

**Ensayo de  
transformadores**

**4**

## 4.1 Transformador en vacío

Como hemos visto anteriormente, el transformador está basado en que la energía se puede transportar eficazmente por inducción electromagnética desde una bobina a otra por medio de un flujo variable, con un mismo circuito magnético y a la misma frecuencia.

La potencia nominal o aparente de un transformador es la potencia máxima que puede proporcionar sin que se produzca un calentamiento en régimen de trabajo.

Debido a las pérdidas que se producen en los bobinados por el efecto Joule y en el hierro por histéresis y por corrientes de Foucault, el transformador deberá soportar todas las pérdidas más la potencia nominal para la que ha sido proyectado.

Un transformador podrá entonces trabajar permanentemente y en condiciones nominales de potencia, tensión, corriente y frecuencia, sin peligro de deterioro por sobrecalentamiento o de envejecimiento de conductores y aislantes.

### A. Definición

Se puede considerar un **transformador ideal** aquel en el que no existe ningún tipo de pérdida, ni magnética ni eléctrica.

La ausencia de pérdidas supone la inexistencia de resistencia e inductancia en los bobinados.

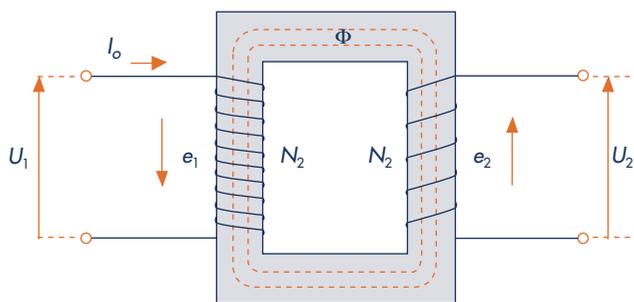


Fig. 4.1. Transformador ideal en vacío.

Como podemos observar en la Figura 4.1, en el transformador ideal no hay dispersión de flujo magnético, por lo que el flujo se cierra íntegramente sin ningún tipo de dificultad. Las tensiones cambian de valor sin producirse ninguna caída de tensión, puesto que no se producen resistencias en los bobinados primario y secundario.

En la práctica, en un transformador en vacío conectado a una red eléctrica esto no es así. Las bobinas ofrecen una determinada resistencia al paso de la corriente eléctrica, provocando una caída de tensión que se deberá tener en cuenta en ambos bobinados ( $R_1$  y  $R_2$ ).

Igualmente, el flujo magnético que se origina en el bobinado primario no se cierra en su totalidad con el secundario a través del núcleo magnético, sino que una parte de este flujo atraviesa el aislante y se cierra a través del aire.

Ambas bobinas no se enlazan por el mismo flujo, la pérdida de flujo magnético se traduce en la llamada **inductancia de dispersión** ( $X_{d1}$ ); por lo tanto, a la hora de analizar las pérdidas del transformador se han de tener en cuenta estas particularidades (véase la Figura 4.2).

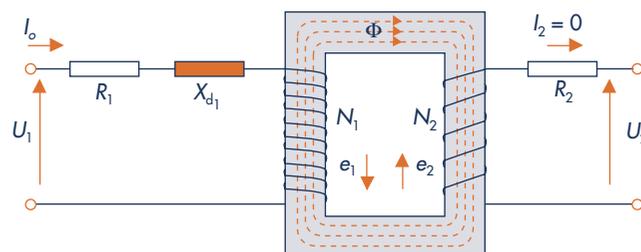


Fig. 4.2. Esquema del transformador real en vacío.

### B. Pérdidas en transformación

Ninguna máquina trabaja sin producir pérdidas de potencia, ya sea estática o dinámica; ahora bien, las pérdidas en las máquinas estáticas son muy pequeñas, como le sucede a los transformadores.

En un transformador se producen las siguientes pérdidas:

- Pérdidas por corriente de Foucault ( $P_F$ ).
- Pérdidas por histéresis ( $P_H$ ).
- Pérdidas en el cobre del bobinado ( $P_{cu}$ ).

Las pérdidas por corriente de Foucault ( $P_F$ ) y por histéresis ( $P_H$ ) son las llamadas **pérdidas en el hierro** ( $P_{Fe}$ ).

Cuando un transformador está en vacío, la potencia que medimos en un transformador con el circuito abierto se compone de la potencia perdida en el circuito magnético y la pérdida en el cobre de los bobinados.

Al ser nula la intensidad en el secundario ( $I_2 = 0$ ), no aparece en él pérdida de potencia; por otra parte, al ser muy pequeña la intensidad del primario en vacío ( $I_0$ ) con res-

pecto a la intensidad en carga  $I_{2nr}$ , las pérdidas que se originan en el cobre del bobinado primario resultan prácticamente insignificantes.

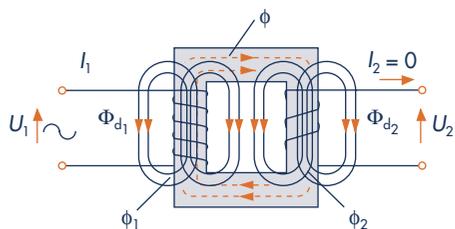


Fig. 4.3. Flujo principal y de dispersión de un transformador en vacío.

### C. Pérdidas en el hierro ( $P_{Fe}$ )

Las pérdidas de potencia en el hierro ( $P_{Fe}$ ) en un transformador en vacío se producen por las corrientes de Foucault ( $P_F$ ) y por el fenómeno de histéresis ( $P_H$ ).

Para reducir la pérdida de energía, y la consiguiente pérdida de potencia, es necesario que los núcleos que están bajo un flujo variable no sean macizos; deberán estar contruidos con chapas magnéticas de espesores mínimos, apiladas y aisladas entre sí.

La corriente eléctrica, al no poder circular de unas chapas a otras, tiene que hacerlo independientemente en cada una de ellas, con lo que se induce menos corriente y disminuye la potencia perdida por corrientes de Foucault. En la Figura 4.4 podemos observar cómo circula la corriente por ambos núcleos magnéticos.

Las **corrientes de Foucault** se producen en cualquier material conductor cuando se encuentra sometido a una variación del flujo magnético.

Como los materiales magnéticos son buenos conductores eléctricos, en los núcleos magnéticos de los transformadores se genera una fuerza electromotriz inducida que origina corriente de circulación en los mismos, lo que da lugar a pérdidas de energía por efecto Joule.

Las pérdidas por corrientes parásitas o de Foucault dependerán del material del que esté constituido el núcleo magnético.

Para el tipo de chapa magnética de una inducción de 1 Tesla o 10 000 Gauss, trabajando a una frecuencia de 50 Hz de laminado en frío de grano orientado, las pérdidas en el núcleo se estiman entre 0,3 W/kg y 0,5 W/kg, mientras que las pérdidas de la chapa de laminado en caliente para

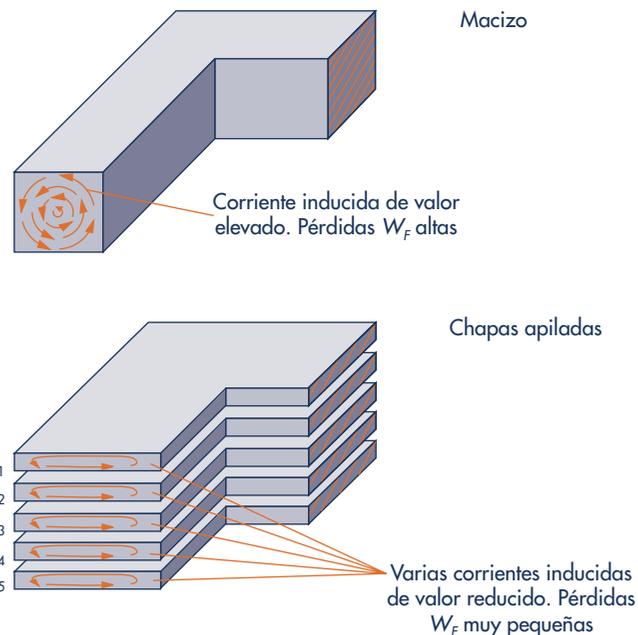


Fig. 4.4. Núcleos magnéticos.

la misma inducción y la misma frecuencia oscilan entre 0,8 y 1,4 W/kg.

La Tabla 4.1 indica las características de construcción, los valores magnéticos y la composición química para la determinación de las pérdidas de potencia en el hierro en función del espesor, la aleación y la inducción.

Espe- sor (mm)	Tole- rancia	Aleación % Si	1 Tesla ( $10^4$ Gauss) W/kg	1,5 Tesla $1,5 \cdot 10^4$ Gauss W/kg
0,5	0,10	0,5 - 1	2,9	7,40
0,5	0,10	2,5	2,3	5,6
0,35	0,10	2,5	1,7	4
0,35	0,10	4	1,3	3,25
0,35	0,10	4,5	1,2	3
0,35	0,10	4,5	0,9	2,1

Tabla 4.1. Características para la determinación de las pérdidas de potencia (W/kg).

Para el cálculo de las pérdidas en el hierro por las corrientes de Foucault recurriremos a la Fórmula 4.1, que indica que las pérdidas en el hierro son proporcionales al cuadrado de la inducción y al cuadrado de la frecuencia.

#### Fórmula 4.1

$$P_F = \frac{2,2 \cdot f^2 \cdot \beta_{max}^2 \cdot \Delta^2}{10^{11}}$$

Donde:

$P_F$  = pérdidas por corrientes de Foucault en W/kg

$f$  = frecuencia en Hz

$\beta_{max}$  = inducción máxima en Gauss

$\Delta$  = espesor de la chapa magnética en mm

De la fórmula anterior se deduce que el cambio de frecuencia de 50 a 60 Hz, por ejemplo, hace que aumenten las pérdidas en el transformador.

#### Caso práctico 1

Tenemos un transformador que trabaja a una frecuencia de 50 Hz, con una chapa magnética que tiene un espesor de 0,35 mm y una inducción magnética de 1 Tesla o 10 000 Gauss. Lo vamos a conectar a una red de 60 Hz de frecuencia. ¿Cuáles serán las pérdidas en el hierro conectado a la red de 50 Hz? ¿Cuáles serán las pérdidas en el hierro conectado a la red de 60 Hz?

Si aplicamos la Fórmula 4.1, para una frecuencia de 50 Hz serán:

$$P_F = \frac{2,2 \cdot f^2 \cdot \beta_{max}^2 \cdot \Delta^2}{10^{11}} = \frac{2,2 \cdot 50^2 \cdot 10000^2}{10^{11}} =$$

$$= \frac{2,2 \cdot 2500 \cdot 10^8 \cdot 0,122}{10^{11}} = 0,673 \text{ W/kg}$$

Para una frecuencia de 60 Hz, será:

$$P_F = \frac{2,2 \cdot f^2 \cdot \beta_{max}^2 \cdot \Delta^2}{10^{11}} =$$

$$= \frac{2,2 \cdot 60^2 \cdot 10000^2 \cdot 0,35}{10^{11}} =$$

$$= \frac{2,2 \cdot 3600 \cdot 10^8 \cdot 0,122}{10^{11}} = 0,970 \text{ W/kg}$$

Esto indica que cuanto mayor sea la frecuencia, mayores serán las pérdidas por corrientes de Foucault.

La **histéresis magnética** es el fenómeno que se produce cuando la imantación de los materiales ferromagnéticos no sólo depende del valor del flujo, sino también de los estados magnéticos anteriores. En el caso de los transformadores, al someter el material magnético a un flujo variable se produce una imantación que se mantiene al cesar el flujo variable, lo que provoca una pérdida de energía que se justifica en forma de calor.

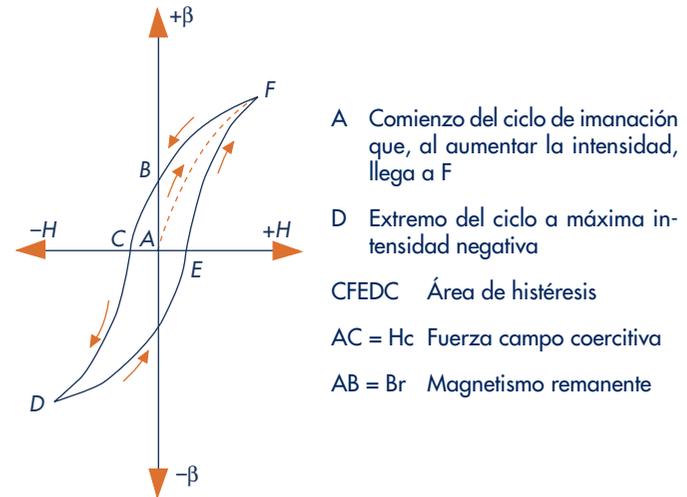


Fig. 4.5. Ciclo de histéresis.

La potencia perdida por histéresis depende esencialmente del tipo de material; también puede depender de la frecuencia, pero como la frecuencia en una misma zona o país siempre es la misma, la inducción magnética dependerá del tipo de chapa. A través de la **fórmula de Steinmetz** (Fórmula 4.2) se determinarán las pérdidas por histéresis.

El coeficiente de chapa oscila entre 0,0015 y 0,003, aunque baja hasta 0,007 en hierro de muy buena calidad.

#### Fórmula 4.2

$$P_H = K_h \cdot f \cdot \beta_{max}^n$$

Donde:

$K_h$  = coeficiente de cada material

$f$  = frecuencia en Hz

$\beta_{max}$  = inducción máxima en Tesla

$P_H$  = pérdida por histéresis en W/kg

$$n \begin{cases} = 1,6 \text{ para } \beta < 1 \text{ Tesla (} 10^4 \text{ Gauss)} \\ = 2 \text{ para } \beta > 1 \text{ Tesla (} 10^4 \text{ Gauss)} \end{cases}$$

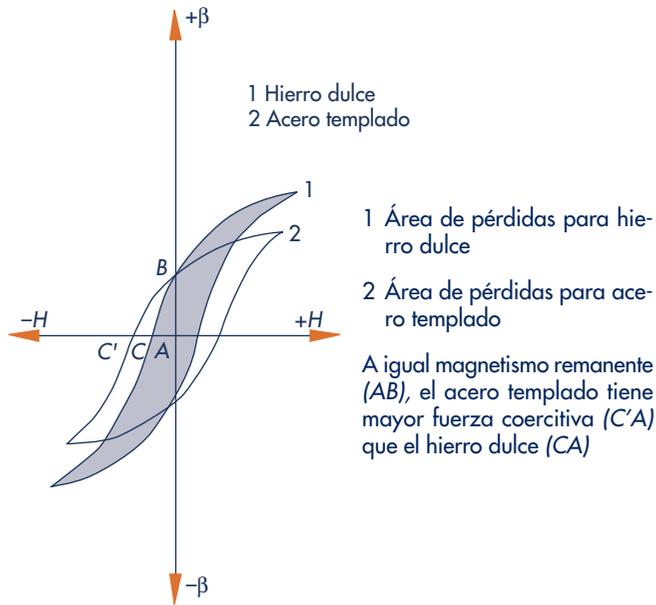


Fig. 4.6. Ciclo de histéresis de dos materiales diferentes.

### Caso práctico 2

Tenemos un transformador que trabaja a una frecuencia de 50 Hz, con una chapa magnética de una inducción de 1,2 Tesla (12 000 Gauss), conectado a una red de 50 Hz de frecuencia. El peso del núcleo del transformador es de 3 kg. ¿Cuáles serán las pérdidas por histéresis del núcleo magnético?

Si aplicamos la Fórmula 4.2 de Steinmetz y el coeficiente de histéresis tiene un valor de 0,002, la potencia perdida en el núcleo por histéresis será:

$$P_H = K_h \cdot f \cdot \beta_{max}^n = 0,002 \cdot 50 \cdot 1,2^2 = 0,144 \text{ W/kg}$$

Por lo tanto, la pérdida por histéresis del núcleo será:

$$P_{HT} = P_H \cdot \text{peso del hierro} = 0,144 \cdot 3 = 0,432 \text{ W}$$

Las pérdidas de potencia en el hierro ( $P_{Fe}$ ) o en el núcleo magnético son la suma correspondiente a las pérdidas por Foucault ( $P_F$ ) y por histéresis ( $P_H$ ), como indica la siguiente fórmula:

#### Fórmula 4.3

$$P_F + P_H = P_{Fe}$$

### Caso práctico 3

Tenemos un transformador conectado a una red de 50 Hz de frecuencia con una chapa magnética de 0,9 Tesla (9 000 Gauss) de inducción. El peso del núcleo del transformador es de 12 kg. El espesor de la chapa del núcleo es de 0,35 mm y el coeficiente de histéresis es 0,002.

Calcula la potencia perdida en el hierro.

Comenzaremos calculando la potencia perdida por Foucault.

$$P_F = \frac{2,2 \cdot f^2 \cdot \beta^2 \cdot e^2}{10^3} = \frac{2,2 \cdot 50^2 \cdot 0,9^2 \cdot 0,35^2}{10^3} =$$

$$= \frac{2,2 \cdot 2\,500 \cdot 0,81 \cdot 0,122}{10^3} = 0,545 \text{ W/kg}$$

Las pérdidas totales por Foucault serán:

$$P_{FT} = P_F \cdot \text{peso del núcleo} =$$

$$= 0,545 \cdot 12 = 6,54 \text{ W}$$

Las pérdidas por histéresis serán:

$$P_H = K_h \cdot f \cdot \beta^n = 0,002 \cdot 50 \cdot 0,9^{1,6} =$$

$$= 0,002 \cdot 50 \cdot 0,844866 = 0,0844 \text{ W/kg}$$

Las pérdidas totales por histéresis serán:

$$P_{HT} = P_H \cdot \text{peso del hierro} = 0,084 \cdot 12 = 1,01 \text{ W}$$

Para las pérdidas totales en el núcleo magnético, recurriremos a la Fórmula 4.3:

$$P_{Fe} = P_F + P_H = 6,54 + 1,01 = 7,55 \text{ W}$$

No obstante, las pérdidas en el hierro se pueden determinar midiendo la potencia consumida por el transformador en vacío mediante vatímetro, como podremos comprobar en el ensayo correspondiente, que recibe el nombre de ensayo en vacío.

## 4.2 Ensayo en vacío

El ensayo en vacío proporciona, a través de las medidas de tensión, intensidad y potencia en el bobinado primario, los

valores directos de la potencia perdida en el hierro, y deja abierto el bobinado secundario. Por lo tanto, este bobinado no será recorrido por ninguna intensidad, y no se tendrán en cuenta los ínfimos valores de las pérdidas en el cobre para este ensayo.

Los principales datos que hay que determinar en el ensayo en vacío son:

- Las **pérdidas en el hierro** a través de la lectura del vatímetro ( $W_1$ ) en el bobinado primario, entendiendo que la  $P_{10}$  es la potencia medida en el vatímetro ( $W_1$ ).

$$(P_{Fe} = P_{10})$$

- La **intensidad** en vacío del primario a través del amperímetro ( $A_1$ ).
- La **relación de transformación** ( $m$ ):

$$m = \frac{U_{1n}}{U_{20}}$$

También podemos calcular, con la ayuda de los resultados:

- La **impedancia** ( $Z$ ):

$$Z = \frac{U_{1n}}{I_{10}}$$

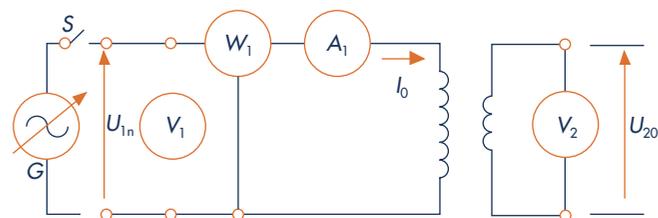
- La **potencia aparente** en vacío ( $S_{sap}$ ):

$$S_{sap} = U_{1n} \cdot I_{10}$$

- El **ángulo de desfase** ( $\varphi$ ) o factor de potencia de vacío:

$$\cos \varphi = \frac{P_{10}}{S_{sap}}$$

En vacío, el coseno de  $\varphi_{10}$  coincide aproximadamente con el  $\cos \varphi_{20}$  ( $\cos \varphi_{10} \cong \cos \varphi_{20}$ ).



G Fuente de alimentación de corriente alterna regulable (autotransformador regulable)

Fig. 4.7. Esquema eléctrico del ensayo de un transformador en vacío.

## Caso práctico 4

Calcula la potencia aparente y el factor de potencia en vacío de un transformador partiendo de los siguientes datos:

<b>Tensión del primario</b>	$U_{1n}$	380 V
<b>Intensidad del primario</b>	$I_{10}$	0,081 A
<b>Tensión del secundario</b>	$U_{2n}$	125 V
<b>Potencia medida con vatímetro</b>	$P_{10}$	2,2 W
<b>Resistencia del cobre</b>	$R_{cu}$	2,4 $\Omega$

Con los resultados obtenidos podemos calcular:

- La relación de transformación ( $m$ ).
- La potencia activa en vacío ( $P_{10}$ ).
- La impedancia ( $Z$ ).
- La potencia aparente ( $S_{sap}$ ).
- El ángulo de desfase  $\varphi$  entre la tensión y la intensidad de corriente.

En el ensayo en vacío, al estar abierto el bobinado secundario, no circula ninguna intensidad por éste, lo que permite que las tensiones primarias y secundarias sean exactas a las previstas en cada bobinado. Por lo tanto:

$$m = \frac{U_{1n}}{U_{2n}} = \frac{380}{125} = 3,04$$

La potencia perdida que hemos medido con el vatímetro en el bobinado primario del transformador en vacío corresponde a las pérdidas en el hierro y en el cobre.

$$P_{10} = 2,2 \text{ W}$$

La potencia perdida en el cobre se puede calcular mediante la resistencia del bobinado y el cuadrado de la intensidad del primario ( $I_{10}$ )<sup>2</sup>.

La resistencia del cobre medido con un óhmetro nos da 2,4  $\Omega$ ; la potencia del cobre será:

$$P_{cu} = R_{cu} \cdot (I_{10})^2 = 2,4 \cdot 0,081^2 = 0,0015 \text{ W}$$

Este resultado indica que la potencia que se pierde por el cobre del bobinado se puede despreciar con respecto a las pérdidas en el núcleo por las corrientes de Foucault y por el fenómeno de histéresis, en cualquier ensayo en vacío.

### Caso práctico 4 (continuación)

La impedancia se determinará conocida la tensión y la intensidad del primario:

$$Z = \frac{U_{1n}}{I_{10}} = \frac{380}{0,081} = 4\,691\ \Omega$$

La potencia aparente se determinará conocida la tensión y la intensidad del primario:

$$S_{sap} = U_{1n} \cdot I_1 = 380 \cdot 0,081 = 30,78\ \text{VA}$$

El ángulo de desfase  $\varphi$  entre la tensión y la intensidad de corriente.

$$\cos \varphi = \frac{P_{10}}{S_{sap}} = \frac{2,2}{30,78} = 0,0714$$

Hay que tener en cuenta algunas consideraciones cuando se producen pérdidas en el hierro o en vacío de un transformador; estas pérdidas tienen bastante importancia durante su explotación, ya que por ella misma provoca un consumo de energía incluso cuando el transformador no tiene consumo.

En los momentos que no tiene consumo exterior, esta energía deberá ser abonada por el usuario, debido a que los contadores de energía se conectan siempre en los primarios de los transformadores de los centros de transformación.

También se ha comprobado que las pérdidas en el hierro son aproximadamente proporcionales al cuadrado de la inducción, por lo que al usuario le interesan inducciones bajas; pero el interés de los constructores de transformadores es dar un valor tan elevado como puedan.

<b>V1</b>									
<b>V2</b>									
<b>P1</b>									
<b>P2</b>									
<b>m</b>									

Tabla 4.2. Cuadro de valores para la realización del ensayo.

Para realizar el ensayo de un transformador, deberemos seguir un determinado orden, que puede ser éste:

- 1.º Determinar las características del transformador.
- 2.º Exponer los objetivos del ensayo.
- 3.º Diseñar el esquema de montaje del ensayo (puede ser como el de la Figura 4.7) y realizar los cálculos previos.
- 4.º Procederemos a localizar los aparatos de medidas necesarios para realizar todas las medidas que el ensayo requiere, y un autotransformador regulable para disponer de diferentes valores de las tensiones. Para eso recurrimos al esquema de montaje que tenemos en la Figura 4.7.
- 5.º Realizaremos el montaje de los elementos que requieren el ensayo según el esquema de montaje.
- 6.º Procederemos a realizar las medidas pertinentes, anotando en un cuadro de valores todos los datos que los aparatos de medidas nos vayan aportando, como indica el protocolo de ensayos.
- 7.º Cotejaremos los datos obtenidos con los cálculos previos, procederemos a determinar la potencia perdida y redactaremos las conclusiones.

Denominaremos **protocolo de ensayo** al documento que recoge el proceso que hemos expuesto anteriormente. Este protocolo se realiza también con los ensayos del transformador en carga y en cortocircuito, como veremos más adelante.

## 4.3 Transformador en cortocircuito

En los transformadores, al igual que en cualquier dispositivo eléctrico, se producen pérdidas de potencia; una parte de éstas se producen ya en vacío y se mantienen constantes e invariables en carga.

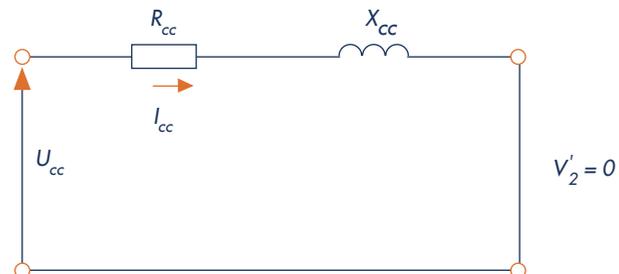


Fig. 4.8. Circuito equivalente de resistencias e inductancias de un transformador en cortocircuito.

PROTOCOLO DE ENSAYO DE TRANSFORMADORES							
Tipo de ensayo	ENSAYO EN VACÍO						
Características del transformador	$S_1$ _____ (VA)	$U_2$ _____ (V)	$f$ _____ (Hz)				
	$S_2$ _____ (VA)	$I_1$ _____ (A)					
	$U_1$ _____ (V)	$I_2$ _____ (A)					
Objetivos del ensayo	Determinar las pérdidas en el hierro						
Esquema de montaje							
Instrumentos de medidas y regulación a utilizar							
Tabla de valores de las medidas realizadas a diferentes valores de la tensión	$U_1$ (voltios)	$U_2$ (voltios)	$I_1$ (amperios)	$I_2$ (amperios)	$W_1$ (vatios)	$W_2$ (vatios)	(m) Relación de transformación
Cálculos definitivos de la potencia perdida en el hierro							

Tabla 4.3. Ficha para el protocolo de ensayo de un transformador.

La otra parte de las pérdidas de potencia se producen en los conductores de los bobinados primario y secundario, sometidos a la intensidad nominal. Se denominan pérdidas  $R I^2$  debidas al cobre ( $P_{cu}$ ).

Las pérdidas de potencia en el cobre ( $P_{cu}$ ) se determinan mediante el ensayo en cortocircuito.

## 4.4 Ensayo en cortocircuito

Con el ensayo en cortocircuito, conseguimos las intensidades nominales en los dos bobinados, aplicando una pequeña tensión al primario y cortocircuitando el secundario con un amperímetro (el amperímetro tiene una resistencia prácticamente nula), como se muestra en las figuras 4.9 y 4.10.

En muchos ensayos en vacío, la  $I_{cc}$  supera el 25% de la intensidad nominal ( $I_n$ ).

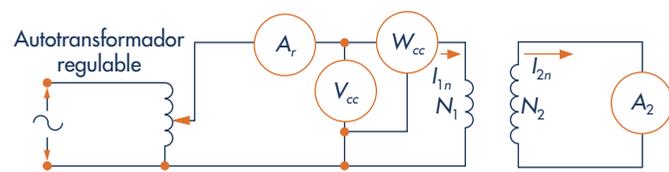


Fig. 4.9. Esquema de montaje de un transformador en cortocircuito.

El procedimiento es el siguiente:

Con un autotransformador regulable y comenzando desde cero, aplicamos progresivamente la tensión, que se incrementa voltio a voltio, hasta conseguir las intensidades nominales en los dos bobinados.

La tensión aplicada, una vez alcanzada la intensidad nominal en el secundario, recibe el nombre de tensión de cortocircuito ( $U_{cc}$ ). Esta tensión supone un valor bajo con respecto a la tensión nominal aplicada al transformador cuando está en carga.

En la práctica, la  $U_{cc}$  se da en valores porcentuales oscila entre un 4 % y un 10 % de la tensión nominal  $U_{1n}$ . En transformadores de distribución, la tensión nominal se representa con la letra  $u$  minúscula seguida de  $cc$ , que indica el valor en cortocircuito ( $U_{cc}$ ), así como en las demás magnitudes, como son las impedancias, las inductancias, etc.

$$u_{cc} = U_{cc} \cdot \frac{100}{U_{1n}} \text{ (en \%)}$$

En el ensayo en cortocircuito, como las intensidades son nominales, se producen pérdidas en el cobre por efecto Joule similares a las que se dan cuando el transformador está en carga; se diferencian en el rendimiento cuando el índice de carga es menor que la unidad.

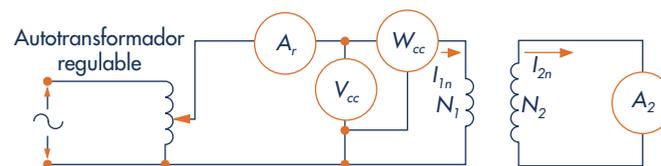


Fig. 4.10. Esquema de montaje para el ensayo en cortocircuito de un transformador.

Las pérdidas en el cobre se calculan mediante:

$$P_{cu} = R_1 \cdot I_{1n}^2 + R_2 \cdot I_{2n}^2$$

### A. Pérdidas en cortocircuito

Estas pérdidas se determinan directamente con el vatímetro conectado en el primario, que corresponde a la potencia en cortocircuito ( $P_{cc}$ ) (véase la Figura 4.9).

$$P_{cc} = P_{cu}$$

## Caso práctico 5

Queremos conocer las pérdidas de potencia en los bobinados primario y secundario de un transformador. Para ello conectamos el secundario en cortocircuito; el amperímetro del secundario nos mide una intensidad de 6 A y 2 A en el amperímetro del primario. Midiendo las resistencias de los bobinados con un polímetro digital, tenemos como  $R_1$  una resistencia de 0,85  $\Omega$ , y  $R_2$ , una resistencia de 1,4  $\Omega$ .

$$P_{cu} = R_1 \cdot I_{1n}^2 + R_2 \cdot I_{2n}^2 = 0,85 \cdot 6 + 1,4 \cdot 2 = 5,1 + 2,8 = 7,9 \text{ W}$$

$I_{2cc}$					
$I_{1cc}$					
$U_{1cc}$					
$P_{1cc}$					

Tabla 4.4. Tabla de valores para el ensayo en cortocircuito de un transformador.

## B. Resistencias, inductancias e impedancias en cortocircuito

Los valores de la resistencia ( $R_{cc}$ ), de la inductancia ( $X_{cc}$ ), y de la impedancia ( $Z_{cc}$ ) de los circuitos en el ensayo en cortocircuito se obtendrán mediante:

- **Resistencia:**

$$R_{cc} = R_1 + R'_2$$

- **Inductancia:**

$$X_{cc} = X_{d1} + X'_{d2}$$

- **Impedancia:**

$$Z_{cc}^2 = R_{cc}^2 + X_{cc}^2$$

Donde:

$$Z_{cc} = \sqrt{R_{cc}^2 + X_{cc}^2}$$

También:

$$Z_{cc} = \frac{U_{cc}}{I_1}$$

Por lo tanto la corriente de cortocircuito siempre dependerá de las resistencias de sus bobinados y de las inductancias de dispersión provocadas por los mismos.

## C. La intensidad de cortocircuito

La intensidad en cortocircuito ( $I_{cc}$ ) se obtiene así:

$$I_{cc} = \frac{U_2}{Z_{cc}}$$

Dado que no se conoce la tensión del secundario, se obtiene sustituyendo la tensión del secundario ( $U_2$ ) por su valor en la expresión de la relación de transformación, siendo:

$$I_{cc} = \frac{\frac{U_1}{m}}{\sqrt{R_{cc}^2 + X_{cc}^2}}$$

## D. El factor de potencia de cortocircuito

Una vez obtenidos los datos en el ensayo (la potencia y la tensión de cortocircuito), el coseno de  $\varphi$  será:

$$\cos \varphi_{cc} = \frac{P_{cc}}{U_{cc} \cdot I_{1n}}$$

## 4.5 Rendimiento del transformador

El **rendimiento del transformador** se define como la relación entre la potencia cedida al exterior de la máquina por el bobinado secundario y la potencia absorbida por el bobinado primario:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}$$

Para determinar el rendimiento de un transformador, podemos seguir el **método directo**, es decir, medir la potencia del primario con un vatímetro y la del secundario con otro, de forma que el rendimiento vendrá determinado por el cociente que resulta entre ellos, como se expone en la fórmula anterior, en tanto por uno y en tanto por cien, como se indica a continuación:

$$\eta = \frac{W_2}{W_1} \cdot 100 \text{ (en \%)}$$

Este resultado puede impedirnos calcular el rendimiento, debido a que el error de medida de los voltímetros es mayor que la pequeña diferencia entre  $P_2$  y  $P_1$ .

Con el **método indirecto** podemos determinar el rendimiento a través del cociente que resulta de la potencia que el transformador cede al exterior y la potencia absorbida por el transformador, sumándole las pérdidas en el cobre y las pérdidas en el hierro.

$$\eta = \frac{P_u}{(P_u + P_{cu} + P_{Fe})}$$

## 4.6 Refrigeración

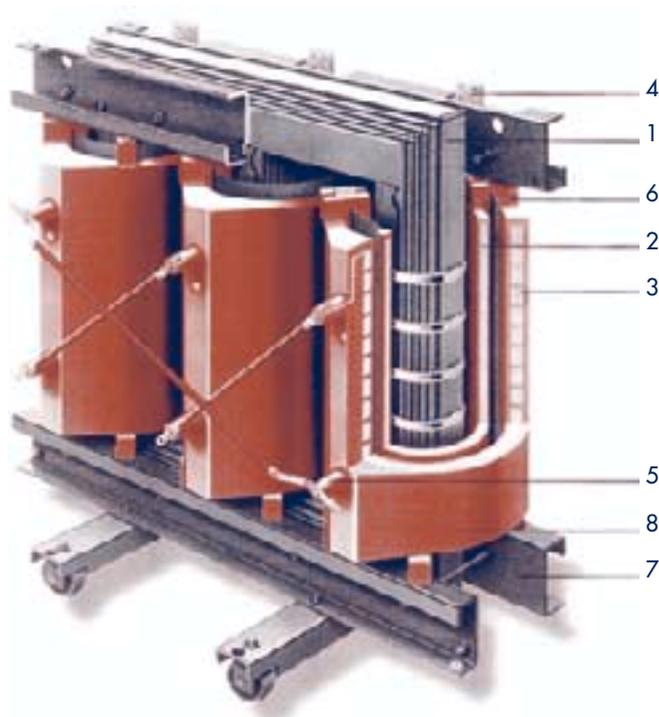
La refrigeración en los transformadores se produce de diferentes maneras debido al tipo de construcción, a la potencia, al medio ambiente donde se encuentre, etc.

Los transformadores de pequeña potencia se suelen refrigerar mediante la expulsión del aire caliente directamente a la atmósfera. El calentamiento en el transformador se produce por las pérdidas de energía eléctrica.

En los transformadores secos, el escaso efecto refrigerante del aire no es suficiente para su refrigeración natural, por

lo que son construidos con gran superficie de evacuación de aire.

Está normalizado que los transformadores trabajen de forma permanente en régimen nominal y a una altitud de 1 000 metros; el calentamiento medio no debe superar los 65°C a temperatura ambiente, admitiendo 40°C como temperatura máxima del ambiente.



- 1 Núcleo de tres columnas construido a base de chapas magnéticas de grano orientado de bajas pérdidas aisladas por ambos lados.
- 2 Arrollamiento de baja tensión construido con banda de aluminio; las espiras están fijamente pegadas entre sí mediante material aislante laminado.
- 3 Arrollamiento de alta tensión a base de bobinas individuales de aluminio, bobinados en fleje; la resina se trata en vado.
- 4 Terminales de baja tensión; arriba, por el lado posterior, y abajo, mediante consulta.
- 5 Terminales de alta tensión: disposición variable para optimizar el diseño del C.T.
- 6 Separadores elásticos: eliminación de vibraciones entre núcleo y devanados, lo que reduce el ruido.
- 7 Armazón y chasis con ruedas orientables para desplazamiento longitudinal y transversal.
- 8 Aislamiento de resina epoxy/cuarzo molido exento de mantenimiento, seguro contra la humedad y tropicalizado, de difícil combustión y autoextinguible.

Fig. 4.11. Transformador trifásico seco.

## 4.7 Medida de temperatura

Se utilizan varios métodos para medir la temperatura en el transformador:

- Método por termómetro.
- Método por variación de resistencias de los bobinados.
- Método por detectores internos de temperatura.

### A. El método por termómetro

Consiste en tomar la temperatura en el aceite refrigerante y sobre el núcleo a aquellos transformadores que tienen cuba de aceite.

A los transformadores secos se les toma en el núcleo, en otras partes metálicas y en el bobinado, si se tiene acceso a él, mediante unas sondas específicas para cada punto de contacto que se introducen en la parte del transformador que vayamos a medir, y se conecta a un termómetro digital, como el de la Figura 4.12.

### B. El método por variación de resistencias

Consiste en medir las resistencias en frío, y después de un tiempo estipulado de aproximadamente cuatro horas, una vez que el transformador está funcionando en régimen nominal, volver a medir las resistencias de los bobinados y calcular la variación de temperatura en función de la diferencia de resistencias en los mismos.

### C. El método por detectores internos de temperatura

Consiste en introducir, durante la construcción del transformador, unos sensores de temperatura (termorresistores) que actúan en forma de señal al detectar la temperatura que se les ha marcado.

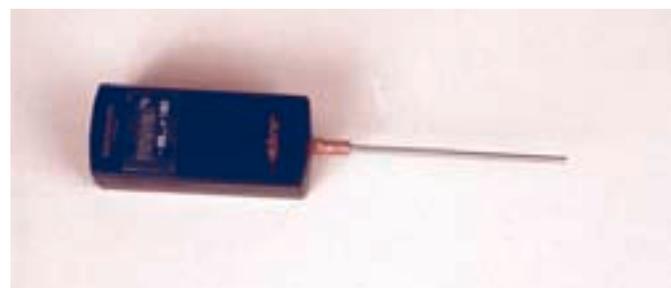


Fig. 4.12. Termómetro digital con sonda de temperatura.

## 4.8 Medida de aislamiento

La medida de aislamiento consiste en verificar el total aislamiento de los circuitos eléctricos del transformador entre sí, y entre éstos y las partes metálicas del transformador.

Un aislamiento defectuoso no detectado por el comprobador de continuidad puede provocar cortocircuito en el transformador y generar mayores problemas en el funcionamiento, además de poner en peligro a las personas que estén cerca de éstos. Para ello se utiliza un aparato de medida llamado «medidor de aislamiento» o **megóhmetro**.

El ensayo consiste en medir entre masas y los bobinados una tensión entre 500 y 1 000 voltios en corriente continua suministrada por el medidor de aislamiento (*megger*).

Para que la resistencia de aislamiento cumpla los límites establecidos por el Comité Electrotécnico Internacional, el valor mínimo será:

$$R_{ais} = U \cdot 1\,000$$

Donde:

$R_{ais}$  = resistencia de aislamiento en  $M\ \Omega$  con un mínimo de 250 000  $M\ \Omega$

$U$  = tensión más elevada de la máquina en voltios

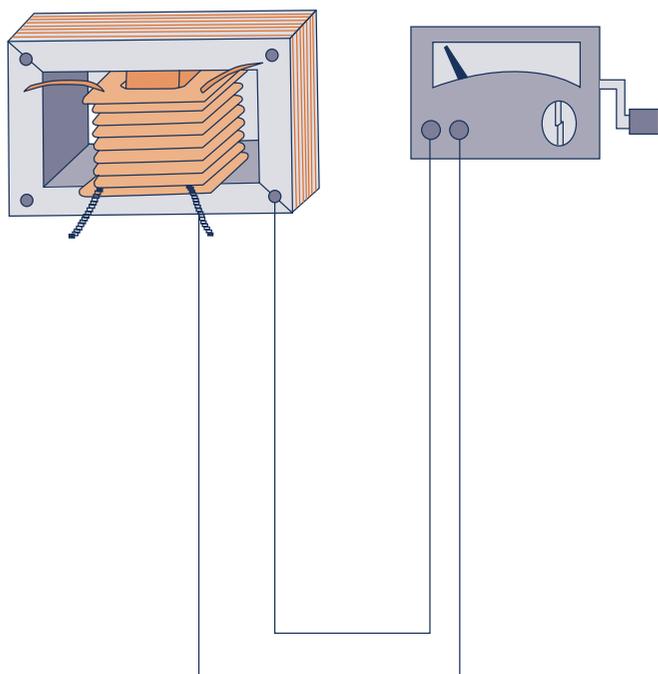


Fig. 4.13. Medidor de aislamiento con megóhmetro.

Máquina	Tensión de prueba en V	Medida de aislamiento	Resultado de la medida	Resistencia de fallo
Transformador monofásico	entre 500 y 1 000	primario y masa		
	entre 500 y 1 000	secundario y masa		
	entre 500 y 1 000	primario y secundario		

Tabla 4.5. Medida de aislamiento en una máquina eléctrica.

## 4.9 Medida de rigidez dieléctrica

La rigidez dieléctrica es la tensión por unidad de espesor que aguanta el aislante sin perforarse. Se expresa en kV/cm.

Esto no es suficiente para que el aislante sea adecuado a la tensión de funcionamiento, ya que existen muchos factores que pueden complicar el aislamiento, como, por ejemplo, la humedad, el envejecimiento, el calentamiento excesivo, etc. Para ello se establecen unas normas que deben respetarse para el buen funcionamiento de la máquina.

La rigidez dieléctrica depende de la naturaleza del aislante, y la tensión que éste puede soportar es el producto de la rigidez dieléctrica por el espesor.

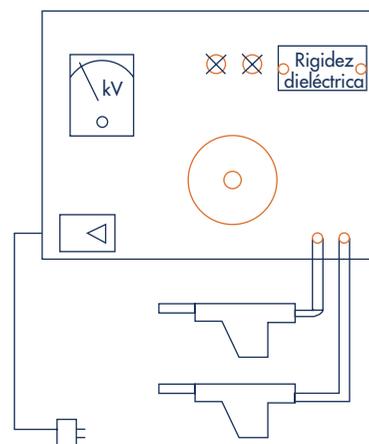


Fig. 4.14. Dibujo del medidor de rigidez dieléctrica.

La medida se realiza entre cada uno de los bobinados y masa, y entre los bobinados. Se le irá sometiendo pro-

gresivamente durante un minuto a una tensión igual a  $2 U_n + 1\,000\text{ V}$  a 50 Hz, sin superar la tensión máxima de 1 500 V.

Máquina	Tensión de prueba en V	Medida de rigidez dieléctrica	Resultado de la medida	Resistencia de fallo
Transformador monofásico	$2 U_n + 1\,000 \leq 1\,500$	primario y masa		
	$2 U_n + 1\,000 \leq 1\,500$	secundario y masa		
	$2 U_n + 1\,000 \leq 1\,500$	primario y secundario		

Tabla 4.6. Medida de rigidez dieléctrica en una máquina eléctrica.

## 4.10 Acoplamiento en paralelo de transformadores monofásicos

Cuando tenemos una demanda de potencia mayor que la que podemos suministrar mediante un transformador, cabe

la posibilidad de cubrir esa necesidad acoplando dos o más transformadores en paralelo.

Para que esto sea posible, deben darse las siguientes condiciones:

- Igual relación de transformación.
- Iguales tensiones de cortocircuito.
- Misma conexión a la red.

La potencia nominal no debe ser superior al doble de la potencia del otro transformador.

## 4.11 Normas de seguridad en el taller de ensayos

- Conectar siempre a tierra la estructura metálica del transformador que se vaya a ensayar.
- En el ensayo en cortocircuito, poner mucha atención a la tensión que se le proporciona progresivamente al bobinado primario, y no exceder nunca la intensidad nominal del primario o del secundario.
- En el ensayo de aislamiento, comprobar que los bornes del transformador están desconectados de la red eléctrica.

### Conceptos básicos

**Corrientes de Foucault:** corrientes producidas en cualquier material conductor cuando se encuentra sometido a una variación del flujo magnético. Como los materiales magnéticos son buenos conductores eléctricos, en los núcleos magnéticos de los transformadores se genera una fuerza inducida que origina una corriente de circulación.

**Histéresis magnética:** fenómeno que se produce cuando la imantación de los materiales ferromagnéticos no sólo depende del valor del flujo, sino también de los estados magnéticos anteriores. En los transformadores, al someter el material magnético a un flujo variable, se produce una imantación que se mantiene cuando éste cesa, lo que provoca una pérdida de energía.

**Protocolo de ensayo:** documento que recoge los datos del proceso de ensayo de un transformador: características del transformador, objetivos del ensayo, diseño del esquema de montaje del ensayo, detalle de los aparatos necesarios para realizar todas las medidas, relación de los valores obtenidos y los cálculos definitivos.

**Rendimiento del transformador:** relación entre la potencia cedida al exterior de la máquina por el bobinado secundario y la potencia absorbida por el bobinado primario.

**Transformador ideal:** transformador en el que no existen ningún tipo de pérdidas, ni magnéticas ni eléctricas. La inexistencia de pérdidas supone la ausencia de resistencia e inductancia en los bobinados.

### Autoevaluación

1. ¿Cómo se expresaría que un transformador se encuentra en vacío?
2. ¿Qué se determina con el ensayo de un transformador en vacío?
3. ¿Qué son pérdidas en el hierro?
4. ¿Cuál será la potencia perdida en el hierro por Foucault en un transformador con una inducción de 1 Tesla (10 000 Gauss) y un espesor de la chapa magnética de 0,35 mm, conectada a una red con una frecuencia de 50 Hz?
5. ¿Qué son pérdidas en el cobre?
6. ¿Qué se determina con el ensayo en cortocircuito?
7. ¿Cuál será la potencia perdida en el cobre?
8. Define y demuestra el rendimiento de un transformador.
9. Calcula la resistencia de aislamiento de un transformador de 380 V en el primario y 220 V en el secundario. La potencia es de 30 kVA.
10. Cita y explica los métodos para el cálculo del rendimiento de un transformador.

### Actividades de enseñanza-aprendizaje

#### 11. Ensayo de un transformador en vacío.

##### • Objetivos:

- Determinar las pérdidas de un transformador en vacío.
- Efectuar el montaje real de un ensayo en vacío.

##### • Datos:

- Calcular la potencia en vacío de un transformador conectado a una red de 220 V. Para ello procederemos a realizar las medidas necesarias con los aparatos correspondientes.

##### • Medios didácticos:

- Un transformador monofásico de pequeña potencia.
- Un autotransformador regulable de tensión.
- Dos voltímetros.

- Un vatímetro.
- Un amperímetro.

##### • Procedimiento:

- 1.º Mediremos la tensión del bobinado primario  $U_1$  con el voltímetro  $V_1$ .
- 2.º Mediremos la intensidad de corriente del bobinado primario  $I_{10}$  con el amperímetro  $A_1$ .
- 3.º Mediremos la potencia activa  $P_{10}$  con el vatímetro conectado al bobinado primario.

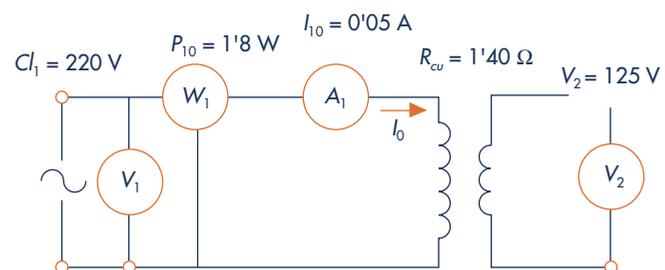


Fig. 4.15. Esquema del transformador en vacío.

Resultados de las medidas:

$U_{10}$	220 V
$I_{10}$	0,05 A
$U_{20}$	125 V
$R_{cu}$	1,4 $\Omega$
$P_{10}$	1,8 W

##### • Contesta:

- a) Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en las mediciones, calcula: la relación de transformación, la potencia activa en vacío (potencia perdida), la impedancia ( $Z$ ) y la potencia aparente ( $S_{sep}$ ).
- b) Determina el ángulo de desfase  $\varphi$  entre la tensión y la intensidad de corriente.
- c) Contrasta las pérdidas de potencia por Foucault y por histéresis.
- d) Comprueba las pérdidas totales en el hierro.

## 12. Ensayo de un transformador en cortocircuito.

### • Objetivos:

- Conocer las conclusiones del ensayo de transformador en cortocircuito.
- Conocer el montaje real de un ensayo en cortocircuito.
- Conocer la tensión de cortocircuito (en %).

### • Medios didácticos:

- Un transformador monofásico de pequeña potencia.
- Un autotransformador regulable de tensión.
- Un voltímetro.
- Dos amperímetros.
- Un vatímetro.

### • Datos:

- Tenemos un transformador de tensión nominal en el primario de 220 V y queremos conocer la tensión en cortocircuito (en %), por lo que hemos de realizar el montaje requerido como indica la Figura 4.16.

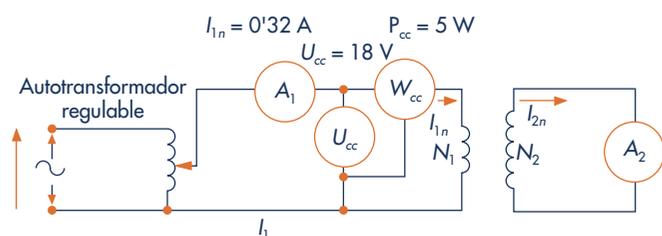


Fig. 4.16. Esquema del transformador en cortocircuito.

### • Procedimiento:

- 1.º Aplicaremos tensión de forma progresiva y de voltio en voltio hasta conseguir en el bobinado primario o en el secundario la intensidad nominal medida por los amperímetros correspondientes.

2.º Tomaremos los datos de la medida de los amperímetros del primario  $A_1$  y del secundario  $A_2$ .

3.º Tomaremos los datos de la potencia activa con el vatímetro conectado al bobinado primario.

$I_{1n}$	$U_{cc}$	$P_{cc}$

4.º En el transformador ensayado, obtenemos el resultado para la tensión en cortocircuito. La tensión en cortocircuito es de gran importancia para el cálculo de la impedancia interna  $Z$  del transformador, de la potencia perdida en el cobre  $P_{cu}$ , de los bobinados, del factor de potencia  $\varphi$  y de la intensidad en cortocircuito  $I_{cc}$ . Por lo tanto, a partir de estos valores podríamos determinar el  $\cos \varphi_{cc}$ .

### • Contesta:

- a) Determina las pérdidas en el cobre.
- b) Determina la tensión de cortocircuito de un transformador.

## 13. Medida de aislamiento del transformador.

### • Objetivo:

- Verificar si el transformador cumple la normativa sobre aislamiento.
- Manejar el medidor de aislamiento o megohmetro (*megger*).

### • Medios didácticos:

- Transformador monofásico.
- Medidor de aislamiento.

### • Procedimiento:

- 1.º Desconectamos los bobinados primario y secundario de la red y de la carga, respectivamente.
- 2.º Conectamos el megóhmetro entre el bobinado primario y la carcasa metálica del transformador.

3.º Conectamos el megohmetro entre el bobinado secundario y la carcasa metálica del transformador.

4.º Conectamos el megohmetro entre el bobinado primario y el secundario.

• **Datos:**

Máquina	Tensión de prueba en V	Medida de aislamiento	Resultado de la medida	Resistencia de fallo
Transformador monofásico	entre 500 y 1 000	primario y masa	Infinito ( $\infty$ )	
	entre 500 y 1 000	secundario y masa	Infinito ( $\infty$ )	
	entre 500 y 1 000	primario y secundario	Infinito ( $\infty$ )	

Tabla 4.7. Medida de medidas de aislamiento en una máquina eléctrica.

El resultado obtenido en la medida de aislamiento por el medidor de aislamiento es infinito en cada una de las medidas, como indica el cuadro anterior.

• **Contesta:**

a) Comprobar mediante fórmula si el resultado está dentro de los límites normalizados.

**14. Medida de rigidez dieléctrica en sólido.**

• **Objetivos:**

- Comprobar la posibilidad de perforación de un aislante.
- Estudiar el concepto de «rigidez dieléctrica».

• **Medios didácticos:**

- Transformador monofásico.
- Medidor de rigidez dieléctrica (chispómetro).

• **Procedimiento:**

- 1.º Identificar la tensión mayor a la que trabaja el transformador.
- 2.º Conectar el medidor de rigidez dieléctrica a un borne del primario y a la carcasa metálica del transformador; aumentar progresivamente el valor de la tensión de rigidez dieléctrica hasta llegar a 1 500 voltios durante un minuto.
- 3.º Conectar el medidor de rigidez dieléctrica a un borne del secundario y a la carcasa metálica del transformador; aumentar progresivamente el valor de la tensión de rigidez dieléctrica hasta llegar a 1 500 voltios durante un minuto.
- 4.º Conectar el medidor de rigidez dieléctrica a un borne del primario y a otro borne del secundario del transformador; aumentar progresivamente el valor de la tensión de rigidez dieléctrica hasta llegar a 1 500 voltios durante un minuto.

Máquina	Tensión de prueba en V	Medida de rigidez dieléctrica	Resultado de la medida	Resistencia de fallo
Transformador monofásico	$2 U_n + 1\,000 \leq \leq 1\,500$	primario y masa	*	
	$2 U_n + 1\,000 \leq \leq 1\,500$	secundario y masa	*	
	$2 U_n + 1\,000 \leq \leq 1\,500$	primario y secundario	*	

(\*) No se ha disparado el medidor de rigidez dieléctrica.

Tabla 4.8. Medida de rigidez dieléctrica en una máquina eléctrica.

• **Contesta:**

- a) Comprueba mediante fórmula si el resultado de la medida está dentro de lo normalizado.
- b) Identifica una perforación provocada.