



UNIVERSIDAD DE CANTABRIA
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA
ELÉCTRICA Y ENERGÉTICA**



**DOCUMENTACIÓN DE LA PRÁCTICA
DE LABORATORIO:
TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS**

Miguel Angel Rodríguez Pozueta

José Carlos Lavandero González

© 2016, Miguel Angel Rodríguez Pozueta y José Carlos Lavandero González
Universidad de Cantabria (España)
Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética

This work is licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International License. To view a copy of this license, visit <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/> or send a letter to Creative Commons, PO Box 1866, Mountain View, CA 94042, USA.



Está permitida la reproducción total o parcial de este documento bajo la licencia Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Unported que incluye, entre otras, la condición inexcusable de citar su autoría (Miguel Angel Rodríguez Pozueta - Universidad de Cantabria) y su carácter gratuito.

Puede encontrar más documentación gratuita en la página web del autor:
<http://personales.unican.es/rodrigma/primer/publicaciones.htm>

PRÁCTICA DE LABORATORIO: TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS

Miguel Angel Rodríguez Pozueta

José Carlos Lavandero González

1. INTRODUCCIÓN

Los ensayos de vacío y cortocircuito de un transformador permiten determinar los parámetros más importantes que definen su comportamiento. A través de las mediciones efectuadas en los citados ensayos, y mediante el cálculo adecuado, se pueden determinar los parámetros del circuito equivalente simplificado del transformador (Fig. 1).

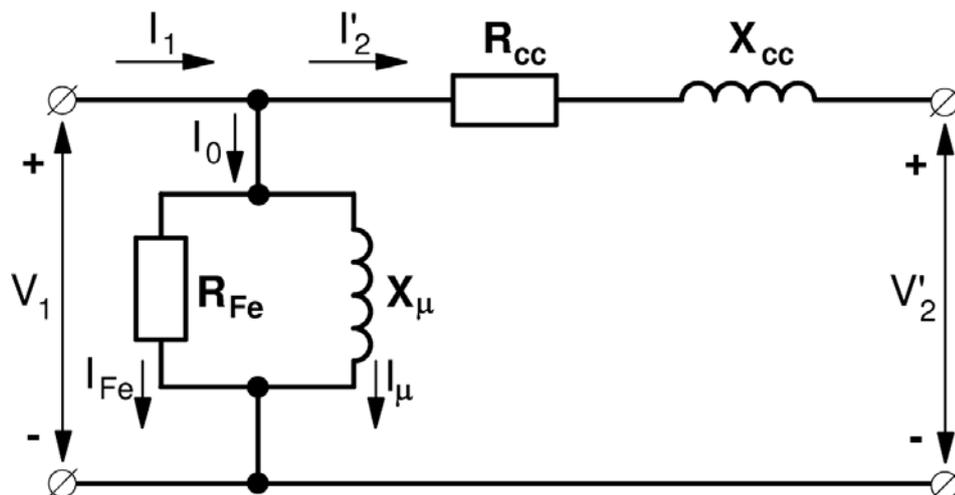


Fig. 1: Circuito equivalente aproximado de un transformador

Del ensayo de vacío se obtiene, además de la corriente de vacío I_0 , la relación de transformación m y las pérdidas en el hierro del transformador P_{Fe} . Estas pérdidas son fijas; es decir, independientes del índice de carga del transformador.

Del ensayo de cortocircuito se deduce la tensión relativa de cortocircuito ε_{cc} . Este parámetro influye sobre las intensidades de cortocircuito permanente I_{1falta} e I_{2falta} , en la caída de tensión ε_c y en la asociación en paralelo de transformadores. Otra magnitud que se mide en este ensayo es la potencia de pérdidas en el cobre asignada P_{CuN} . Esta es la suma de las potencias perdidas por efecto Joule en ambos devanados, primario y secundario, cuando el transformador está en condiciones asignadas.

De ambos tipos de pérdidas, en el hierro y en el cobre, se deduce el índice de carga óptimo C_{opt} del transformador; es decir, la carga, definida como porcentaje sobre la potencia asignada del transformador, en la que este trabaja con rendimiento máximo.

2. MEDIDAS DE RESISTENCIAS DE AISLAMIENTO. MEGOHMETRO

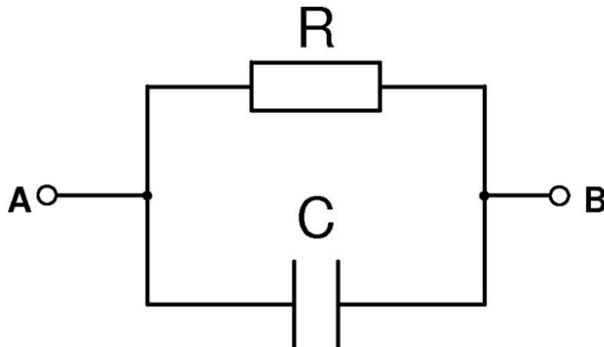


Fig. 2: Circuito equivalente de un aislante

Los materiales aislantes o dieléctricos presentan una resistencia elevada al paso de la corriente, pero esta resistencia no es infinita. Por otra parte, dos conductores separados por un dieléctrico constituyen un condensador. Por todo ello, dos conductores, A y B, separados por un material aislante equivalen al circuito de la Fig. 2, donde R es la resistencia de aislamiento y C es la capacidad del conjunto. Los valores de R y de C no permanecen constantes, pues varían con la temperatura, con la humedad y con la frecuencia y la tensión a la que está sometido el dieléctrico. Además, los materiales aislantes presentan un proceso de envejecimiento que origina una degradación de sus propiedades dieléctricas con el transcurso del tiempo.

Para medir la resistencia de aislamiento entre dos conductores separados por un aislante se utiliza un *megóhmetro*. Este aparato posee una fuente de tensión continua (en algunos modelos es una dinamo incorporada al aparato y accionada a mano mediante una manivela) que produce una tensión como mínimo de 500 V. Dicha tensión se aplica entre los dos conductores que están aislados por el dieléctrico cuya resistencia de aislamiento R se quiere medir. Al aplicar la tensión se produce el paso de una pequeña corriente I (del orden de los mA o de los μ A) a través del aislante de valor

$$I = \frac{V}{R}$$

El megóhmetro dispone de un amperímetro que mide la intensidad I, pero en su escala expresa directamente el valor de la resistencia de aislamiento R. En efecto, dado que la tensión V generada por la fuente de tensión permanece constante, la corriente y la resistencia son inversamente proporcionales y se puede graduar la escala para que indique la resistencia que corresponde a cada valor de la corriente.

En las máquinas eléctricas se comprueba la resistencia de aislamiento entre los elementos que van a estar sometidos a tensión eléctrica (los devanados) y entre ellos y la carcasa. Naturalmente, estas medidas se realizan con la máquina desconectada de la red.

Se suele exigir una resistencia mínima de un megohmio para las máquinas con tensiones asignadas de hasta 1000 V. Por otra parte, según la instrucción MI BT 017, las instalaciones de Baja Tensión (B.T.) deberán presentar una resistencia de aislamiento por lo menos igual a $1000 \times U$ ohmios, siendo U la tensión máxima de servicio, expresada en voltios; con un mínimo de 250 000 Ω .

La Fig. 2 muestra que, si entre los conductores A y B se establece una tensión continua, el condensador C queda cargado. Por ello, después de la medida es conveniente cortocircuitar los conductores A y B entre los que se había conectado el megóhmetro y descargar así las cargas eléctricas almacenadas en el aislante durante la medición.

3. INTENSIDAD DE VACÍO DE UN TRANSFORMADOR MONOFÁSICO

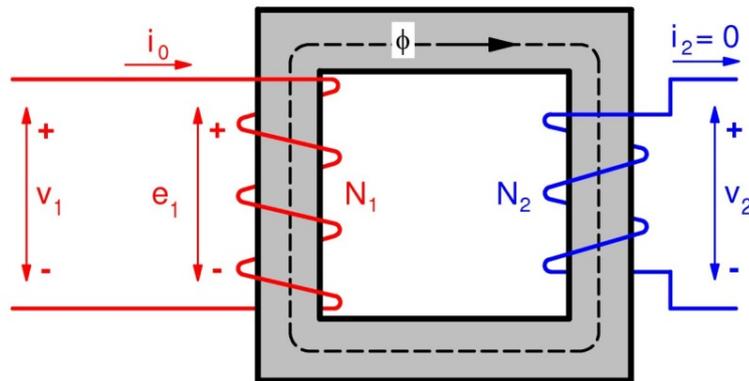


Fig. 3:
Transformador en vacío

En un transformador monofásico en vacío se verifican las siguientes relaciones (ver la Fig. 3):

$$\left. \begin{aligned} v_1 - e_1 &\approx 0 \\ e_1 &= N_1 \frac{d\phi}{dt} \end{aligned} \right\} v_1 = N_1 \frac{d\phi}{dt}$$

En la expresión anterior v_1 representa la tensión de la red a la que está conectado el transformador y ϕ es el flujo común que, en este caso, es generado únicamente por el devanado primario. En esta ecuación se han despreciado las caídas de tensión originadas por el flujo de dispersión y la resistencia del primario debido a su pequeño valor frente a la fuerza contraelectromotriz e_1 .

La tensión v_1 es sinusoidal y, por lo tanto, la relación anterior indica que el flujo ϕ también lo es (retrasado 90° respecto a v_1). En un transformador funcionando en vacío el flujo ϕ sólo es debido a la intensidad i_0 que circula por el primario. Ahora bien, la relación entre el flujo ϕ y la intensidad i_0 no es lineal (ver la Fig. 4), por lo que si el flujo ϕ es sinusoidal, la intensidad i_0 no lo es. La forma de la intensidad de vacío de un transformador monofásico está representada en la Fig. 5.

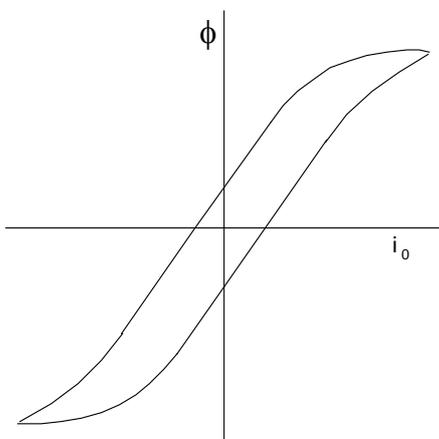


Fig. 4: Curva flujo-intensidad

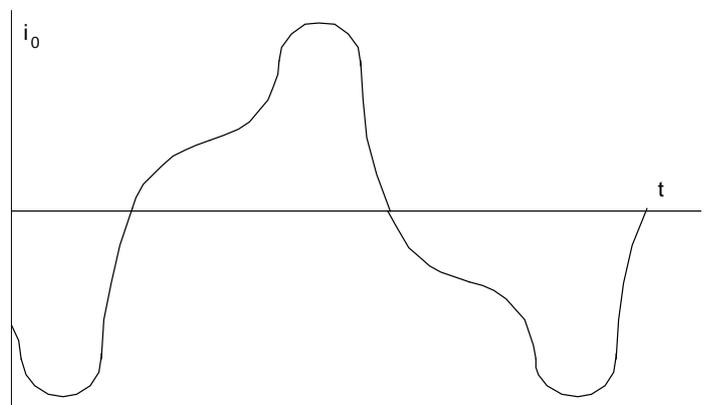


Fig. 5: Forma de la corriente de vacío

El hecho de que la intensidad i_0 no sea sinusoidal dificulta los cálculos en los que aparece. Por ello, se sustituye la curva real de i_0 por una senoide equivalente. Esta senoide será una curva sinusoidal que tendrá el mismo valor eficaz I_0 que la curva real y su componente activa I_{Fe} justificará las pérdidas en el núcleo magnético.

A partir de ahora, en este texto en lugar de la intensidad de vacío i_0 real se utilizará su senoide equivalente.

4. ENSAYO DE VACÍO

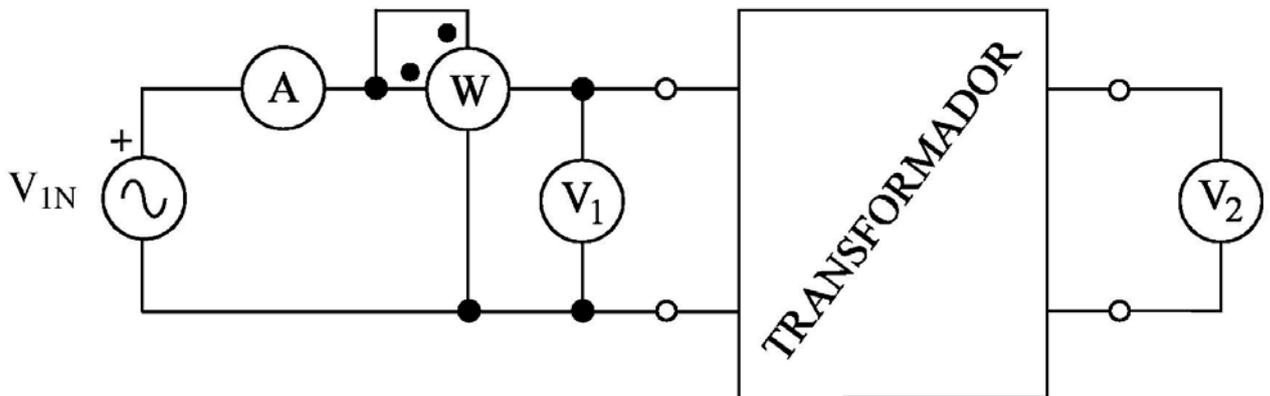


Fig. 6: Circuito para el ensayo de vacío

En la Fig. 6 se muestra la conexión de aparatos de medida para la realización del ensayo de vacío (cuando el ensayo se realiza alimentando a la máquina por el primario, pues este ensayo, así como el de cortocircuito, también se pueden realizar alimentando al transformador por el secundario). Consiste en alimentar el primario a la tensión asignada, V_{1N} , con el secundario abierto ($I_2 = 0$), es decir, en vacío. Seguidamente se anotan las indicaciones de los aparatos de medida. Dichas medidas son:

- Medida voltímetro V_1 = valor eficaz de la tensión asignada primaria, V_{1N}
- Medida amperímetro A = valor eficaz de la corriente de vacío, I_0
- Medida vatímetro W = potencia (activa) en el ensayo de vacío P_0
- Medida voltímetro V_2 = valor eficaz de la tensión secundaria de vacío, $V_{20} = V_{2N}$

La potencia activa consumida durante este ensayo coincide con las pérdidas en el hierro ($P_0 = P_{Fe}$). Esto es debido a que las pérdidas en el cobre del devanado secundario son nulas ($I_2 = 0$) y a que las pérdidas en el cobre del devanado primario ($R_1 I_0^2$) son despreciables a causa de la pequeña magnitud de I_0 . Todo ello está de acuerdo con el circuito equivalente aproximado que, en este caso, queda reducido a las ramas en derivación, tal como se muestra en la Fig. 7a.

Por tanto, el factor de potencia de vacío, vale:

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{V_{1N} \cdot I_0} \quad (1)$$

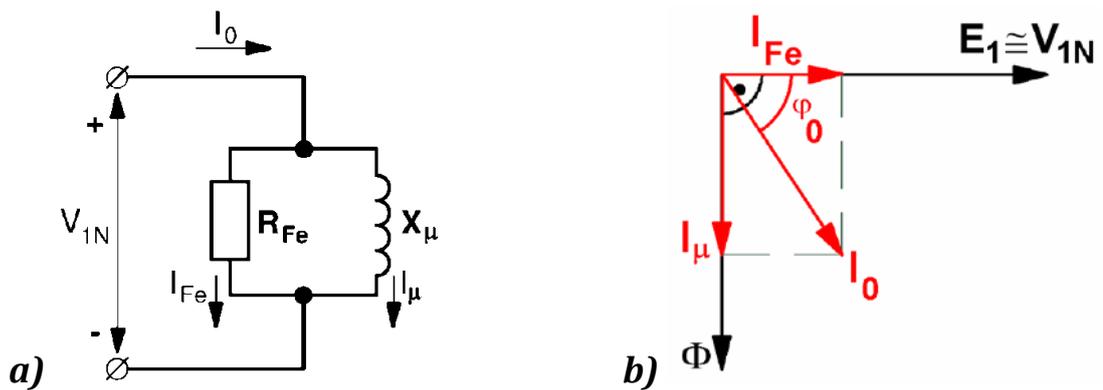


Fig. 7: Circuito equivalente y diagrama vectorial de un transformador durante el ensayo de vacío

En la Fig. 7b se muestra el diagrama vectorial del transformador en vacío y de él se deduce que:

$$I_{Fe} = I_0 \cos \varphi_0 \quad (2)$$

$$I_{\mu} = I_0 \sin \varphi_0 \quad (3)$$

La resistencia de pérdidas en el hierro y la reactancia magnetizante se obtienen aplicando la Ley de Ohm al circuito equivalente de la Fig. 7a:

$$R_{Fe} = \frac{V_{1N}}{I_{Fe}} \quad (4)$$

$$X_{\mu} = \frac{V_{1N}}{I_{\mu}} \quad (5)$$

Finalmente, la *relación de transformación m* vale:

$$m = \frac{V_{1N}}{V_{2N}} \quad (6)$$

5. ENSAYO DE CORTOCIRCUITO

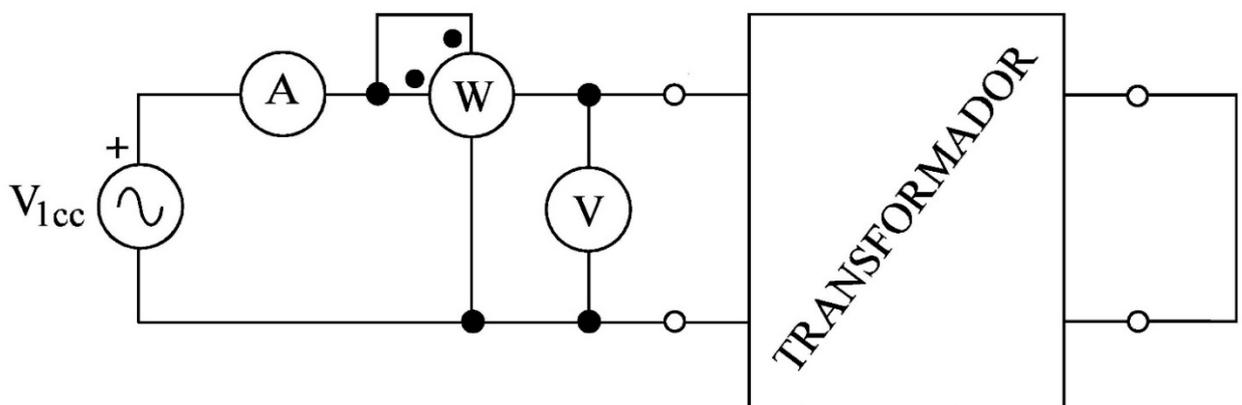


Fig. 8: Circuito para el ensayo de cortocircuito

Este ensayo (cuando se realiza alimentando a la máquina por el primario) consiste en cortocircuitar el devanado secundario y aplicar una tensión primaria que se aumenta progresivamente desde cero hasta que por los devanados circulen sus respectivas corrientes asignadas. En la Fig. 8 se muestra el transformador y la conexión de los aparatos de medida necesarios en este ensayo.

En este caso las indicaciones de los aparatos de medida son:

- Medida voltímetro V = valor eficaz de la tensión primaria de cortocircuito, V_{1cc}
- Medida amperímetro A = valor eficaz de la corriente asignada primaria, I_{1N}
- Medida vatímetro W = potencia (activa) durante el ensayo de cortocircuito P_{cc}

La tensión aplicada, V_{1cc} (tensión de cortocircuito), necesaria para alcanzar la intensidad asignada con el secundario en cortocircuito, es muy pequeña en comparación con la tensión asignada ($V_{1cc} \approx 3-10\% V_{1N}$). Esto da lugar a que el flujo establecido también sea pequeño ($V_{1cc} \approx E_1 = 4,44 f N_1 \Phi_M$) y, por tanto, a que las pérdidas en el hierro sean despreciables ($P_{Fe} \approx Cte \cdot \Phi_M^2$). Por consiguiente, la potencia activa consumida en este ensayo es igual a las pérdidas en el cobre en régimen asignado (o nominal), ya que por sus devanados circulan las respectivas corrientes asignadas ($P_{cc} = P_{CuN}$).

Además, dado el pequeño valor que representa la corriente de vacío (que, en este ensayo, al realizarse con una tensión V_{1cc} reducida, es mucho más pequeña que la corriente de vacío normal, la cual ya es de por sí pequeña) frente a la intensidad asignada I_{1N} , se despreja la rama en derivación del circuito equivalente aproximado, como se muestra en la Fig. 9a, lo que permite el cálculo de los parámetros de la rama en serie del mismo. En la Fig. 9b se muestra el correspondiente triángulo de impedancias durante el ensayo de cortocircuito.

El hecho de que ahora la corriente de vacío se pueda desprejar significa que las corrientes secundaria y primaria guardan exactamente una proporción igual a la relación de transformación m . Como por el primario circula la corriente asignada, I_{1N} , esto conlleva el que también por el secundario circula su corriente asignada, I_{2N} .

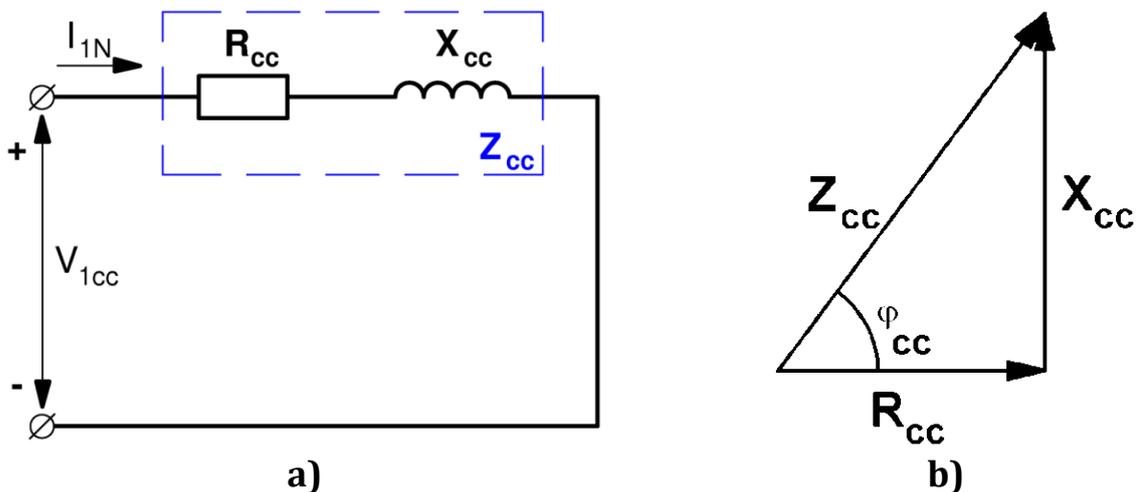


Fig. 9: Circuito equivalente y triángulo de impedancias durante un ensayo de cortocircuito

De las medidas realizadas se obtiene el *factor de potencia de cortocircuito*, $\cos \varphi_{cc}$:

$$\cos \varphi_{cc} = \frac{P_{cc}}{V_{1cc} I_{1N}} \quad (7)$$

Aplicando la Ley de Ohm en el circuito equivalente de la Fig. 9a se deduce que la *impedancia de cortocircuito* Z_{cc} vale:

$$Z_{cc} = \frac{V_{1cc}}{I_{1N}} \quad (8)$$

Finalmente, del triángulo de impedancias de la Fig. 9b se obtienen estas expresiones para calcular los parámetros de la rama en serie del circuito equivalente:

$$R_{cc} = Z_{cc} \cos \varphi_{cc} \quad (9) \qquad X_{cc} = Z_{cc} \sin \varphi_{cc} \quad (10)$$

6. OTROS PARÁMETROS DEDUCIDOS DE LOS ENSAYOS

6.1. Tensiones porcentuales de cortocircuito

Normalmente, los parámetros R_{cc} , X_{cc} y Z_{cc} se expresan en forma porcentual resultando, respectivamente, ε_{cc} , ε_{Rcc} y ε_{Xcc} ; los cuáles están ligados entre sí mediante un triángulo (Fig. 10) semejante al de impedancias (Fig. 9b).

$$\varepsilon_{cc} = \frac{Z_{cc} \cdot I_{1N}}{V_{1N}} 100 = \frac{V_{1cc}}{V_{1N}} 100 \quad (11)$$

$$\varepsilon_{Rcc} = \frac{R_{cc} \cdot I_{1N}}{V_{1N}} 100 = \frac{P_{cc}}{S_N} 100 \quad (12)$$

$$\varepsilon_{Xcc} = \frac{X_{cc} \cdot I_{1N}}{V_{1N}} 100 = \sqrt{\varepsilon_{cc}^2 - \varepsilon_{Rcc}^2} \quad (13)$$

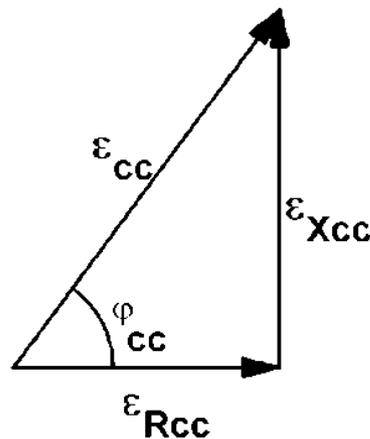


Fig. 10: Relación entre ε_{cc} , ε_{Rcc} y ε_{Xcc}

6.2. Corriente de cortocircuito permanente

Se trata de la corriente que puede presentarse en un transformador cuando, estando alimentado a la tensión asignada, se produce un cortocircuito en los bornes del secundario.

No debe confundirse la corriente primaria de cortocircuito de un transformador, I_{1falta} , con la del ensayo de cortocircuito.

El elevado valor de dicha corriente puede provocar fuertes efectos térmicos y dinámicos sobre instalaciones y máquinas. De ahí que sea necesario conocerlo al objeto del diseño de las protecciones adecuadas que posibiliten su eliminación.

La corriente de cortocircuito primaria se calcula así:

$$I_{1falta} = 100 \frac{I_{1N}}{\varepsilon_{cc}} \quad (14)$$

La corriente de cortocircuito secundaria se obtiene de esta manera:

$$I_{2falta} = m I_{1falta} = 100 \frac{I_{2N}}{\varepsilon_{cc}} \quad (15)$$

6.3. Índice de carga óptimo

El rendimiento máximo del transformador se produce cuando las pérdidas en el cobre en régimen asignado se igualan a las pérdidas en el hierro. Se deduce que el índice de carga óptimo, C_{opt} , que origina el máximo rendimiento vale:

$$C_{opt} = \sqrt{\frac{P_{Fe}}{P_{CuN}}} = \sqrt{\frac{P_0}{P_{cc}}} \quad (16)$$

7. ALGUNAS CONSIDERACIONES SOBRE LAS MEDIDAS EN CORRIENTE ALTERNA

7.1. Constantes de medición

En un instrumento de medida analógico de aguja el resultado de la medición se indica mediante una *aguja* que se mueve sobre un *cuadrante* donde está impresa una *escala* graduada.

Se denomina *alcance* o *calibre* de un instrumento de medida al valor de la magnitud que mide correspondiente al límite superior de su escala. Un instrumento de medida puede tener varios alcances, para lo cual dispone de varios terminales o de un conmutador mediante los que se puede seleccionar el calibre deseado.

La *constante de medición* o *de medida* K_M de un aparato de medida analógico es el número por el que hay que multiplicar las divisiones leídas M_E en la escala del aparato para obtener el valor real M de la magnitud medida:

$$M = K_M \cdot M_E \quad (17)$$

Cuando un aparato tiene diferentes calibres de medida suele disponer en su cuadrante de tantas escalas como calibres tiene. De esta manera, la lectura en divisiones de la escala adecuada expresa directamente el valor de la magnitud medida y no hace falta utilizar la expresión (17) (pues la constante de medición K_M es igual a 1). Sin embargo, existen aparatos con varios alcances y con una sola escala. En este caso hay que emplear una constante de medida diferente en cada caso.

La constante de medida de un aparato para un calibre dado se calcula así:

$$K_M = \frac{\text{Calibre del instrumento}}{\text{Número de divisiones de la escala}} \quad (18)$$

Ejemplos:

- 1) Un voltímetro con los alcances 150-300-600 Voltios y 150 divisiones en su escala tiene estas constantes de medida:

$$\text{Para } 150 \text{ V} \rightarrow K_{V1} = \frac{150 \text{ V}}{150 \text{ div}} = 1 \text{ V / división}$$

$$\text{Para } 300 \text{ V} \rightarrow K_{V2} = \frac{300 \text{ V}}{150 \text{ div}} = 2 \text{ V / división}$$

$$\text{Para } 600 \text{ V} \rightarrow K_{V3} = \frac{600 \text{ V}}{150 \text{ div}} = 4 \text{ V / división}$$

- 2) Un amperímetro con los calibres 5-10 Amperios y 5 divisiones grandes (estas divisiones están numeradas de 1 a 5 y cada una de ellas está subdividida, a su vez, en 20 divisiones pequeñas) tiene estas constantes de medición:

$$\text{Para } 5 \text{ A} \rightarrow K_{A1} = \frac{5 \text{ A}}{5 \text{ div}} = 1 \text{ A / división grande}$$

$$\text{Para } 10 \text{ A} \rightarrow K_{A2} = \frac{10 \text{ A}}{5 \text{ div}} = 2 \text{ A / división grande}$$

En un apartado posterior se tratará de las constantes de medida de los vatímetros.

En el caso de que la constante de medición de un instrumento tenga un valor diferente de 1, es conveniente no realizar la multiplicación (17) de memoria. Es mejor anotar los valores de M_E y K_M y realizar su producto más tarde. De esta manera se evita que un error al realizar de memoria dicho producto impida conocer después el valor de lo que realmente se ha medido.

7.2. Transformadores de intensidad o de corriente

Para la medida de intensidades de corriente alterna se utilizan *amperímetros* cuyo sistema indicador acepte este tipo de corriente.

En algunas ocasiones la medida de corrientes alternas se facilita si se efectúa a través de *transformadores de intensidad* (t.i.) (Fig. 11) conectados como se indica en la Fig. 12.



Fig. 11: Transformadores de intensidad

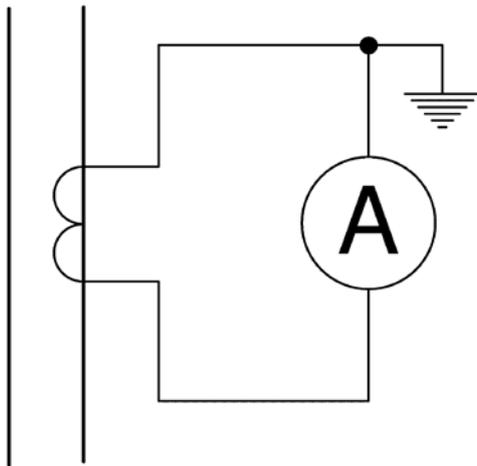


Fig. 12: Conexión de un transformador de intensidad

Así, si se desea medir una intensidad de 500 A, se puede usar un amperímetro de escala 5 A junto con un transformador de intensidad de relación de transformación 500/5 A (es decir, cuando circulan 500 A por el circuito, el transformador de intensidad suministra 5 A al amperímetro). Las lecturas que se realicen con este amperímetro habrá que multiplicarlas por 500/5 para obtener el verdadero valor de la intensidad medida.

La intensidad secundaria asignada de los transformadores de intensidad (la que suministran al amperímetro) suele ser 5 o 1 A.

Con los transformadores de intensidad hay que tener cuidado de no dejar nunca el secundario abierto (es decir, desconectado), pues puede dar lugar a sobretensiones peligrosas.

La *pinza o tenaza amperimétrica* (Fig. 13) es un aparato que consta de un amperímetro y de un transformador de intensidad incorporado. El circuito magnético de este transformador de intensidad se puede abrir como una tenaza, lo que le permite abrazar a un conductor.



Fig. 13: Pinzas o tenazas amperimétricas

Para medir una intensidad I con este aparato basta con abrazar con el circuito magnético a un conductor por donde circule la intensidad I y leer su valor en el amperímetro de la pinza. Se obtiene una medida más precisa si se coloca el conductor en una posición centrada con respecto a las mandíbulas de la pinza amperimétrica.

7.3. Transformadores de tensión

Para la medida de tensiones alternas se utilizan *voltímetros* cuyo sistema indicador acepte este tipo de tensión. En algunas ocasiones la medida de tensiones alternas se facilita si se efectúa a través de *transformadores de tensión* conectados como se indica en la Fig. 14.

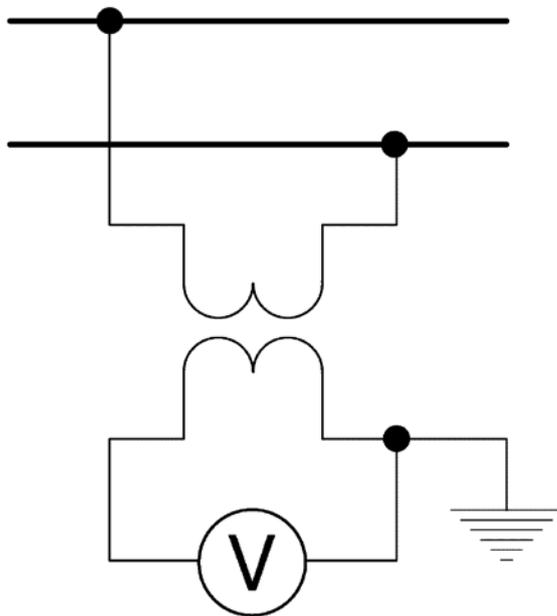


Fig. 14: Conexión de un transformador de tensión

Así, si se desea medir una tensión de 10 000 V se puede emplear un voltímetro de 110 V junto con un transformador de tensión de relación de transformación de 10 000/110 V (es decir, cuando el circuito está a 10 000 V, el transformador de tensión suministra 110 V al voltímetro). Las lecturas que se realicen con este voltímetro habrá que multiplicarlas por 10 000/110 para obtener el valor de la tensión medida.

La tensión asignada secundaria de los transformadores de tensión (la que se suministra al voltímetro) suele ser de 100 o 110 V.

No es conveniente utilizar los transformadores de medida (tanto de tensión, como de intensidad) para medir magnitudes cuyos valores difieran mucho de los valores asignados del primario de estos transformadores, pues se pierde precisión en la medida.

Los transformadores de medida permiten aislar galvánicamente el circuito que se está midiendo de los aparatos de medida. De esta forma, los aparatos de medida se encuentran sometidos a una tensión respecto a tierra menos peligrosa y, por consiguiente, más segura para las personas que se acerquen a leer sus indicaciones. Como medida de seguridad se recomienda conectar a tierra uno de los terminales del secundario de un transformador de medida.

7.4. Vatímetros

La medida de la potencia activa consumida por un circuito de corriente alterna monofásico se realiza mediante *vatímetros*.

Un vatímetro posee dos circuitos (Fig. 15): uno *voltimétrico*, conectado en paralelo con la tensión del circuito cuya potencia se mide, y otro *amperimétrico*, recorrido por la intensidad que circula por el circuito cuya potencia se mide.

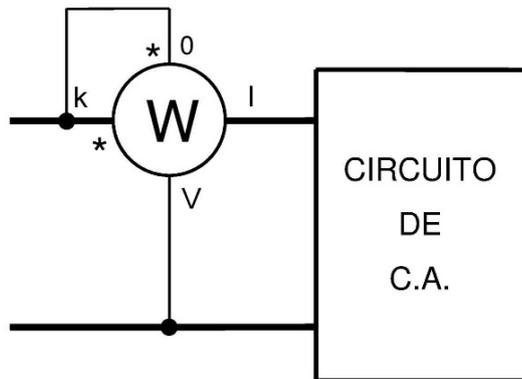


Fig. 15: Vatímetro monofásico.

k-l: Terminales del circuito amperimétrico.

0-V: Terminales del circuito voltimétrico.

Al conectar el vatímetro es preciso tener cuidado con la *polaridad* de estos circuitos, la cual suele indicarse mediante un punto o un asterisco en uno de los bornes de cada circuito (véase la Fig. 15). Un vatímetro conectado como se muestra en la Fig. 15 indicará una potencia activa positiva cuando el circuito consume potencia y señalará una potencia negativa cuando el circuito genera potencia. En este último caso (potencia negativa), si el vatímetro es analógico, la aguja indicadora intentará moverse hacia atrás y no se puede realizar la lectura. Para medir esta potencia negativa en un vatímetro analógico, habrá que invertir las conexiones del circuito voltimétrico o las del circuito amperimétrico -pero no la de los dos a la vez- y dar signo negativo al resultado obtenido.

Para obtener la potencia activa que se está midiendo con un vatímetro analógico hay que multiplicar la lectura por la *constante del vatímetro* K_W . Así, si se tiene un vatímetro que mide hasta 5 A y 300 V y su escala posee 500 divisiones, la constante K_W , por la que habrá que multiplicar el número de divisiones que se lean al realizar una medición, será:

$$K_W = \frac{1500 \text{ W}}{500 \text{ div}} = 3 \text{ W/div}$$

pues la máxima potencia que puede medir este vatímetro es $300 \times 5 = 1500 \text{ W}$.

Si se mide la potencia activa de una carga con bajo factor de potencia (f.d.p.), la aguja de un vatímetro normal se moverá poco, aunque dicha carga tenga la tensión y la corriente a la que esté ajustado el vatímetro, y la medida será poco precisa. Hay vatímetros especiales para medir la potencia activa con bajos factores de potencia (Fig. 16b). En ellos hay que tener en cuenta su f.d.p. máximo a la hora de calcular la constante de medida K_W . Por ejemplo, un vatímetro cuyo f.d.p. máximo sea 0,33, esté conectado a las tomas de 2,5 A y 150 V y su escala posea 250 divisiones puede medir hasta

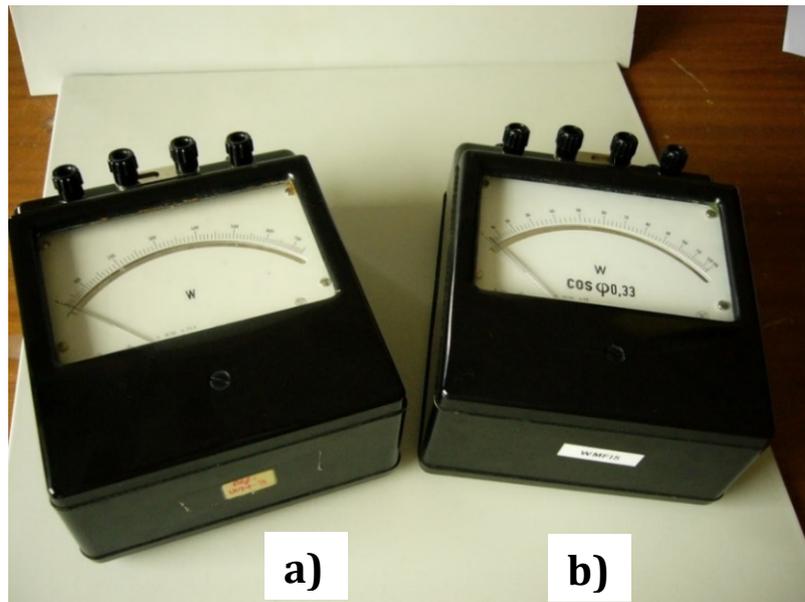
$$2,5 \times 150 \times 0,33 = 125 \text{ W}$$

y su constante K_W vale

$$K_W = 125 / 250 = 0,5 \text{ W/div}$$

En estos vatímetros el f.d.p. máximo sirve para determinar su potencia de fin de escala, pero no significa que la carga conectada al vatímetro necesariamente ha de ser de pequeño factor de potencia. Así, en el ejemplo anterior, este vatímetro se puede utilizar para medir una carga que no esté a más de 150 V, que no demande más de 2,5 A y cuya potencia activa no sea superior a 125 W, independientemente de su f.d.p.

En caso de ser necesario, el circuito voltimétrico de un vatímetro puede estar conectado al circuito a través de un transformador de tensión y el circuito amperimétrico a través de un transformador de intensidad. En estos casos, hay que multiplicar la lectura obtenida por la constante del vatímetro (K_w) y por las relaciones de transformación de los transformadores de medida para obtener el valor de la potencia que se está midiendo.



*Fig. 16: Vatímetros monofásicos analógicos:
a) Normal; b) Especial para bajos factores de potencia*

8. REALIZACIÓN PRÁCTICA

8.1. Introducción

Esta práctica de laboratorio empezará con el profesor mostrando en un osciloscopio la curva de histéresis y la corriente de vacío de un transformador monofásico.

Seguidamente los alumnos se dividirán en grupos y cada uno de estos grupos realizará varios ensayos a un transformador monofásico diferente. Las medidas realizadas en estos ensayos y los cálculos correspondientes se reflejarán en las hojas de prácticas que acompañan a esta documentación. En estas hojas se sigue el convenio de indicar con negrita las magnitudes que se obtienen en el laboratorio y sin negrita las que se determinan mediante los cálculos posteriores.

Como se explicará seguidamente, para realizar estos ensayos los alumnos van a montar los circuitos de la Fig. 17, la Fig. 18 y la Fig. 19. De estos circuitos los alumnos sólo deben montar la parte del circuito posterior al interruptor con fusibles. La parte inicial del circuito (autotransformador, interruptor y fusibles) ya estará montada previamente al inicio de la clase.

En todos estos ensayos se supone que *el primario es el devanado de baja tensión.*

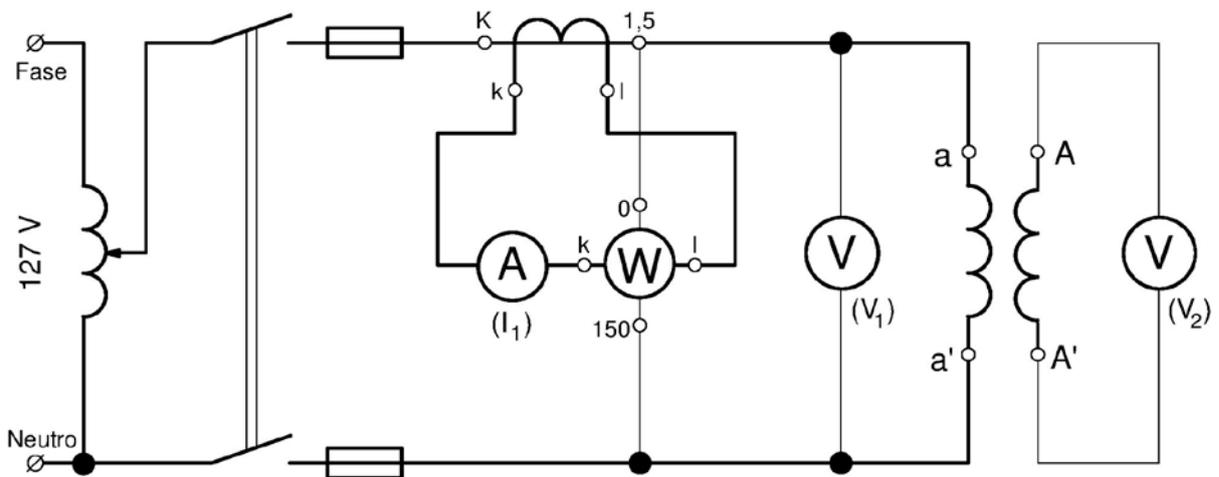


Fig. 17: Circuito para el ensayo de vacío por el primario (Primario = devanado de B.T.)

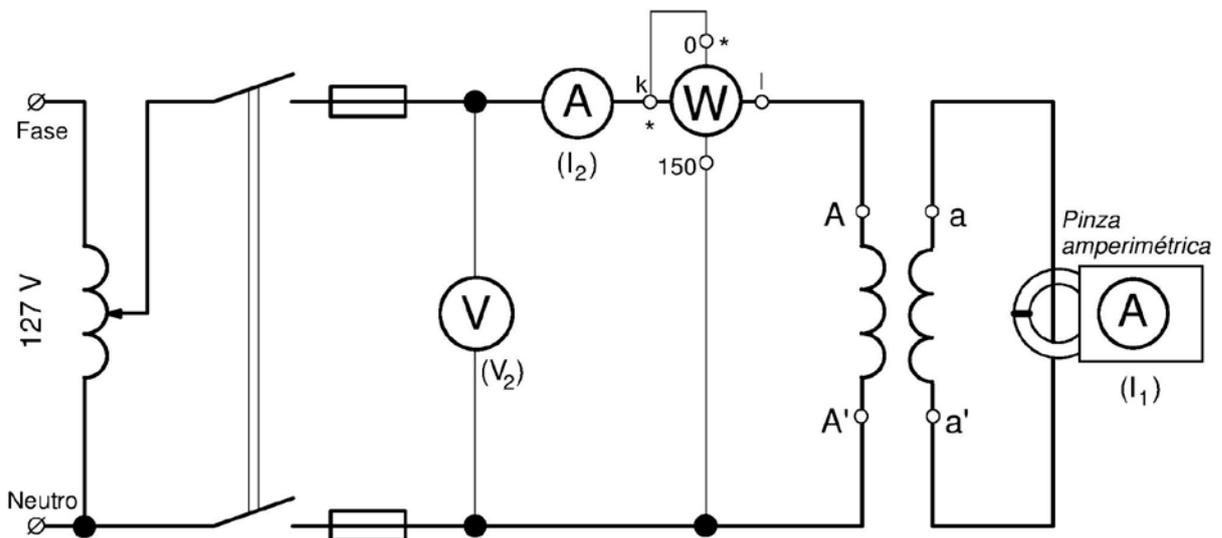


Fig. 18: Circuito para el ensayo de cortocircuito por el secundario (Primario = devanado de B.T.)

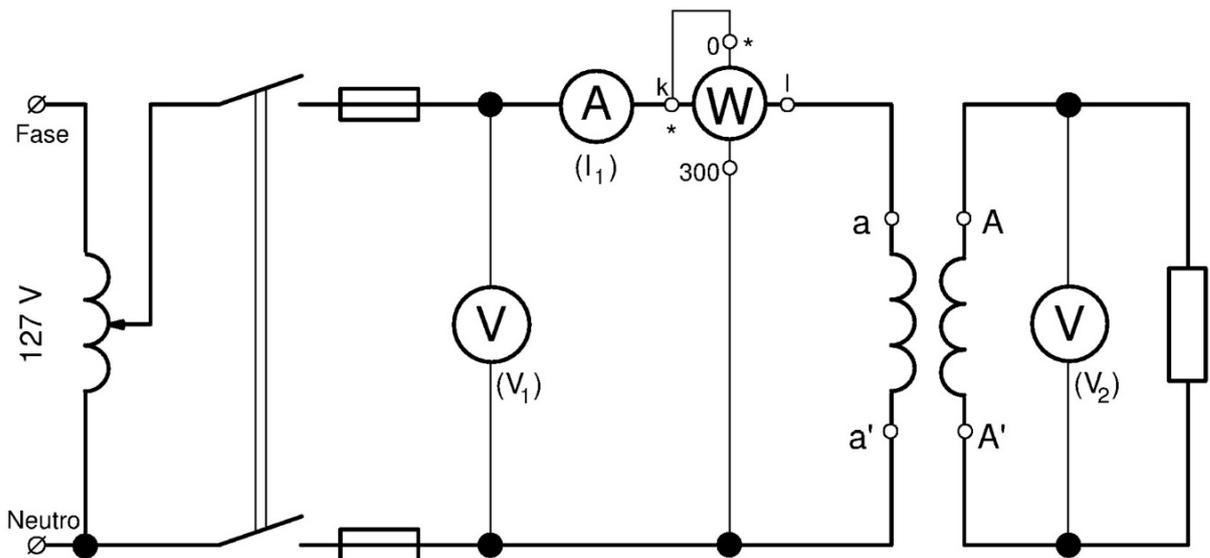


Fig. 19: Circuito para el ensayo de caída de tensión (Primario = devanado de B.T.)

En la Fig. 17, la Fig. 18 y la Fig. 19 se designan A y A' a los dos terminales del devanado de alta tensión (A.T.) y se designan a y a' a los dos terminales del devanado de baja tensión (B.T.).

Lo primero que tendrán que hacer los alumnos será anotar en las hojas de prácticas las referencias y las características más relevantes del transformador a ensayar y de los instrumentos de medida utilizados.

Sabiendo que el primario del transformador va a ser su devanado de baja tensión (B.T.), lo siguiente es determinar sus valores asignados: S_N , V_{1N} , V_{2N} , I_{1N} e I_{2N} .

8.2. Resistencia de aislamiento

Antes de dar tensión al transformador se va a comprobar que sus aislamientos están en buen estado. Para ello, mediante un megóhmetro, se van a medir las resistencias de aislamiento entre los devanados de alta y de baja tensión (R_{AB}) y entre estos y la carcasa de la máquina (R_{AC} y R_{BC}). Estas medidas se realizarán con el transformador sin tensión y se anotarán en las hojas de prácticas.

Una vez comprobado que los aislamientos están en buen estado se procederá a realizar los siguientes ensayos.

8.3. Ensayos de vacío y de cortocircuito

8.3.1. Circuitos a montar

Como se ha indicado anteriormente, estos ensayos permiten determinar los parámetros del circuito equivalente aproximado del transformador (Fig. 1).

Aunque al explicar estos ensayos en los párrafos anteriores se ha supuesto que se realizan alimentando al transformador por el primario, en la práctica se ejecutan alimentando a la máquina por el lado por el que sea más fácil realizar las mediciones con el equipamiento de que se dispone en el laboratorio.

La corriente de vacío es pequeña y resulta difícil medirla con los aparatos disponibles. Por esta razón el ensayo de vacío se va a ejecutar alimentando a la máquina por el lado de baja tensión que, al tener menos espiras, requiere una corriente de vacío mayor. Además, para adaptar mejor la corriente a medir a los alcances del amperímetro y del vatímetro, se va a añadir un transformador de intensidad (cuya relación de transformación se denominará α_i) que envía a estos aparatos de medida una corriente mayor que la que realmente está circulando por el transformador. Por lo tanto, el circuito a montar para el ensayo de vacío es el mostrado en la Fig. 17.

Nótese que, al realizar el ensayo de vacío por el lado de baja tensión, en este caso este ensayo se está realizando alimentando a la máquina por el primario.

En el ensayo de cortocircuito la corriente va a ser más alta (la corriente asignada) y por ello se la va a enviar directamente a los instrumentos de medida, sin transformadores de intensidad de por medio. Va a interesar realizar el ensayo alimentando a la máquina por el lado de alta tensión, donde la corriente va a ser menor y se va a adaptar mejor a los alcances de los aparatos de medida disponibles en el laboratorio.

Adviértase que, al realizar el ensayo de cortocircuito por el lado de alta tensión, en este caso este ensayo se está realizando alimentando a la máquina por el secundario.

En este ensayo la única corriente que se necesita medir es la que circula por el devanado por donde se alimenta al transformador (que en este caso se trata del bobinado secundario). Pero para comprobar que en el ensayo de cortocircuito las intensidades de ambos devanados guardan entre sí una relación igual a la inversa de la relación de transformación, también se va a medir la corriente primaria mediante una pinza amperimétrica. En consecuencia, el circuito a montar para el ensayo de cortocircuito es el mostrado en la Fig. 18.

8.3.2. Proceso de ensayo

Se empezará montando el circuito para el ensayo de vacío (Fig. 17) en el que el transformador se alimenta por el lado de baja tensión (B.T.). Antes de dar tensión al circuito se comprobará que todos los aparatos de medida están conectados en el alcance adecuado y que el autotransformador está en la posición en que su tensión de salida es nula. El circuito debe ser revisado por el profesor antes de iniciar el ensayo.

Previamente a iniciar este ensayo se anotan en la tabla correspondiente los alcances del vatímetro que se utilizan en este montaje. Con estos datos se procederá a calcular la constante del vatímetro K_{W0} , cuyo valor se anotará en la última columna de esta tabla.

Para realizar el ensayo de vacío se cierra el interruptor y se sube paulatinamente la tensión que suministra el autotransformador hasta que el devanado de B.T. del transformador a ensayar esté a su tensión asignada. En ese momento se anotan las lecturas de los aparatos de medida y la relación de transformación del transformador de intensidad. Es decir, se toma nota de todas estas magnitudes:

$$\alpha_i \quad V_{1N} \quad I_{0E} \quad P_{0E} \quad V_{2N}$$

El amperímetro y el vatímetro son aparatos analógicos y se anotarán sus lecturas (I_{0E} y P_{0E}) tal como se leen directamente sobre sus escalas. Ya se multiplicarán más tarde estas lecturas por las constantes adecuadas para obtener el valor real de las magnitudes medidas. El amperímetro tiene varias escalas graduadas y no precisa de una constante de medida, pero hay que tener cuidado de efectuar la lectura sobre la escala que corresponde al alcance utilizado.

Una vez realizado el ensayo de vacío, se abre el interruptor, se deja el autotransformador en la posición en que suministra una tensión nula y se desmonta la parte del circuito posterior al interruptor con fusibles.

Se seguirá con el montaje del circuito para el ensayo de cortocircuito (Fig. 18) en el que el transformador se alimenta por el lado de alta tensión (A.T.). Antes de dar tensión al circuito se comprobará que todos los aparatos de medida están conectados en el alcance adecuado y que el autotransformador está en la posición en que su tensión de salida es nula. El circuito debe ser revisado por el profesor antes de iniciar el ensayo.

Previamente a iniciar este ensayo se anotan en la tabla correspondiente los alcances del vatímetro que se utilizan en este montaje. Con estos datos se procederá a calcular la constante del vatímetro K_{Wcc} , cuyo valor se anotará en la última columna de esta tabla.

Para realizar el ensayo de cortocircuito se cierra el interruptor y se sube paulatinamente la tensión del autotransformador hasta que el devanado de A.T. del transformador a ensayar esté recorrido por su intensidad asignada. Hay que tener cuidado de subir la tensión muy despacio y vigilando constantemente que la corriente no sea excesiva, pues la tensión necesaria va a ser muy baja.

Seguidamente se anotan las lecturas de los aparatos de medida, es decir, se toma nota de estas magnitudes:

$$V_{2cc} \quad I_{2N} \quad P_{ccE} \quad I_{1N}$$

El vatímetro es un aparato analógico y se anotará su lectura (P_{ccE}) tal como se lee directamente sobre su escala. Ya se multiplicará más tarde esta lectura por su constante de medida.

El amperímetro del lado de alta tensión es también analógico y tiene varias escalas graduadas, por lo que hay que tener cuidado de efectuar la lectura sobre la escala que corresponde al alcance utilizado. De esta manera la lectura sobre la escala da directamente el valor de la corriente que se está midiendo y no se necesitan constantes de medida.

Una vez realizado el ensayo de cortocircuito, se abre el interruptor para quitar tensión al circuito y se deja el autotransformador en la posición en que suministra una tensión nula, pero no se desmonta el circuito. Sólo se quitan el cortocircuito y la pinza amperimétrica del lado de baja tensión del transformador.

8.4. Ensayo de caída de tensión con varias cargas

Este ensayo va a permitir comprobar cómo influye la carga –tanto su valor como su factor de potencia- conectada al secundario del transformador sobre la tensión secundaria. El circuito a utilizar es el de la Fig. 19.

Para montar este circuito se aprovechará el que ya se había montado anteriormente para el ensayo de cortocircuito. Por esta razón en la Fig. 19 se conserva el vatímetro aunque no se necesita en este ensayo.

Para pasar del circuito de la Fig. 18 al de la Fig. 19, los cables que antes iban a los terminales A y A' se conectan a los terminales a y a' del transformador, respectivamente. Entre los terminales A y A' ahora se conecta otro voltímetro y, de momento, se deja el transformador en vacío (es decir, no se conecta aún la resistencia dibujada en el secundario en la Fig. 19).

Además, también hay que cambiar los alcances del voltímetro del primario y del vatímetro. El alcance del voltímetro debe adecuarse a la tensión asignada del devanado de baja tensión (B.T.) del transformador. El vatímetro se conectará utilizando los terminales de mayor tensión de su circuito voltimétrico. Esto no se hace porque se necesite que el vatímetro pueda soportar una tensión elevada, sino para conseguir que la potencia activa que corresponde a su final de escala (teniendo en cuenta que se trata de un vatímetro para bajos factores de potencia) sea mayor que la que se va a consumir en este ensayo.

Antes de dar tensión al circuito se comprobará que todos los aparatos de medida están conectados en el alcance adecuado y que el autotransformador está en la posición en que su tensión de salida es nula. El circuito debe ser revisado por el profesor antes de iniciar el ensayo.

Este ensayo se comienza cerrando el interruptor y subiendo la tensión que proporciona el autotransformador hasta que el devanado de baja tensión del transformador a ensayar (que ahora está en vacío) esté a su tensión asignada. En ese momento se anotan las medidas indicadas por los voltímetros conectados a ambos devanados de la máquina.

Seguidamente se abre el interruptor y no se mueve el ajuste del autotransformador, pues se pretende que la tensión primaria se mantenga constante durante todo el ensayo. A continuación, se conecta una resistencia como carga del secundario (ver la Fig. 19), se cierra el interruptor, se reajusta el autotransformador para que la tensión primaria siga siendo la asignada y se anotan el nuevo valor de la tensión secundaria V_2 y, además, el valor de la corriente primaria I_1 .

Finalmente, se vuelve a abrir el interruptor y no se mueve el ajuste del autotransformador. Se desconecta la resistencia del secundario y, en su lugar, se conecta un condensador como nueva carga del secundario, se cierra el interruptor, se reajusta el autotransformador para que la tensión primaria siga siendo la asignada y se anotan los nuevos valores de la tensión secundaria V_2 y de la corriente primaria I_1 .

De las medidas efectuadas durante este ensayo se advierte que las dos cargas, resistiva y capacitiva utilizadas dan lugar a valores eficaces de la corriente primaria I_1 muy similares.

Mediante este ensayo se comprueba que, manteniendo constante la tensión primaria, la tensión secundaria varía de estar el transformador en vacío, con carga resistiva o con carga capacitiva. Además, aunque ambas cargas consumen prácticamente corrientes con el mismo valor eficaz, su efecto sobre la tensión secundaria V_2 es distinto porque depende del factor de potencia.

Para acabar se abre el interruptor para quitar tensión al circuito, se deja el autotransformador en la posición en que suministra una tensión nula, se descargan los condensadores que constituyeron la carga capacitiva y se desmonta la parte del circuito posterior al interruptor con fusibles. Por último, se debe verificar que los aparatos de medida digitales están apagados y que aquellos instrumentos de medida que tienen un selector se han dejado en el alcance más seguro.

8.5. Resultados a obtener

En las hojas de prácticas existe el apartado de "Resultados finales" donde anotar varios valores obtenidos por cálculo a partir de los resultados de los ensayos de vacío y de cortocircuito. Recuérdese que para estos ensayos se está suponiendo que *el primario es el devanado de baja tensión (B.T.) y el secundario es el bobinado de alta tensión (A.T.) del transformador.*

Los cálculos correspondientes a los ensayos de vacío y de cortocircuito empiezan determinando los verdaderos valores medidos de la corriente y de la potencia activa. Para ello se tiene en cuenta la constante del vatímetro en cada ensayo y, en el caso del ensayo de vacío, también la relación de transformación del transformador de intensidad.

Se comprueba que el cociente entre las corrientes secundaria y primaria medidas en el ensayo de cortocircuito es prácticamente igual a la relación de transformación m calculada como cociente entre las tensiones primaria y secundaria medidas en el ensayo de vacío (puede haber una pequeña diferencia debida a errores de medida).

El ensayo de cortocircuito se ha realizado por el secundario. Refiriendo al primario la tensión y la corriente medidas se determinan los respectivos valores que se habrían obtenido de haber efectuado el ensayo por el primario. La potencia no cambia de hacer el ensayo por el primario o por el secundario. Estos valores del ensayo de cortocircuito referidos al primario se calculan utilizando la relación de transformación obtenida del ensayo de vacío y serán los valores de este ensayo que se utilizarán para los cálculos posteriores.

Los parámetros del circuito equivalente y las demás magnitudes que se indican en las hojas de prácticas se calculan como se ha explicado anteriormente (ecuaciones (1) a (16)).

9. BIBLIOGRAFÍA

- [1] AVTGIS, COUGHLIN y LOOMOS. *Manual de laboratorio para circuitos eléctricos*. Marcombo. Barcelona. 1976.
- [2] CHAPMAN. *Máquinas eléctricas*. McGraw-Hill Interamericana. Madrid. 2005.
- [3] CORRALES MARTIN. *Cálculo Industrial de máquinas eléctricas (2 tomos)*. Marcombo. Barcelona. 1982.
- [4] DPTO. TÉCNICO DISTESA. *Manuales Distesa: Máquinas II*. DISTESA. Madrid. 1976.
- [5] EQUIPO EPS ZARAGOZA. *Tecnología de Electricidad 4 instalaciones y líneas*. EDEBE. Barcelona. 1981.
- [6] FRAILE MORA y GARCÍA GUTIÉRREZ. *Prácticas de Electrotecnia*. Dpto. de Publicaciones de la E.T.S.I.C.C.P. de Madrid.
- [7] FRAILE MORA. *Máquinas eléctricas (7ª edición)*. Ibergarceta Publicaciones, S.L. Madrid. 2015.
- [8] GURRUTXAGA. *El fenómeno electromagnético Tomo IV. Las máquinas eléctricas II*. Dpto. de publicaciones de la E.T.S.I.C.C.P. de Santander 1985.
- [9] PALACIOS BREGEL. *Prácticas de Laboratorio de Máquinas Eléctricas*. Paraninfo. Madrid. 1977.
- [10] RAS OLIVA. *Transformadores de potencia, de medida y protección*. Ed. Marcombo. Barcelona. 1998.
- [11] SALAZAR. *Ingeniería eléctrica experimental*. Ed. Marcombo. Barcelona. 1973.
- [12] SANZ FEITO. *Máquinas eléctricas*. Pearson Educación. Madrid. 2002.

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ENERGÉTICA

Práctica de Laboratorio: TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS

Nombre del alumno: _____

Asignatura: _____ Titulación: _____

Fecha de realización de la práctica: _____ Grupo de prácticas: _____

(Se designan en negrita las magnitudes que se obtienen en el laboratorio y
sin negrita las que se obtienen posteriormente por cálculo)

Datos de la placa de características del transformador

Referencia		Potencia asignada S_N (VA)	
Tensión asignada del devanado de A.T. V_{ATN} (V)		Tensión asignada del devanado de B.T. V_{BTN} (V)	

Características de los aparatos de medida empleados:

Tipo de aparato	Referencia	Sistema indicador	Clase de precisión	Alcances	Nº de divi- siones de la escala

Valores asignados:

Durante toda la práctica se supone que el primario es el devanado de B.T.

1. Valores asignados del transformador			
S_N (VA)			
V_{1N} (V)		I_{1N} (A)	
V_{2N} (V)		I_{2N} (A)	

Medidas durante los ensayos:

2. Resistencias de aislamiento		
R_{Aa} (M Ω)	R_{AC} (M Ω)	R_{aC} (M Ω)

(C = cuba del transformador)

3. Ensayo de vacío (por el primario)				
<i>Conexiones del vatímetro en este ensayo:</i>				
$V_{Máx}$ (V)	$I_{Máx}$ (A)	$\cos \varphi_{Máx}$	Nº divisiones	K_{W0} (W/div)
<i>Medidas durante este ensayo:</i>				
α_i	V_{1N} (V)	I_{0E} (div)	P_{0E} (div)	V_{2N} (V)

α_i = Relación de transformación del transformador de intensidad

$$K_W = \frac{V_{Máx} \cdot I_{Máx} \cdot \cos \varphi_{Máx}}{N^\circ \text{ divisiones}}$$

4. Ensayo de cortocircuito (por el secundario)				
<i>Conexiones del vatímetro en este ensayo:</i>				
$V_{Máx}$ (V)	$I_{Máx}$ (A)	$\cos \varphi_{Máx}$	Nº divisiones	K_{Wcc} (W/div)
<i>Medidas durante este ensayo:</i>				
V_{2cc} (V)	I_{2N} (A)	P_{ccE} (div)		I_{1N} (A)

5. Ensayo de caída de tensión					
V_{1N} (V)	Vacío:	Carga resistiva:		Carga capacitiva:	
	V_2 (V)	V_2 (V)	I_1 (A)	V_2 (V)	I_1 (A)

Resultados finales:

6. Magnitudes medidas en el ensayo de vacío (por el primario)			
V_{1N} (V)	I_0 (A)	P_0 (W)	V_{2N} (V)

$$I_0 = I_{0E} \cdot \alpha_i$$

$$P_0 = P_{0E} \cdot K_{W0} \cdot \alpha_i$$

7. Parámetros del circuito equivalente deducidos del ensayo de vacío					
φ_0 (°)	I_{Fe} (A)	I_μ (A)	R_{Fe} (Ω)	X_μ (Ω)	m

$$m = \frac{V_{1N}}{V_{2N}}$$

8. Magnitudes medidas en el ensayo de cortocircuito (por el secundario)			
V_{2cc} (V)	I_{2N} (A)	P_{cc} (W)	I_{2N} / I_{1N}

$$P_{cc} = P_{ccE} \cdot K_{Wcc}$$

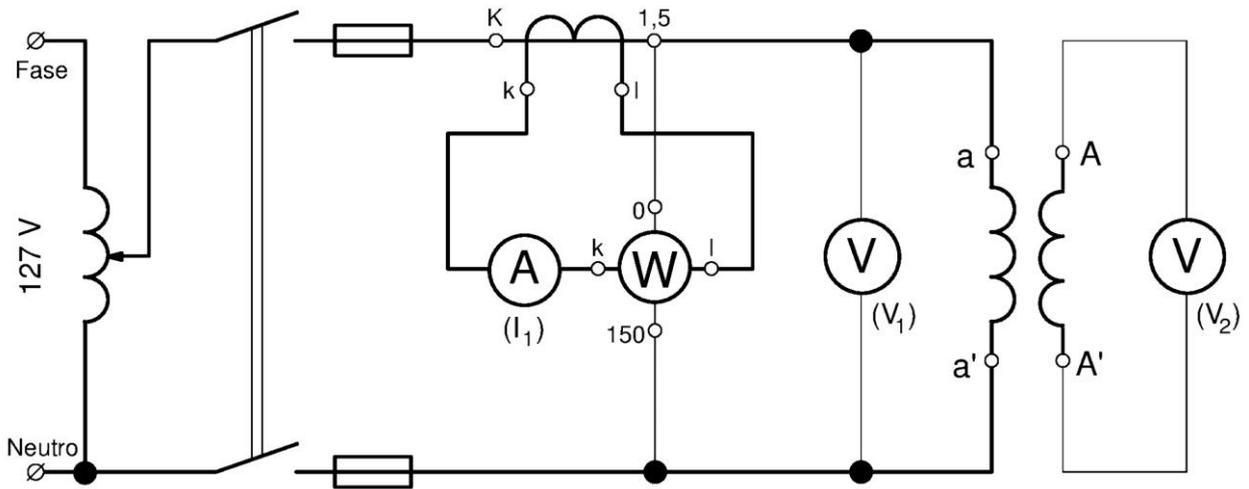
9. Magnitudes correspondientes al ensayo de cortocircuito que se hubiera realizado por el primario		
V_{1cc} (V)	I_{1N} (A)	P_{cc} (W)

$$V_{1cc} = m \cdot V_{2cc}$$

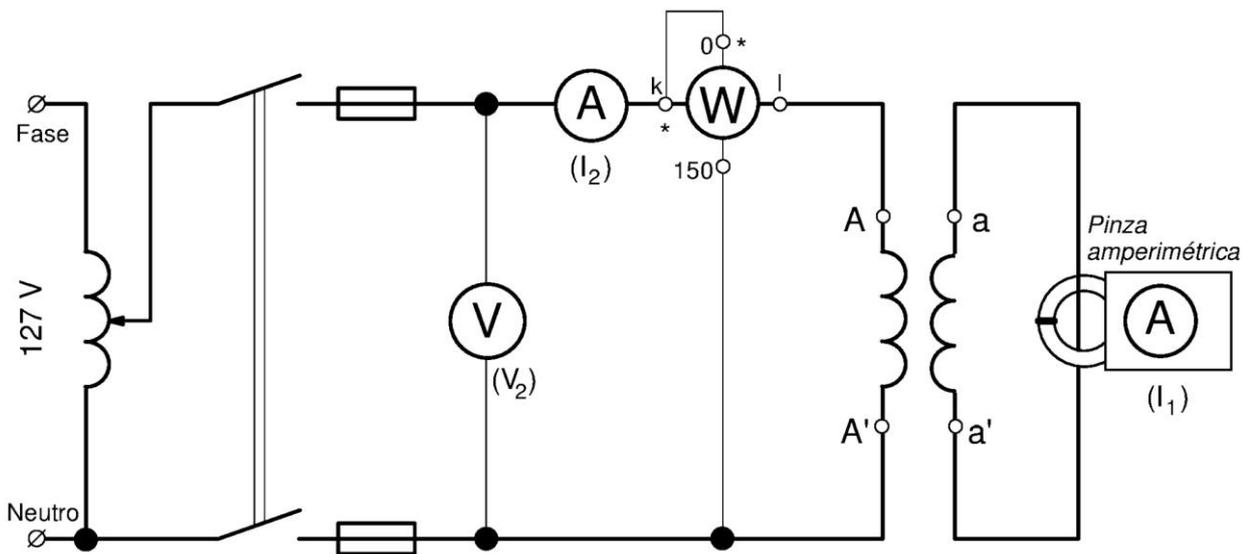
$$I_{1N} = \frac{I_{2N}}{m}$$

10. Parámetros del circuito equivalente deducidos del ensayo de cortocircuito			
φ_{cc} (°)	Z_{cc} (Ω)	R_{cc} (Ω)	X_{cc} (Ω)

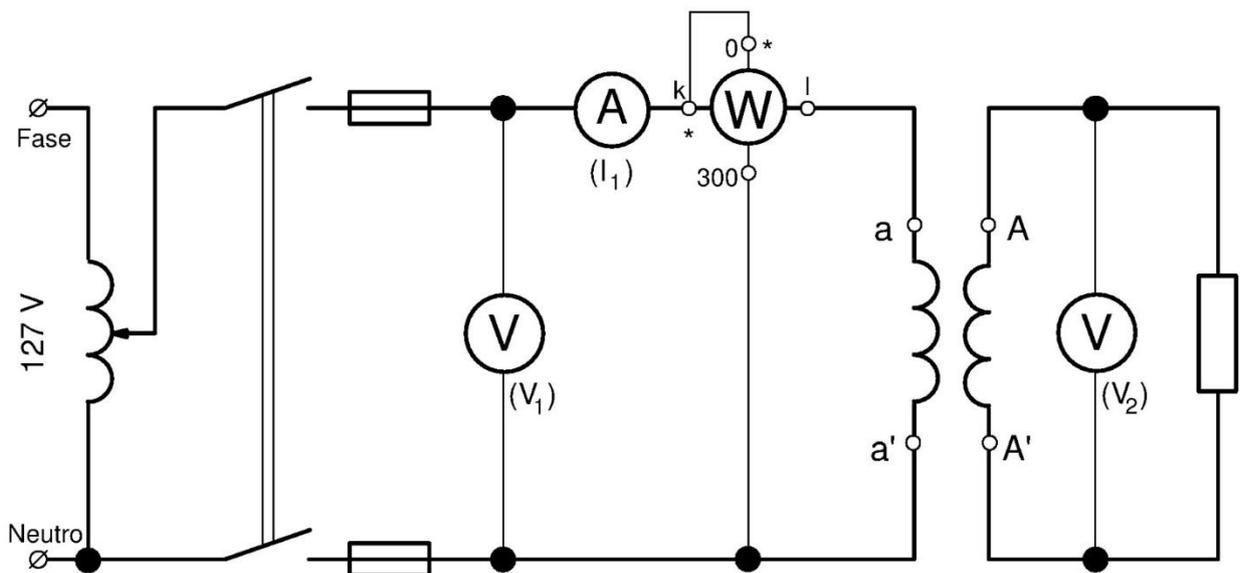
11. Otras magnitudes			
P_{Fe} (W)		P_{CuN} (W)	
ε_{cc} (%)		C_{opt}	
ε_{Rcc} (%)		I_{1falta} (A)	
$\varepsilon_{X_{cc}}$ (%)		I_{2falta} (A)	



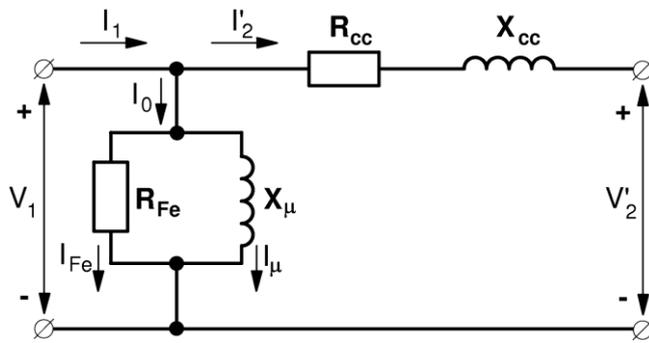
Circuito para el ensayo de vacío por el primario (Primario = devanado de B.T.)



Circuito para el ensayo de cortocircuito por el secundario (Primario = devanado de B.T.)



Circuito para el ensayo de caída de tensión (Primario = devanado de B.T.)



*Circuito equivalente
aproximado de un
transformador*

Observaciones: