrepresión interna (rango 0.1 - 0.5 bares).
- *Nivel de aceite* con contacto de alarma activo cuando cae por debajo de un umbral prefijado.
- Doble flotador para detección de gases (*relé Buchholz*) con contacto de alarma (primeras burbujas) y contacto de disparo de protecciones (exceso de gas acumulado en la parte superior).

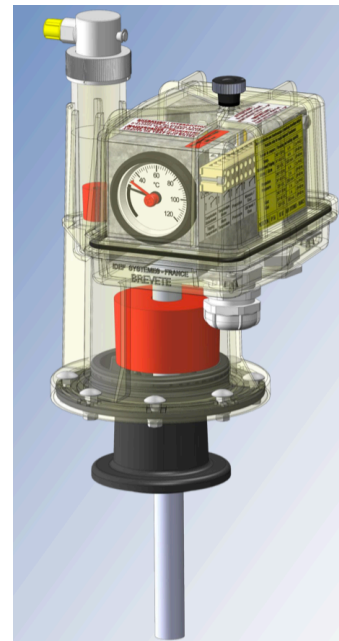


Fig. 97 Relé de Detección, Medición y Control (DMCR 3.0). [IDEF Systèmes]

## 3 LABORATORIO Y ENSAYOS

Las normas de fabricación de los transformadores obligan al fabricante a probar las máquinas y a certificar los resultados de los ensayos por escrito en un documento normalmente conocido como protocolo de pruebas del transformador.

Según la UNE-EN 60076-1 *Transformadores de potencia*, hay tres tipos de pruebas:

- a) Las que se le hacen individualmente a todos y cada uno de los transformadores fabricados.
- b) Las que se hacen solo a un transformador cualquiera, representativo de un tipo de transformadores (para no repetir las a todos los de ese tipo).
- c) Las pruebas especiales, que pueden estar en la norma o pueden ser cualesquiera acordadas entre fabricante y comprador.

### ENSAYOS INDIVIDUALES

- a) Medición de la resistencia de los arrollamientos con corriente continua, registrando entre qué bornes se mide y a qué temperatura se hace (ver apartado 3.1 más adelante).

- b) Medición de la relación de transformación y verificación de la polaridad de las bobinas (terminales correspondientes) y del desfase entre tensiones de bornes homólogos.
- c) Medición de la impedancia de cortocircuito y de las pérdidas debidas a la carga (ver apartado 3.3).
- d) Medición de las pérdidas y de la corriente en vacío (ver apartado 3.2).
- e) Ensayos dieléctricos individuales (de tensión aplicada y de tensión inducida, según norma IEC 60076-3).
- f) Ensayos en los cambiadores de tomas en carga, si son necesarios.
- g) Ensayos de fugas con presión para los transformadores sumergidos en líquido (ensayo de estanquidad).
- h) Ensayos de estanquidad y de presión para cubas de transformadores llenos de gas (norma IEC 60076-15).
- i) Verificación de la relación de transformación y de la polaridad de los transformadores de intensidad instalados.
- j) Verificación del aislamiento del núcleo magnético y de la estructura en transformadores sumergidos en líquido con aislamiento de núcleo o de estructura.

#### ENSAYOS DE TIPO

- a) Ensayos de calentamiento (norma IEC 60076-2).
- b) Ensayos dieléctricos (frente a impulsos tipo rayo, norma IEC 60076-3).
- c) Determinación del nivel de ruido (norma IEC 60076-10) para cada método de refrigeración para el que se especifica un nivel de ruido garantizado.
- d) Medición de la potencia absorbida por los motores de los ventiladores y de las bombas de líquido.
- e) Medición de las pérdidas y de la corriente en vacío al 90% y al 110% de la tensión nominal.

### 3.1 Resistencia de los devanados

Una vez fabricado el transformador las medidas de resistencia que pueden hacerse son las marcadas como  $m_1$ ,  $m_2$  y  $m_3$  y  $n_1$ ,  $n_2$  y  $n_3$  en la Fig. 98 sobre los bornes exteriores de las bobinas. Para deducir el valor de las resistencias  $R_a$ ,  $R_b$  y  $R_c$  de cada arrollamiento es preciso considerar cómo están conectadas entre sí:

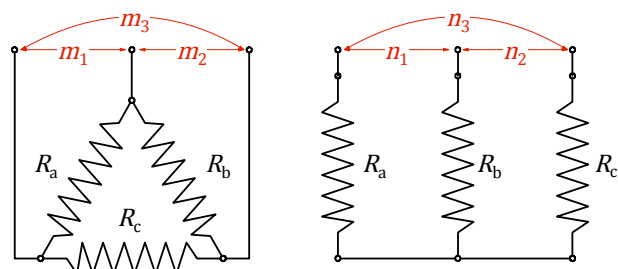


Fig. 98 Resistencia de devanados en triángulo y en estrella sin neutro accesible.

$$\text{Devanados en triángulo} \begin{cases} \frac{1}{m_1} = \frac{1}{R_a} + \frac{1}{R_b + R_c} \\ \frac{1}{m_2} = \frac{1}{R_b} + \frac{1}{R_a + R_c} \\ \frac{1}{m_3} = \frac{1}{R_c} + \frac{1}{R_b + R_a} \end{cases} \quad \text{Devanados en estrella} \begin{cases} n_1 = R_a + R_b \\ n_2 = R_b + R_c \\ n_3 = R_a + R_c \end{cases}$$

Resolviendo ambos sistemas se obtienen enseguida los valores buscados de  $R_a$ ,  $R_b$  y  $R_c$  en función de las correspondientes medidas para cada tipo de conexión:

#### RESISTENCIA TRES DEVANADOS EN TRIÁNGULO

$$\text{Simplify} \left[ \text{Solve} \left[ \left\{ \frac{1}{m_1} = \frac{1}{R_a} + \frac{1}{R_b + R_c}, \frac{1}{m_2} = \frac{1}{R_b} + \frac{1}{R_a + R_c}, \frac{1}{m_3} = \frac{1}{R_c} + \frac{1}{R_b + R_a} \right\}, \{R_a, R_b, R_c\} \right] \right]$$

$$\left\{ \left\{ R_a \rightarrow \frac{m_1^2 + (m_2 - m_3)^2 - 2 m_1 (m_2 + m_3)}{2 (m_1 - m_2 - m_3)}, \right. \right. \\ \left. \left. R_b \rightarrow -\frac{m_1^2 + (m_2 - m_3)^2 - 2 m_1 (m_2 + m_3)}{2 (m_1 - m_2 + m_3)}, R_c \rightarrow -\frac{m_1^2 + (m_2 - m_3)^2 - 2 m_1 (m_2 + m_3)}{2 (m_1 + m_2 - m_3)} \right\} \right\}$$

#### RESISTENCIA TRES DEVANADOS EN ESTRELLA SIN NEUTRO

$$\text{Solve} \left[ \{n_1 = R_a + R_b, n_2 = R_b + R_c, n_3 = R_a + R_c\}, \{R_a, R_b, R_c\} \right]$$

$$\left\{ \left\{ R_a \rightarrow \frac{1}{2} (n_1 - n_2 + n_3), R_b \rightarrow \frac{1}{2} (n_1 + n_2 - n_3), R_c \rightarrow \frac{1}{2} (-n_1 + n_2 + n_3) \right\} \right\}$$

Solución a los sistemas para el valor de las resistencias obtenida con Mathematica™

Habitualmente las medidas de la resistencias  $m_i$  y  $n_i$  entre pares de bornas se hacen utilizando una batería de 12 ó 24 V, una resistencia ultra baja finísimamente calibrada, llamada frecuentemente *shunt*, y dos voltímetros de buena precisión, como muestra la Fig. 99.

La resistencia *shunt* se emplea para conocer la intensidad  $I$ . Su calibre viene marcado en mV/A, y así:

$$I(\text{A}) = \frac{V_2(\text{mV})}{\text{calibre}_{shunt}(\text{mV/A})}; \quad R_a(\Omega) = \frac{V_1(\text{V})}{I(\text{A})}$$

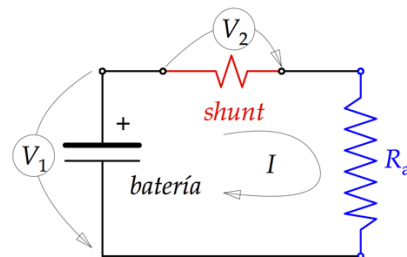


Fig. 99 Procedimiento para medir la resistencia  $R_a$ .

#### EJEMPLO 14

Calcular las resistencias de los devanados de un transformador en el que se han medido los valores de la derecha usando un *shunt* de 5 A/mV.

	V1 (V)	V2 (mV)
U - V ( $m_1$ )	21.718	8.083
V - W ( $m_2$ )	21.551	7.985
W - U ( $m_3$ )	21.726	8.053

Solución:

		Triángulo	Estrella
$m_1 =$	13.434 $\Omega$	$R_a =$ 20.094 $\Omega$	$R_a =$ 6.715 $\Omega$
$m_2 =$	13.495 $\Omega$	$R_b =$ 20.275 $\Omega$	$R_b =$ 6.720 $\Omega$
$m_3 =$	13.489 $\Omega$	$R_c =$ 20.259 $\Omega$	$R_c =$ 6.775 $\Omega$

### 3.2 Ensayo en vacío

El ensayo de vacío pretende conocer los parámetros de la rama paralelo del modelo eléctrico de transformador referido al primario ya visto en el apartado 1.3, p. 65.

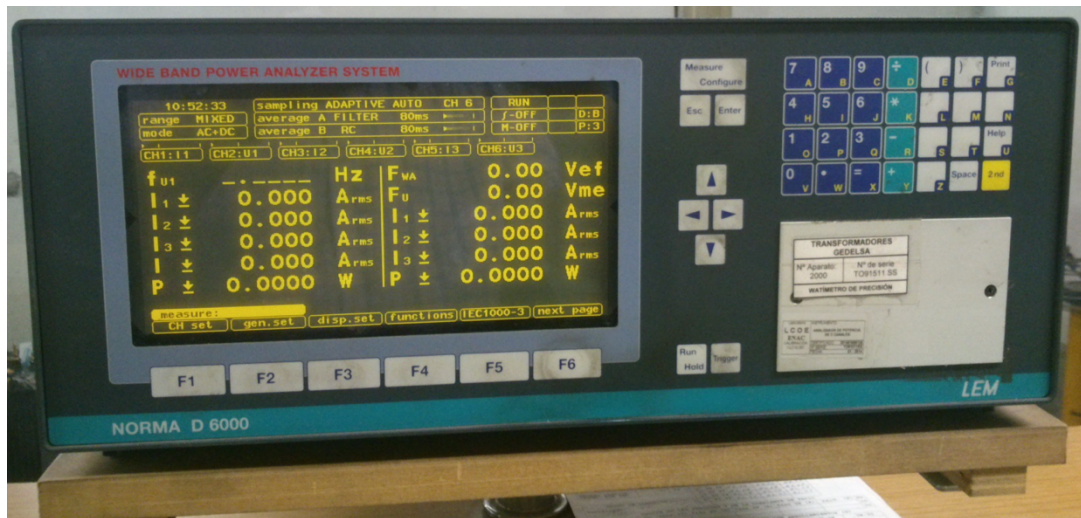


Fig. 100 Vatímetro de precisión calibrado, usado en el laboratorio de pruebas del fabricante. [GED]

Este ensayo suele hacerse alimentando el transformador por el devanado BT dejando al aire el lado AT (Fig. 101), pero los resultados han de corresponder al modelo eléctrico del transformador cuyos parámetros están referidos al primario, por lo que hay que ajustar primero los resultados de la medida para obtener los valores que se habrían conseguido de hacer el ensayo por ese primario (lado AT).

#### EJEMPLO 15

Los datos de la tabla son las medidas obtenidas en el ensayo de vacío sobre un transformador de 400 kVA, 20/0.42 kV que se muestran en la Fig. 102:

$S_n$ (kVA)	400		
$U_1$ (V)	20000		
$U_2$ (V)	420		
$m$	47.62		
$I_1$ (A)	11.55		
$I_2$ (A)	550		
$f$ (Hz)	50.000	$U$ (V)	419.87
$P_1$ (kW)	0.18098	$I_1$ (A)	1.321
$P_2$ (kW)	0.08050	$I_2$ (A)	1.222
$P_3$ (kW)	0.12498	$I_3$ (A)	0.931
$P$ (W)	384.30	$I$ (A)	1.158

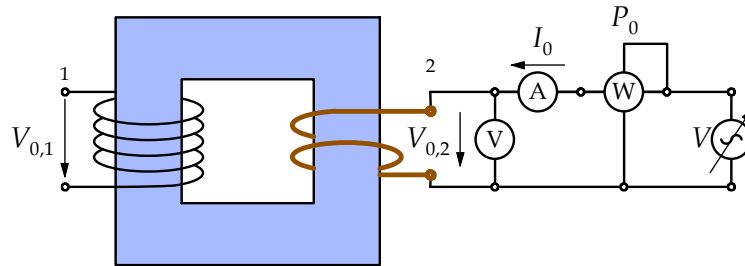


Fig. 101 Ensayo de vacío hecho por el lado del secundario para no tener que trabajar con tensiones elevadas.



Fig. 102 Transformador 400 kVA durante un ensayo de vacío (hecho por el secundario) y medidas del vatímetro. [GED]

La tensión a la que se hace el ensayo es  $V_{0,2} = 419.87$  V, muy bien hecho porque prácticamente es la tensión nominal de la máquina por ese lado (420 V). Corresponde a una tensión de ensayo en el primario, aplicando la relación de transformación  $m$ , de

$$V_{0,1} = V_{0,2} m = \frac{U_{0,2}}{\sqrt{3}} m = \frac{419.87}{\sqrt{3}} \frac{20}{0.42} = 11543.4 \text{ V}$$

La potencia absorbida por el transformador en esas condiciones  $P_0$  es la suma de las tres medidas por el vatímetro en cada fase  $P_0 = P_1 + P_2 + P_3 = 386.46$  W. Se comprueba que respeta las pérdidas máximas reglamentarias (387 W).

Para la intensidad absorbida en vacío se toma la media de las tres intensidades de fase y se convierte a intensidad de primario también mediante la relación de transformación:

$$I_{0,1} = \frac{I_{0,2}}{m} = \frac{I_1 + I_2 + I_3}{3m} = \frac{1.321 + 1.222 + 0.931}{3 \times \frac{20}{0.42}} = 0.027741 \text{ A}$$

A continuación se obtiene el factor de potencia del transformador considerado como una carga trifásica equilibrada. La potencia absorbida total en vacío es la suma de la que absorbe por cada una de sus fases

$$P_0 = 3(V_{0,1} I_{0,1} \cos \varphi_0),$$

de donde

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{3 V_{0,1} I_{0,1}} = \frac{386.46}{3 \times 11543.4 \times 0.027741} = 0.459 \text{ inductivo}$$

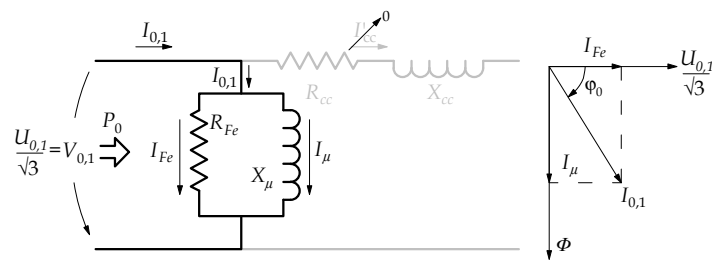


Fig. 103 Intensidades absorbidas durante el ensayo de vacío.

Resolviendo el diagrama fasorial de la Fig. 103 se obtienen ya los parámetros  $R_{Fe}$  y  $X_{\mu}$  e incluso la impedancia total  $Z_{0,1}$  del modelo del transformador:

$$\left. \begin{aligned} I_{Fe} &= I_{0,1} \cos\varphi_0 = 11.160 \text{ mA}; & R_{Fe} &= \frac{V_{0,1}}{I_{Fe}} = 1034 \text{ k}\Omega \\ I_{\mu} &= I_{0,1} \sin\varphi_0 = 21.606 \text{ mA}; & X_{\mu} &= \frac{V_{0,1}}{I_{\mu}} = 534 \text{ k}\Omega \end{aligned} \right\} Z_{0,1} = \frac{V_{0,1}}{I_{0,1}} = \frac{11543.4}{0.027741} = 475 \text{ k}\Omega$$

### 3.3 Ensayo en cortocircuito

El ensayo de cortocircuito pretende conocer los parámetros de la rama serie del modelo eléctrico de transformador referido al primario estudiado en el apartado 1.3, p. 65.

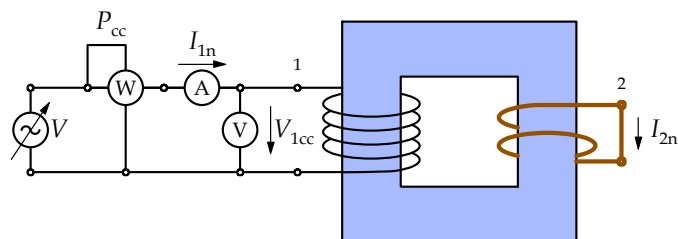


Fig. 104 Ensayo de cortocircuito hecho por el primario para no tener que trabajar con intensidades elevadas.

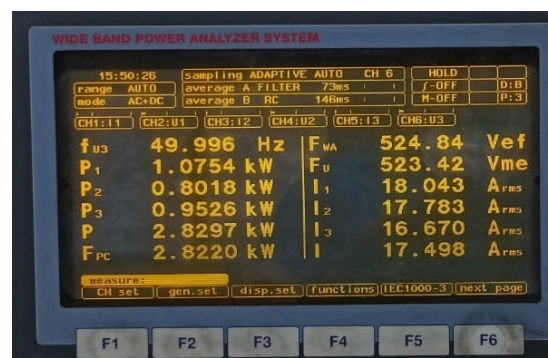


Fig. 105 Transformador 400 kVA durante un ensayo de cortocircuito y medidas del vatímetro. [GED]

#### EJEMPLO 16

Los datos de la tabla son las medidas obtenidas en el ensayo de cortocircuito sobre un transformador de 400 kVA, 13.2/0.4 kV que se muestran en la Fig. 105:



Sn (kVA)	400		
U1 (V)	13200		
U2 (V)	400		
m	33.00		
I1 (A)	17.50		
I2 (A)	577		
f (Hz)	49.996	U (V)	523.42
P1 (kW)	1.07540	I1 (A)	18.043
P2 (kW)	0.80180	I2 (A)	17.783
P3 (kW)	0.95260	I3 (A)	16.670
P (kW)	2.82970	I (A)	17.498

Se considera que la intensidad a la que se hace el ensayo es la media de las tres intensidades de fase

$$I_{1cc} = \frac{I_1 + I_2 + I_3}{3} = \frac{18.043 + 17.783 + 16.670}{3} = 17.498 \text{ A}$$

y se verifica que el ensayo está muy bien hecho pues coincide con la intensidad nominal de ese devanado primario.

La potencia absorbida por el transformador en esas condiciones de cortocircuito  $P_{cc}$  es la suma de las tres medidas por el vatímetro en cada fase, es decir  $P_{cc} = P_1 + P_2 + P_3 = 2.8298 \text{ kW}$ .

Este ensayo se hace tras encubar el transformador, por lo que los devanados pueden estar aún calientes. Para calcular las pérdidas debidas a la carga a la temperatura de referencia, que es de 75°C según la UNE 60076-1, se extrapola linealmente siguiendo su Anexo E así:

El cambio de la resistencia de los devanados de cobre y aluminio con la temperatura (por ejemplo, de 40°C a 75°C) es de esta forma

$$(\text{aluminio}) \quad R_{75^\circ} = R_{40^\circ} \frac{225 + 75}{225 + 40}; \quad (\text{cobre}) \quad R_{75^\circ} = R_{40^\circ} \frac{235 + 75}{235 + 40}$$

Si suponemos que los devanados de aluminio estaban a 40°C al medir, llamamos  $P_{40^\circ} = R_{40^\circ} I_{cc}^2$  a las pérdidas medidas a esa temperatura, y para la misma intensidad las pérdidas a 75°C serían  $P_{75^\circ} = R_{75^\circ} I_{cc}^2$ , luego

$$\left. \begin{array}{l} R_{75^\circ} = R_{40^\circ} \frac{225 + 75}{225 + 40} \\ P_{40^\circ} = R_{40^\circ} I_{cc}^2 \\ P_{75^\circ} = R_{75^\circ} I_{cc}^2 \end{array} \right\} \begin{array}{l} P_{75^\circ} = P_{40^\circ} \frac{R_{75^\circ}}{R_{40^\circ}} = P_{40^\circ} \frac{225 + 75}{225 + 40} = \\ = 2829.7 \times 1.132 = 3203.5 \text{ W} \end{array}$$

Como este valor es inferior a los 3250 W permitidos por el Reglamento de eco-diseño de transformadores para un aparato de 400 kVA, el transformador cumple con el requisito de eficiencia exigible y podrá ponerse en funcionamiento.

La tensión a la que se ha conseguido ajustar así el ensayo representa, frente a la tensión nominal de ese devanado, el porcentaje que se conoce como *tensión de cortocircuito*, o *impedancia* o *reactancia de cortocircuito* del transformador (sección 1.3):

$$v_{cc} \% = z_{cc} \% = \frac{V_{1cc}}{V_{1N}} \times 100 = \frac{U_{1cc} / \sqrt{3}}{U_{1N} / \sqrt{3}} \times 100 = \frac{523.42}{13200} \times 100 = 3.97\%$$

que se comprueba satisface el requisito de 4% ( $\pm 10\%$ , es decir, entre 3.6% y 4.4%) para este tipo de máquinas.

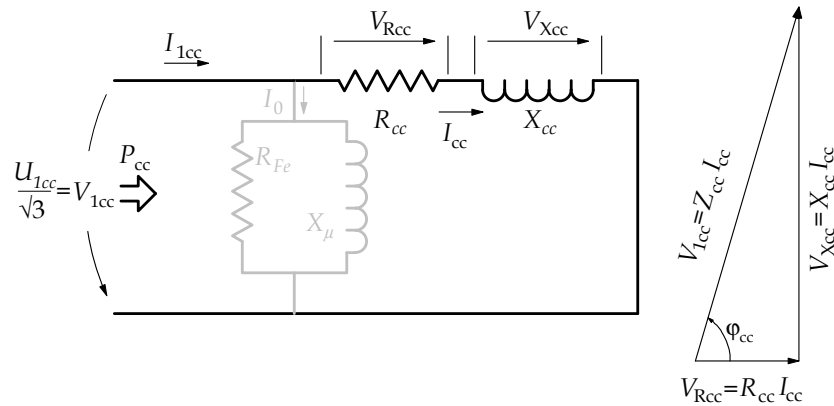


Fig. 106 Tensiones del ensayo de cortocircuito.

A continuación se obtiene el factor de potencia del transformador considerado como una carga trifásica equilibrada. La potencia absorbida total en cortocircuito es la suma de la que absorbe por cada una de sus fases

$$P_{cc} = 3(V_{1cc} I_{1cc} \cos\varphi_{cc})$$

de donde

$$\cos\varphi_{cc} = \frac{P_{cc}}{3 V_{1cc} I_{1cc}} = \frac{2829.8}{3 \times 302.2 \times 17.498} = 0.178 \text{ inductivo}$$

Resolviendo el diagrama fasorial de la Fig. 106 se obtienen los parámetros  $R_{cc}$ ,  $X_{cc}$  y la impedancia total del transformador  $Z_{cc}$ :

$$\left. \begin{aligned} V_{Rcc} &= V_{1cc} \cos\varphi_{cc} = 53.907 \text{ V}; & R_{cc} &= \frac{V_{Rcc}}{I_{cc}} = 3.081 \Omega \\ V_{Xcc} &= V_{1cc} \sin\varphi_{cc} = 297.350 \text{ V}; & X_{cc} &= \frac{V_{Xcc}}{I_{cc}} = 16.993 \Omega \end{aligned} \right\} \begin{aligned} Z_{cc} &= \frac{V_{1cc}}{I_{cc}} = \\ &= \frac{302.20}{17.498} = 17.270 \Omega \end{aligned}$$