

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



Circuitos Magnéticos y Transformadores
Prácticas de Laboratorio

PRÁCTICA 3

**EL CIRCUITO EQUIVALENTE
DEL TRANSFORMADOR TRIFÁSICO**

ANGEL RAMOS GÓMEZ

Versión 2
Diciembre de 2010

Indice

1. OBJETIVOS DE LA PRÁCTICA
2. INTRODUCCIÓN TEÓRICA
 - 2.1. Circuito equivalente de un transformador trifásico
 - 2.2. El ensayo de vacío y los parámetros de la rama paralelo del circuito equivalente de un transformador trifásico
 - 2.3. El ensayo de cortocircuito y los parámetros de la rama serie del circuito equivalente de un transformador trifásico
3. DESARROLLO DE LA PRÁCTICA
 - 3.1. Medida de la resistencia de los arrollamientos primario y secundario
 - 3.2. Ensayo de vacío
 - 3.3. Ensayo de cortocircuito
4. TIEMPOS PREVISTOS PARA LA PRÁCTICA
5. EVALUACIÓN DE LA PRÁCTICA

ANEXOS

- A.1. Medida de la potencia activa consumida por un sistema trifásico
- A.2. Pérdidas por corrientes de Foucault en los conductores

HOJA DE RESULTADOS

1. OBJETIVOS DE LA PRÁCTICA

Los principales objetivos de la Práctica 3 son:

- ✓ Conocer los parámetros del circuito equivalente de un transformador trifásico e identificar los ensayos con los que se pueden calcular
- ✓ Medir la resistencia de los arrollamientos y calcular su variación con la temperatura
- ✓ Realizar un ensayo de vacío del transformador y calcular los parámetros de la rama paralelo del circuito equivalente
- ✓ Realizar un ensayo de cortocircuito del transformador y calcular los parámetros de la rama serie del circuito equivalente

2. INTRODUCCIÓN TEÓRICA

2.1. Circuito equivalente de un transformador trifásico

El circuito equivalente de un transformador es un circuito conexo que incorpora los fenómenos físicos que se producen en un transformador real a frecuencia industrial, permitiendo la aplicación de las técnicas de la teoría de circuitos eléctricos en la resolución de múltiples problemas del funcionamiento de los transformadores en las redes eléctricas.

El desarrollo del circuito equivalente del transformador se inicia con la reducción de ambos arrollamientos a un mismo número de espiras.

En una aproximación simple, se podría indicar que los parámetros de la rama paralelo del circuito equivalente representan los fenómenos ligados a la transformación electromagnética que se produce en el núcleo ferromagnético (creación del flujo común de magnetización y pérdidas en el hierro).

Por otra parte, los parámetros de la rama serie del circuito equivalente representan los fenómenos ligados al funcionamiento en carga (pérdidas Joule en los arrollamientos, flujos dispersos y pérdidas adicionales asociadas a dichos flujos).

Todo ello nos conduce a una representación del circuito equivalente del transformador según la figura 1, en la que aparecen los parámetros:

- ✓ R_{Fe} : resistencia asociada a las pérdidas en el hierro
- ✓ X_{μ} : reactancia de magnetización
- ✓ R_1 : resistencia asociada al arrollamiento primario
- ✓ R'_2 : resistencia asociada al arrollamiento secundario reducida al primario
- ✓ X_{σ_1} : reactancia de dispersión asociada al arrollamiento primario
- ✓ X'_{σ_2} : reactancia de dispersión asociada al arrollamiento secundario reducida al primario

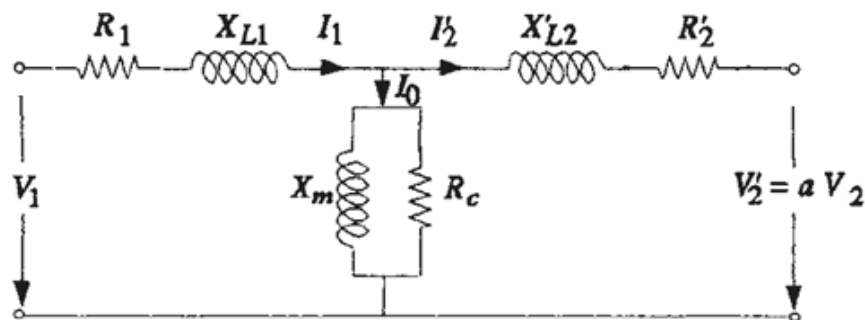


Figura 1: Circuito equivalente de un transformador

En el caso de transformadores trifásicos, la representación de los fenómenos físicos se realiza de la misma forma, mediante un circuito monofásico equivalente. Los parámetros de dicho circuito monofásico equivalente pueden realizar una representación de los fenómenos físicos por fase o una representación fase-neutro.

Por su mayor utilidad en la resolución de problemas prácticos, se considerará para la práctica el **circuito monofásico equivalente fase-neutro** del transformador.

Dado que un circuito equivalente fase-neutro de un transformador requiere considerar los arrollamientos conectados en estrella, en aquellos arrollamientos que estén conectados en triángulo se deberá utilizar la conversión triángulo- estrella definida por la expresión (1):

$$Z_{\Delta} = 3 \cdot Z_Y \tag{1}$$

La determinación de los parámetros del circuito equivalente de un transformador se realiza en la práctica a partir de dos sencillos ensayos: el ensayo de vacío y el ensayo de cortocircuito.

2.2. El ensayo de vacío y los parámetros de la rama paralelo del circuito equivalente de un transformador trifásico

El ensayo de vacío consiste en aplicar a uno de los arrollamientos del transformador su tensión asignada, manteniendo el otro arrollamiento en circuito abierto.

En estas condiciones, se mide la potencia activa absorbida en el ensayo P_0 , así como la corriente de vacío I_0 , sabiendo adicionalmente que $U_0 = U_{1n}$ o $U_0 = U_{2n}$, dependiendo del arrollamiento alimentado. La potencia P_0 vendrá dada por la suma de las lecturas de los dos vatímetros montados según se indica en la figura 2 (la justificación de ello está explicado en el anexo A1, cuya lectura y comprensión es de carácter obligatorio).

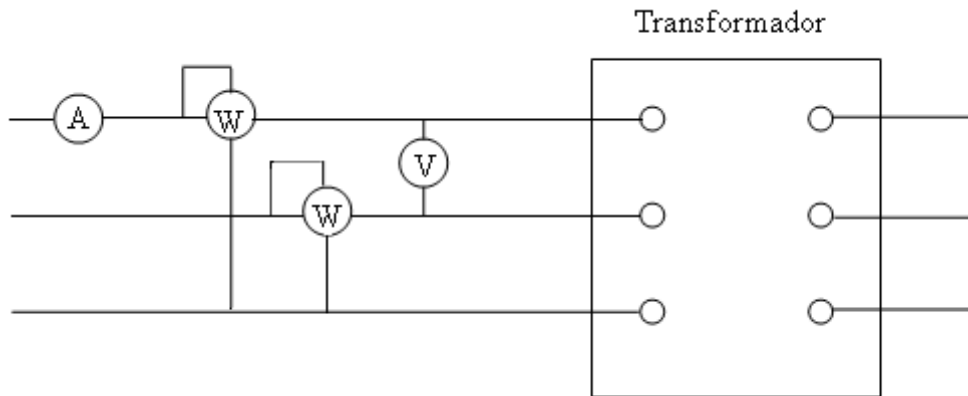


Figura 2: Esquema para el ensayo de vacío

Dado que la corriente de vacío es muy inferior a la corriente asignada ($I_0 \ll I_n$; en transformadores de potencia reales la corriente de vacío suele ser del orden del 0,1-0,5% de la corriente asignada), las pérdidas Joule en el arrollamiento energizado se pueden considerar despreciables y por tanto la potencia del ensayo P_0 , se puede considerar igual a las pérdidas en el hierro P_{Fe} .

$$P_{Fe} = P_0 = \sqrt{3} \cdot U_{0L} \cdot I_0 \cdot \cos \varphi_0 \tag{2}$$

$$\cos \varphi_0 = P_0 / (\sqrt{3} \cdot U_{0L} \cdot I_0) \tag{2 bis}$$

Por otra parte, al considerarse también despreciable la caída de tensión en el arrollamiento alimentado, la tensión aplicada coincide con la f.e.m. que crea el flujo común.

De todo ello, se deduce que:

$$I_{Fe} = I_0 \cdot \cos \varphi_0 \quad (3)$$

$$R_{Fe} = U_{0\text{fn}} / I_{Fe} = (U_{0L} / \sqrt{3}) / I_{Fe} = (U_{0L} / \sqrt{3}) / (I_0 \cdot \cos \varphi_0) = U_{0L}^2 / P_{Fe} \quad (4)$$

$$I_{\mu} = I_0 \cdot \sin \varphi_0 \quad (5)$$

$$X_{\mu} = U_{0\text{fn}} / I_{\mu} = U_{0L} / (\sqrt{3} \cdot I_0 \cdot \sin \varphi_0) \quad (6)$$

2.3. El ensayo de cortocircuito y los parámetros de la rama serie del circuito equivalente de un transformador trifásico

El ensayo de cortocircuito consiste en aplicar a uno de los arrollamientos del transformador una tensión creciente, manteniendo el otro arrollamiento en cortocircuito, hasta alcanzar la corriente asignada de plena carga de los arrollamientos.

Nota: Como se ha visto en las clases de teoría de Circuitos Magnéticos y Transformadores, el comportamiento lineal de las impedancias de la rama serie permitiría realizar el ensayo a corrientes menores a la asignada y extrapolar los resultados a la corriente asignada de plena carga (la norma UNE-EN 60076-1 limita al 50% de la corriente asignada, la corriente mínima a la que se puede realizar el ensayo).

En estas condiciones, se mide la potencia activa absorbida en el ensayo P_{cc} , así como la tensión que ha sido necesario aplicar U_{cc} , sabiendo adicionalmente que $I_{cc} = I_{1n} = I'_{2n}$.

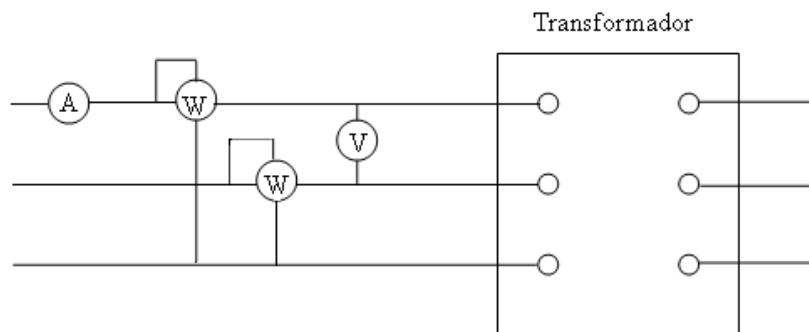


Figura 3: Esquema para el ensayo de cortocircuito

Como ya se indicó, la corriente de vacío es muy inferior a la corriente asignada ($I_0 \ll I_n$) y por tanto despreciable frente a ésta. Dado que además la tensión aplicada en el ensayo de cortocircuito U_{cc} será muy inferior a la tensión asignada, el flujo magnético en el núcleo será muy pequeño (recordar la expresión (10) de la práctica 1), siendo en consecuencia despreciables durante el ensayo las pérdidas en el hierro. Por tanto, la potencia absorbida en el ensayo de cortocircuito P_{cc} coincide con las pérdidas en el cobre o pérdidas debidas a la carga P_{carga} .

En una primera aproximación, se podrían deducir los parámetros de la rama serie del circuito equivalente como:

$$P_{cc} = \sqrt{3} \cdot U_{ccL} \cdot I_{cc} \cdot \cos \varphi_{cc} \quad (7)$$

$$\cos \varphi_{cc} = P_{cc} / (\sqrt{3} \cdot U_{ccL} \cdot I_{cc}) \quad (8)$$

$$U_{Rcc} = U_{cc} \cdot \cos \varphi_{cc} \quad (9)$$

$$R_{cc} = R_1 + R'_2 = U_{Rcc \text{ fn}} / I_{cc} = (U_{cc \text{ fn}} \cdot \cos \varphi_{cc}) / I_{cc} = (U_{ccL} \cdot \cos \varphi_{cc}) / (\sqrt{3} \cdot I_{cc}) = P_{cc} / (3 \cdot I_{cc}^2) \quad (10)$$

$$U_{Xcc} = U_{cc} \cdot \sin \varphi_{cc} \quad (11)$$

$$X_{cc} = X_{\sigma 1} + X'_{\sigma 2} = U_{Xcc \text{ fn}} / I_{cc} = (U_{ccL} \cdot \sin \varphi_{cc}) / (\sqrt{3} \cdot I_{cc}) \quad (12)$$

No obstante, una aproximación más rigurosa para la obtención de las resistencias de la rama serie del circuito equivalente requiere tomar en consideración algunos aspectos indicados en la norma UNE-EN 60076-1:

- Las pérdidas debidas a la carga realmente son debidas a dos tipos de pérdidas. Por un lado, están las pérdidas por efecto Joule en los arrollamientos (pérdidas óhmicas) y, por otro lado, están las pérdidas adicionales debidas a la circulación de corrientes de Foucault por los arrollamientos:

$$P_{cc} = P_{\text{Joule}} + P_{\text{adicionales}} \quad (13)$$

Estas corrientes de Foucault en los conductores no deben confundirse con las corrientes de Foucault en el núcleo y son creadas por los flujos de dispersión. Como se muestra en el Anexo A2, estas pérdidas dependen del cuadrado de la corriente que circula por los arrollamientos y de la inversa de la resistencia.

- Por otro lado, la normativa (UNE-EN 60076-1) obliga al fabricante a entregar al cliente las pérdidas debidas a la carga a la temperatura de referencia del transformador, que, en el caso de transformadores sumergidos en aceite, es de 75 °C. Por ello, los resultados del ensayo de cortocircuito deben extrapolarse a dicha temperatura de referencia de 75 °C.

La variación de la resistencia de un conductor de cobre con la temperatura viene dada por la expresión:

$$R_2 = R_1 \cdot (235 + \Theta_2) / (235 + \Theta_1) \quad (14)$$

Sin embargo, el problema es que mientras las pérdidas por efecto Joule dependen directamente de la resistencia, las pérdidas adicionales dependen inversamente de la resistencia. Por eso, para obtener las pérdidas debidas a la carga a 75 °C se debe referenciar a 75 °C cada una de las pérdidas por separado y luego sumarlas. Evidentemente, para poder hacer eso, es preciso tener antes el valor de las pérdidas Joule y adicionales en frío.

El ensayo en cortocircuito proporciona la suma de las pérdidas Joule y adicionales a la temperatura a la que se realizó el ensayo. Para separar dichas pérdidas, es preciso hacer una medida, previa al ensayo de cortocircuito, de la resistencia óhmica de los arrollamientos.

Una vez que se dispone de la resistencia de los arrollamientos, las pérdidas Joule a la temperatura del ensayo se calculan como:

$$P_{\text{Joule}} = 3 \cdot R_1 \cdot I_{1n}^2 + 3 \cdot R_2 \cdot I_{2n}^2 = 3 \cdot (R_1 + R'_2) \cdot I_{1n}^2 \quad (15)$$

Las pérdidas adicionales en el ensayo se calcularán a partir de la expresión (13) como:

$$P_{\text{adicionales}} = P_{\text{cc}} - P_{\text{Joule}} \quad (16)$$

Una vez separadas las pérdidas se obtendrán las pérdidas Joule a la temperatura de referencia a partir de la expresión (14):

$$P_{\text{Joule } \Theta_2} = P_{\text{Joule } \Theta_1} \cdot (235 + \Theta_2) / (235 + \Theta_1) \quad (17)$$

o lo que sería equivalente, se multiplicará el valor de pérdidas por el coeficiente de corrección correspondiente:

$$P_{\text{Joule } (75^\circ\text{C})} = P_{\text{Joule } \Theta_{\text{ensayo}}} \cdot 310 / (235 + \Theta_{\text{ensayo}}) \quad (17\text{bis})$$

Dado que las pérdidas adicionales dependen inversamente de la resistencia de los arrollamientos, la forma de corregirlas a la temperatura de referencia será:

$$P_{\text{adicionales } \Theta_2} = P_{\text{adicionales } \Theta_1} \cdot (235 + \Theta_1) / (235 + \Theta_2) \quad (18)$$

$$P_{\text{adicionales } (75^\circ\text{C})} = P_{\text{adicionales } \Theta_{\text{ensayo}}} \cdot (235 + \Theta_{\text{ensayo}}) / 310 \quad (18\text{bis})$$

Una vez corregidos los dos sumandos a la temperatura de referencia, las pérdidas debidas a la carga a la temperatura de referencia se obtienen como:

$$P_{\text{cc } (75^\circ\text{C})} = P_{\text{Joule } (75^\circ\text{C})} + P_{\text{adicionales } (75^\circ\text{C})} \quad (19)$$

A partir de este valor de las pérdidas debidas a la carga, se podría deducir la resistencia que debe figurar en la rama serie del circuito equivalente del transformador a la temperatura de referencia como:

$$R_{\text{cc } (75^\circ\text{C})} = P_{\text{cc } (75^\circ\text{C})} / (3 \cdot I_{\text{cc}}^2) \quad (20)$$

Por su parte, la reactancia serie del circuito equivalente del transformador X_{cc} no tiene una variación significativa con la temperatura por lo que el valor obtenido en (12) se puede considerar perfectamente válido.

En la práctica, especialmente en transformadores de potencia, la impedancia serie del circuito equivalente Z_{cc} viene determinada fundamentalmente por la componente reactiva ($X_{\text{cc}} \gg R_{\text{cc}}$), por lo que los cálculos de corrección a la temperatura de referencia se utilizan fundamentalmente para obtener el valor de pérdidas totales en carga.

Por último, para la separación de los valores de las resistencias y reactivas serie entre los arrollamientos primario y secundario, se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- ✓ Las resistencias óhmicas de cada arrollamiento se obtendrían a partir de las medidas de resistencia teniendo en cuenta las correspondientes correcciones a la temperatura de referencia.
- ✓ Las resistencias debidas a las pérdidas adicionales no se pueden desagregar entre los arrollamientos y, como aproximación, se asignarían por partes iguales a ambos ($R_{1\text{-adic}} = R_{2\text{-adic}} = R_{\text{cc-adic}} / 2$).
- ✓ Las reactivas de dispersión no se pueden desagregar entre los arrollamientos y, como aproximación, se asignarían por partes iguales a ambos ($X_{\sigma 1\text{-adic}} = X_{\sigma 2\text{-adic}} = X_{\text{cc}} / 2$).

3. DESARROLLO DE LA PRÁCTICA

En la práctica se van a calcular los parámetros del circuito equivalente fase-neutro de un transformador trifásico, cuyos valores nominales o asignados son los siguientes:

$$U_{\text{fase primaria nominal}} = U_{f1n} = 220 \text{ V}$$

$$U_{\text{fase secundaria nominal}} = U_{f2n} = 127 \text{ V}$$

$$I_{\text{fase secundaria nominal}} = I_{f2n} = 3 \text{ A}$$

A lo largo de la práctica, el alumno deberá tener en cuenta las expresiones de transformación entre magnitudes de fase y magnitudes de línea, así como el hecho de que **la relación de transformación de un transformador trifásico es el cociente entre la tensión primaria nominal de línea y la tensión secundaria de línea en vacío**.

De forma previa al comienzo de los ensayos, se realizará un conexionado del transformador trifásico de forma que éste tenga una **configuración estrella-triángulo**, tal y como se indica en la figura 4.

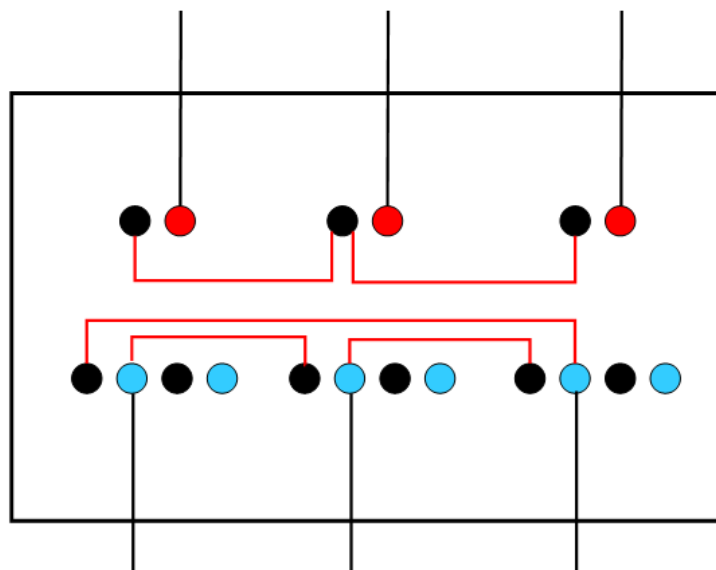


Figura 4: Conexionado del transformador trifásico

3.1. Medida de la resistencia de los arrollamientos primario y secundario

La medida de la resistencia de los arrollamientos se realiza en primer lugar dado que, como consecuencia de la dependencia del valor de la resistencia con la temperatura, de esta forma se puede considerar que la temperatura de los arrollamientos es la temperatura ambiente del laboratorio. La realización de ensayos previos provocaría un calentamiento en los arrollamientos que dificultaría la asignación de una temperatura en los mismos durante el ensayo.

Anota la temperatura del laboratorio, a partir de la medida del termómetro fijado a la pared:

Temperatura Laboratorio	°C
-------------------------	----

Para obtener la resistencia de los arrollamientos, se debe realizar un ensayo en corriente continua (ya que en estas circunstancias la inductancia de las bobinas se comporta como un cortocircuito, y además en corriente continua no se tienen pérdidas en el hierro).

Para ello se alimentarán los arrollamientos con la tensión rectificada de la fuente de alimentación trifásica (por medio de un puente rectificador de diodos con un condensador de alisado) y se medirá la tensión e intensidad según el esquema de las figuras 5ª y 5b:

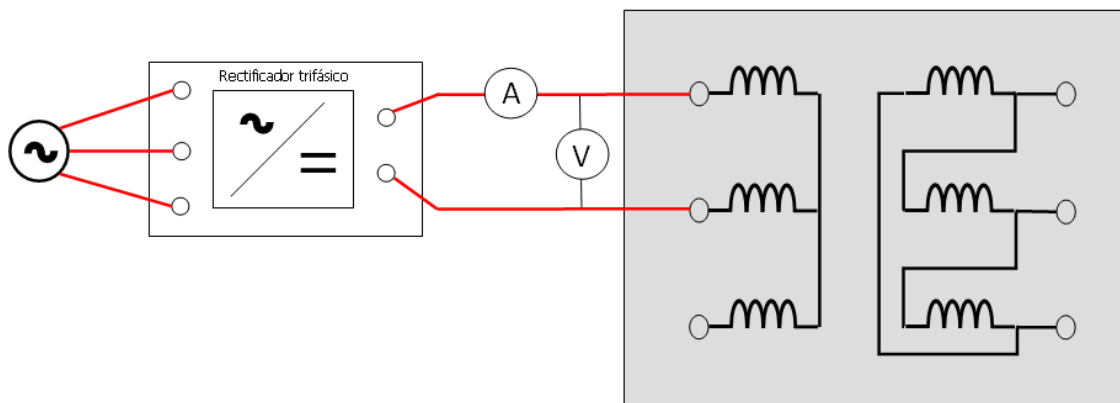


Figura 5a: Circuito para la medida de la resistencia del arrollamiento primario

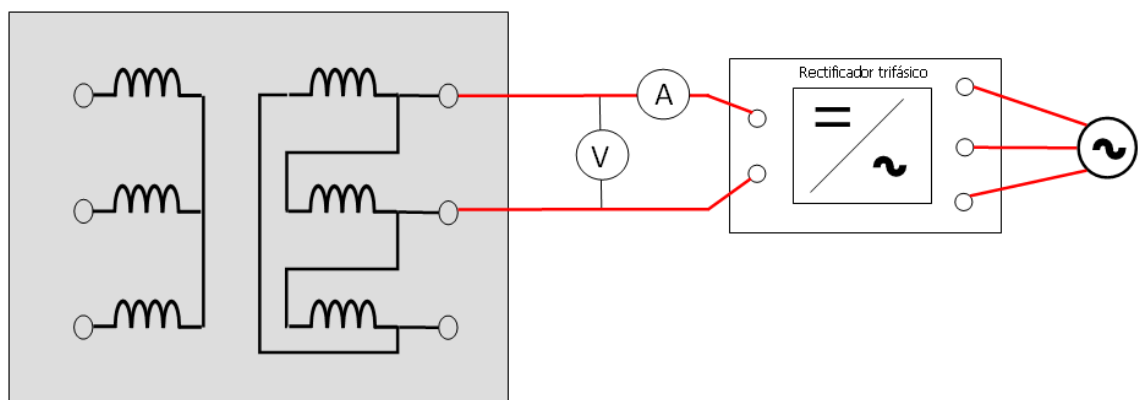


Figura 5b: Circuito para la medida de la resistencia del arrollamiento secundario

En el caso de arrollamientos conectados en triángulo y conectados en estrella sin neutro accesible, la medida de la resistencia de los mismos se ha de realizar con una tensión continua entre dos fases.

En el caso de arrollamientos conectados en estrella con neutro accesible, la medida de la resistencia de los mismos se puede realizar con una alimentación fase-neutro o con una alimentación fase-fase. Por la mayor precisión que supone y por homogeneidad con el arrollamiento conectado en triángulo, se realizarán todas las medidas mediante una alimentación entre fases.

La práctica habitual en los laboratorios de las fábricas de transformadores es realizar, tanto para la medida de las resistencias primarias como para las resistencias secundarias, tres ensayos para cada par de fases primarias o secundarias (por ejemplo, para el primario serían: U-V, V-W y U-W) obteniendo el valor medio de las tres. En nuestro caso, se realizará un único ensayo para mayor rapidez en la ejecución del mismo.

Para poder obtener el valor de las resistencias por fase primarias y secundarias, es preciso identificar las expresiones que relacionan las tensiones e intensidades medidas con las resistencias por fase, tanto para el ensayo por el lado primario ($U_1, I_1, R_{1 \text{ por fase}}$) como para el ensayo por el lado secundario ($U_2, I_2, R_{2 \text{ por fase}}$). Esto equivale realmente a identificar la resistencia equivalente vista entre los terminales de la fuente de corriente continua (U/I) en términos de la resistencia por fase.

Ensayo	Relación U, I, R por fase
Lado primario	
Lado secundario	

En la tabla siguiente se indicarán los valores de las medidas obtenidas en los circuitos de la figura 5a y 5b, así como el cálculo efectuado para la resistencia por fase a partir de dichas medidas y las expresiones de la tabla anterior.

Ensayo	Tensión medida (V)	Intensidad medida (A)	Resistencia por fase (Ω)
Lado primario			
Lado secundario			

NOTA IMPORTANTE: En la realización de los ensayos hay que tener en cuenta que, por el bajo valor de las resistencias a medir, la tensión a aplicar para no sobrepasar la intensidad admisible por los arrollamientos (3 A) es muy baja, por lo que se conectará la fuente de alimentación con la tensión al mínimo, cuidando de no sobrepasar la intensidad admisible. Dado que el comportamiento de la resistencia es lineal, cualquier par de valores de intensidad y tensión serán adecuados.

Una vez obtenidos los valores de las resistencias de cada fase primaria y secundaria, se calcularán los valores de las resistencias primaria y secundaria del circuito equivalente monofásico fase-neutro.

Para ello hay que tener en cuenta el grupo de conexión del transformador trifásico de la práctica. A partir de la forma de conexión, la relación de transformación y la expresión (1), obtener la suma de las resistencias referidas al primario ($R_1 + R'_2$). Utilizando la expresión (14) referir los valores obtenidos mediante los ensayos a valores a la temperatura normativa de referencia:

Temperatura	Resistencia óhmica primaria fase-neutro: R_1 (Ω)	Resistencia óhmica secundaria fase-neutro: R_2 (Ω)	Resistencia óhmica total fase-neutro: $R_1 + R'_2$ (Ω)
Θ_{ensayo}			
75 °C			

3.2. Ensayo de vacío

Tal y como se expuso en el apartado 2.2, la realización del ensayo de vacío requiere aplicar la tensión asignada a uno de los arrollamientos dejando el otro arrollamiento en circuito abierto.

En nuestro caso, se aplicará la tensión nominal en el arrollamiento secundario dejando el arrollamiento primario a circuito abierto, realizando el circuito de medida indicado en la figura 6:

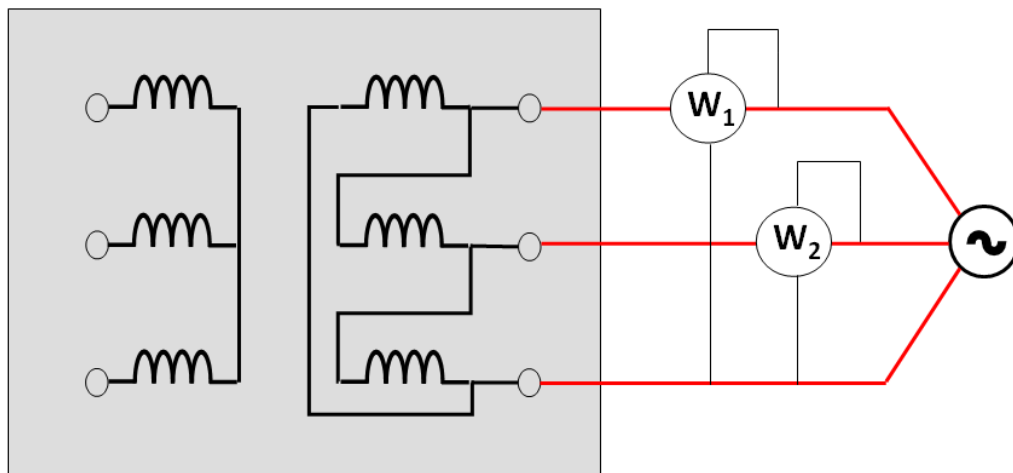


Figura 6: Circuito de medida para el ensayo de vacío

La medida de la potencia activa absorbida por el transformador durante el ensayo de vacío se hará mediante el método de los dos vatímetros, y por tanto, vendrá dada por la expresión:

$$P_0 = W_1 + W_2 \tag{21}$$

Por la asimetría de los circuitos magnéticos entre las columnas extremas y la columna central, la corriente de vacío absorbida por la fase central es ligeramente inferior. Como una aproximación aceptable, se considerará que la corriente de vacío es la media de las tres corrientes de fase, viniendo dada por la expresión:

$$I_0 = (2 \cdot I_1 + I_2) / 3 \tag{22}$$

U_1 (V)	U_2 (V)	I_1 (A)	I_2 (A)	W_1 (W)	W_2 (W)	I_0 (A)	P_0 (W)

A partir de los valores medidos y de las expresiones (1)-(6) de la introducción teórica, calcular los siguientes parámetros del circuito equivalente:

$\cos \varphi_0$	R_{Fe} (Ω)	X_μ (Ω)

Nota: Tener en cuenta que el arrollamiento alimentado es el secundario y tiene una conexión triángulo y se desean obtener los parámetros del circuito monofásico equivalente fase-neutro referido al lado primario.

3.3. Ensayo de cortocircuito

Tal y como se expuso en el apartado 2.3, la realización del ensayo de cortocircuito requiere aplicar una tensión creciente a uno de los arrollamientos dejando el otro arrollamiento en cortocircuito hasta conseguir que circule por el transformador su corriente asignada o nominal.

En nuestro caso, se aplicará la tensión en el arrollamiento primario dejando el arrollamiento secundario en cortocircuito, realizando el circuito de medida indicado en la figura 7:

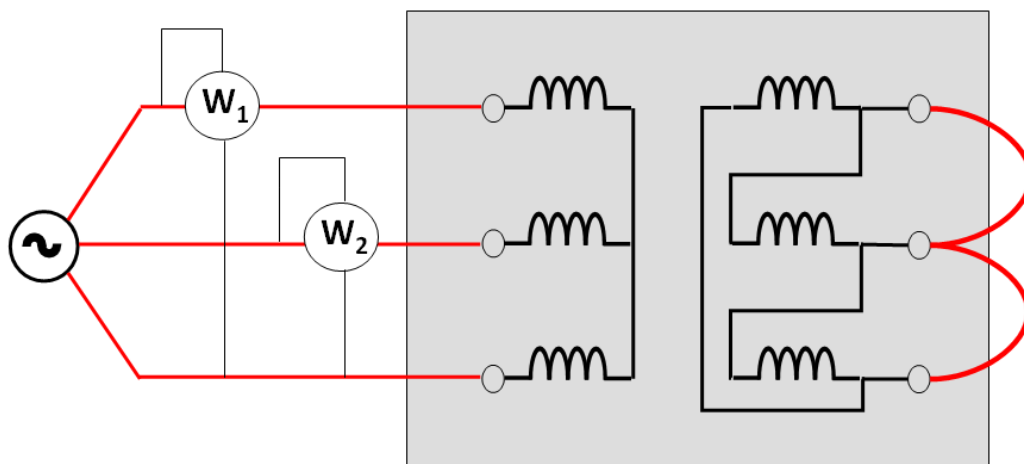


Figura 7: Circuito de medida para el ensayo de cortocircuito

Teniendo en cuenta que la intensidad máxima admisible por fase en el transformador trifásico objeto de la práctica es de 3 A tanto en los arrollamientos primarios como secundarios, el primer cálculo importante a realizar es la intensidad que se debe conseguir visualizar en los amperímetros del circuito de medida para considerar que se ha alcanzado la intensidad asignada del transformador.

De cara a realizar este cálculo es importante tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- ✓ Al ser la intensidad máxima admisible igual tanto en el lado primario como en el lado secundario, la intensidad asignada vendrá determinada por el lado en el que antes se alcance dicho valor.
- ✓ Al ser el lado secundario el de menor tensión, tendrá una mayor corriente y será por tanto en el que se fije la intensidad asignada.
- ✓ Utilizando la relación de transformación, se calculará la intensidad asignada primaria a partir de la intensidad asignada secundaria (se despreciará el efecto de la corriente de vacío).
- ✓ Se tendrá en cuenta, en caso de ser necesario, el grupo de conexión del arrollamiento en el que se mide la intensidad convirtiendo el valor de intensidad asignada por fase en intensidad asignada de línea.

A partir de las consideraciones anteriores, **antes de realizar el ensayo de cortocircuito**, hay que calcular la intensidad que se debe alcanzar en los amperímetros de la figura 7 para conseguir la intensidad asignada requerida en el ensayo de cortocircuito (corriente primaria nominal de línea), sabiendo que la corriente secundaria nominal de fase es 3 A:

$I_{cc} = I_{1nL} \text{ (A)}$	
Expresión analítica	
Valor numérico	

La medida de la potencia activa absorbida por el transformador durante el ensayo de cortocircuito, al igual que en el ensayo de vacío, se hará mediante el método de los dos vatímetros, y por tanto, vendrá dada por la expresión:

$$P_{cc} = W_1 + W_2 \tag{24}$$

Asimismo, se considerará que la tensión de cortocircuito es la media de las tensiones medidas, viniendo dada por la expresión:

$$U_{cc} = (U_1 + U_2) / 2 \tag{25}$$

En cuanto a la corriente de cortocircuito, se tratará de conseguir que la corriente asignada sea la media de las corrientes de fase medidas, viniendo dada por la expresión:

$$I_{cc} = I_{1nL} = (I_1 + I_2) / 2 \tag{26}$$

U_1 (V)	U_2 (V)	I_1 (A)	I_2 (A)	W_1 (W)	W_2 (W)	U_{cc} (V)	P_{cc} (W)

A partir de los valores medidos y de las expresiones (7)-(12) de la introducción teórica, calcular los siguientes parámetros del circuito equivalente:

$\cos \varphi_{cc}$	R_{cc} (Ω)	X_{cc} (Ω)

Por último, se realizará el desglose de las pérdidas óhmicas y pérdidas adicionales así como su corrección a la temperatura de referencia, tal y como se estableció en las expresiones (13) a (20) del apartado 2.3 de la introducción teórica.

A partir de los valores obtenidos en el apartado 3.1, las pérdidas óhmicas tendrán el siguiente valor:

Temperatura	$R_1 \cdot I_{1nL}^2$ (W)	$R_2 \cdot I_{2nL}^2$ (W)	$(R_1 + R'_2) \cdot I_{1nL}^2$ (W)
$^{\circ}C$ (θ_{ensayo})			
75 $^{\circ}C$			

Teniendo en cuenta las expresiones (16) y (18), el valor de P_{cc} obtenido en el ensayo de cortocircuito, y los valores de la tabla anterior, las pérdidas adicionales serán:

$P_{adicionales}$ (θ_{ensayo}) (W)	$P_{adicionales}$ (75 $^{\circ}C$) (W)

Para finalizar, teniendo en cuenta las expresiones (19) y (20), calcular los valores de las pérdidas debidas a la carga y la resistencia de cortocircuito llevadas a la temperatura de referencia:

P_{carga} (75 $^{\circ}C$) (W)	R_{cc} (75 $^{\circ}C$) (Ω)

4. TIEMPOS PREVISTOS PARA LA PRÁCTICA

A continuación se indican las duraciones previstas para cada una de las partes de la práctica:

Concepto	Duración prevista
Explicaciones iniciales del profesor	10 minutos
Conexionado transformador	5 minutos
Medida de resistencia de arrollamientos	20 minutos
Ensayo de vacío	20 minutos
Ensayo de cortocircuito	20 minutos

5. EVALUACIÓN DE LA PRÁCTICA

La evaluación de la práctica será realizada de acuerdo a los criterios indicados en el apartado 4.1 del documento "Aspectos generales de las prácticas de Circuitos Magnéticos y Transformadores", otorgando el siguiente peso a cada una de las partes:

Concepto	Peso en la evaluación
Examen laboratorio	30 %
Informe de la práctica	40 %
Examen teórico	30 %

En el informe de la práctica (que deberá ser entregado en el plazo de una semana a partir de la realización de la misma) el alumno, a partir de las medidas tomadas en el laboratorio, completará los cálculos y análisis indicados en el guión de la práctica, mostrando finalmente el circuito equivalente del transformador con los parámetros calculados a partir de los ensayos realizados.

Adicionalmente, en aquellos casos en los que el alumno lo considere oportuno (ya sea porque le haya llamado la atención, porque las medidas parezcan erróneas, etc.), se podrán incluir en el informe de la práctica observaciones sobre las medidas o los cálculos efectuados.

ANEXOS

A.1 Medida de la potencia activa consumida por un sistema trifásico

Medida de la potencia activa en un circuito monofásico

La medida de la potencia activa en un circuito monofásico se realiza con un vatímetro monofásico. Un vatímetro tiene una bobina amperimétrica (A*-A) y una bobina voltimétrica (V*-V). Estas bobinas tienen un principio de bobina (A* y V*) y un final de bobina (A y V).

Si se conectan mediante un conductor los principios de bobina amperimétrica y voltimétrica, el vatímetro proporciona la potencia consumida por el circuito que está aguas abajo del vatímetro. En muchos casos no es importante que se conecte el vatímetro llevando el cable que proviene de la fuente al principio de la bobina amperimétrica y el final de la bobina amperimétrica a la carga o al revés, pues el carácter de la carga (consumidor o generador) es conocido de antemano. Sin embargo, en aquellas cargas cuyo carácter no es conocido de antemano o en las que parte del día se comportan como generadores y otra parte como consumidores, ser conscientes del sentido del flujo de energía es fundamental.

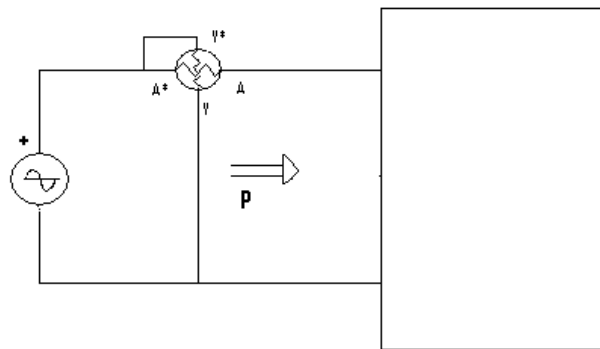


Figura A1: Medida de la potencia activa en un circuito monofásico

Medida de la potencia activa en un circuito trifásico a cuatro hilos

Si la carga está conectada en estrella y se ha llevado un conductor de neutro entre la fuente y la carga, la medida de la potencia activa se realiza mediante tres vatímetros monofásicos.

Cada vatímetro medirá la corriente de una fase y la tensión entre esa fase y el neutro. Si se tiene la certeza de que el sistema trifásico es perfectamente equilibrado (tanto la fuente como la carga) bastaría con un solo vatímetro, cuyo valor se multiplicaría por 3.

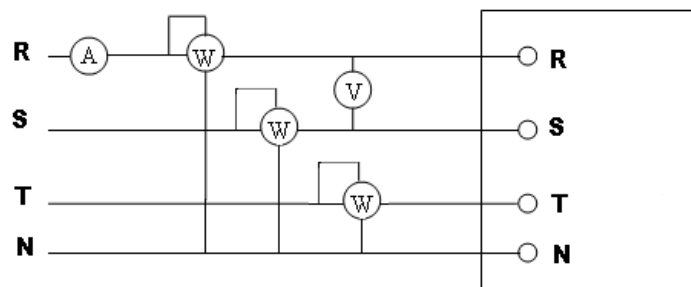


Figura A2: Medida de potencia en circuitos a cuatro hilos

Medida de la potencia activa en un circuito trifásico a tres hilos

Si la carga está conectada en triángulo o en estrella sin disponer de conductor de neutro, la medida de la potencia activa se realiza mediante dos vatímetros conectados como se muestra en la figura A3.

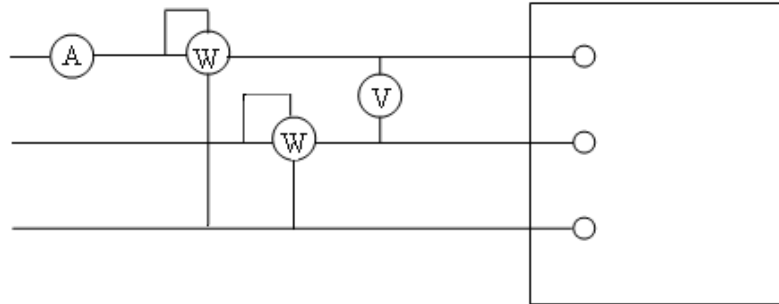


Figura A3: Medida de potencia en circuitos trifásicos sin hilo de neutro

A continuación se va a justificar la posibilidad de medir la potencia activa de un sistema trifásico a tres hilos con dos vatímetros.

La potencia trifásica viene dada por la expresión:

$$P_{tot} = P_R + P_S + P_T = \frac{1}{T} \int u_{RN} i_R dt + \frac{1}{T} \int u_{SN} i_S dt + \frac{1}{T} \int u_{TN} i_T dt$$

En un sistema a tres hilos se cumple:

$$i_T = -i_R - i_S$$

por lo que sustituyendo en la expresión de la potencia trifásica se tiene:

$$P_{tot} = \frac{1}{T} \left[\int u_{RN} i_R dt + \int u_{SN} i_S dt - \int u_{TN} (i_R + i_S) dt \right] = \frac{1}{T} \left[\int (u_{RN} - u_{TN}) i_R dt + \int (u_{SN} - u_{TN}) i_S dt \right]$$

$$P_{tot} = \frac{1}{T} \int u_{RT} i_R dt + \frac{1}{T} \int u_{ST} i_S dt = P_1 + P_2$$

El método de los dos vatímetros (o método Aron) es aplicable tanto a sistemas equilibrados como a sistemas desequilibrados, con la única condición de que sean sistemas a tres hilos.

Para el caso particular de sistemas equilibrados, la lectura de los vatímetros de la figura A3 es:

$$P_1 = U_{RT} I_R \cos \sphericalangle I_R U_{RT} \sphericalangle$$

$$P_2 = U_{ST} I_S \cos \sphericalangle I_S U_{ST} \sphericalangle$$

Como se muestra en la figura A4, el ángulo formado entre la tensión U_{RT} y la corriente I_R es $30 - \varphi$, mientras que el ángulo formado entre la tensión U_{ST} y la corriente I_S es $30 + \varphi$, por lo que las potencias de los vatímetros serán:

$$P_1 = U_L I_L \cos(30 - \varphi)$$

$$P_2 = U_L I_L \cos(30 + \varphi)$$

Para el caso de cargas muy inductivas, el ángulo φ puede superar 60° , y el vatímetro número 2 daría una indicación negativa.

Para el caso de cargas muy capacitivas el ángulo φ puede superar -60° , y el vatímetro número 1 daría una indicación negativa.

Como se demostró anteriormente, la potencia es la suma de las lecturas de los dos vatímetros, pero esta suma es una suma algebraica, donde una de las cantidades puede ser negativa, en cuyo caso, en realidad es la resta de los valores absolutos.

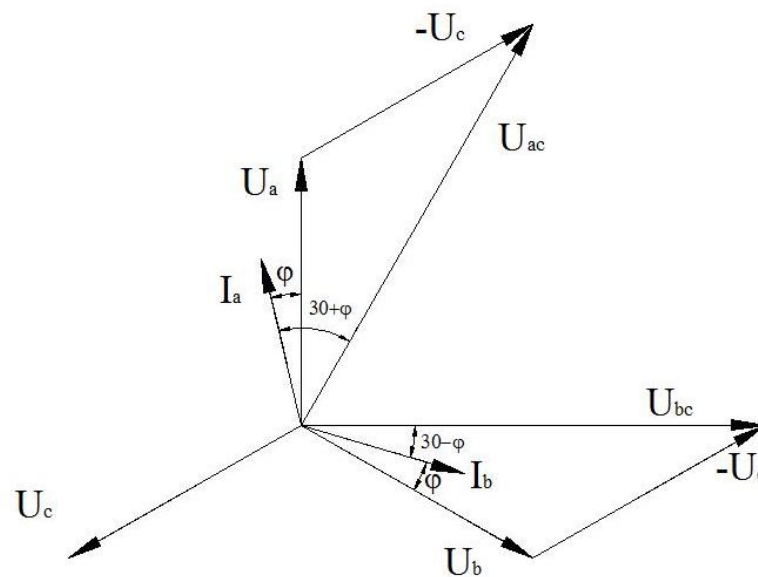


Figura A4: Diagrama fasorial en la medida de potencia por el método de los dos vatímetros de un sistema trifásico equilibrado a tres hilos

A.2 Pérdidas por corrientes de Foucault en los conductores

En un transformador existe un flujo común y un flujo disperso. El flujo común es creado por la suma de los amperios-vuelta primarios y secundarios. Por el contrario, el flujo disperso es creado tan sólo por aquel arrollamiento al que concatena y por tanto la cuantía del flujo disperso es proporcional a la corriente de tal arrollamiento.

$$\phi_d = kI_1$$

El flujo común está confinado en el núcleo magnético, mientras que el flujo disperso discurre en parte de su camino por el aire (la ventana del transformador). En la ventana del transformador están alojados los conductores. La sección recta de los conductores no es nula. Por ello, cuando estos conductores son atravesados por el flujo disperso se engendra en ellos una fuerza electromotriz. Esta fuerza electromotriz es proporcional al flujo disperso

$$E_{Foucault} = k' \phi_d$$

Estas fuerzas electromotrices dan lugar a corrientes que circulan en circuito cerrado dentro del conductor. Estas corrientes son llamadas corrientes de Foucault en los conductores o corrientes Eddy (esto es, corrientes de remolino, ya que son corrientes cerradas que circulan por toda la masa del cobre). La magnitud de las corrientes de Foucault depende de las fuerzas electromotrices inducidas y de la resistencia del arrollamiento

$$I_{Foucault} = \frac{E_{Foucault}}{R}$$

Por tanto, las pérdidas provocadas por estas corrientes de Foucault son

$$P_{Foucault} = \frac{E_{Foucault}^2}{R_1} = K'' \frac{I_1^2}{R_1}$$

Al igual que las pérdidas por efecto Joule en los conductores, las pérdidas por corrientes de Foucault dependen del cuadrado de la corriente de carga. Por eso, para tenerlas en cuenta se incrementa la resistencia de cortocircuito del circuito equivalente de forma que

$$R_{cc} = R_1 + R_2 \left(\frac{U_{1nL}}{U_{2nL}} \right)^2 + R_{adicional}$$

HOJA DE RESULTADOS - PRÁCTICA 3

FECHA:

PUESTO:

MEDIDA DE LA RESISTENCIA DE LOS ARROLLAMIENTOS

Ensayo	Tensión medida (V)	Intensidad medida (A)
Lado primario		
Lado secundario		

ENSAYO DE VACÍO:

U_1 (V)	U_2 (V)	I_1 (A)	I_2 (A)	W_1 (W)	W_2 (W)	I_0 (A)	P_0 (W)

ENSAYO DE CORTOCIRCUITO:

U_1 (V)	U_2 (V)	I_1 (A)	I_2 (A)	W_1 (W)	W_2 (W)	U_{cc} (V)	P_{cc} (W)