

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ENERGÉTICA

DOCUMENTACIÓN DE LA PRÁCTICA DE LABORATORIO:

TRANSFORMADORES

1. INTRODUCCIÓN

Los ensayos de vacío y cortocircuito de un transformador permiten determinar varios de los parámetros más importantes que definen su comportamiento. A través de las mediciones efectuadas en los mencionados ensayos, y mediante el cálculo conveniente, se pueden determinar los parámetros del circuito equivalente simplificado del transformador. Dicho circuito resulta útil en el cálculo de las complejas redes de transporte y distribución, con varios escalones de tensión, previa reducción a una tensión base.

De otro lado, del ensayo de vacío se obtiene, además de la corriente de vacío, la relación de transformación y las pérdidas en el hierro del transformador. Como se sabe, dichas pérdidas son independientes del índice de carga del transformador.

Del ensayo de cortocircuito se deduce el importante parámetro de la tensión de cortocircuito. Este parámetro interviene, directamente, en la corriente de cortocircuito permanente, en las expresiones de la caída de tensión y en la asociación en paralelo de transformadores. Otro parámetro, de no menor importancia, es la potencia de pérdidas nominales en los devanados primario y secundario. De ambos tipos de pérdidas, en el hierro y en el cobre, se deduce el índice de carga óptimo del transformador, es decir, la carga, definida como porcentaje sobre la potencia nominal del transformador, en la que este trabaja con rendimiento máximo.

2. MEDIDAS DE RESISTENCIAS DE AISLAMIENTO. MEGOHMETRO

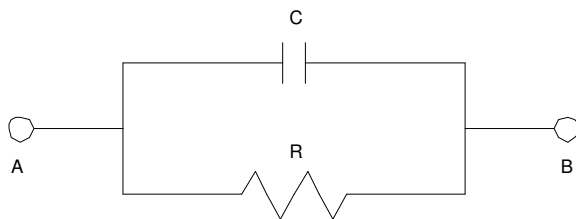


Figura 1: Circuito equivalente de un aislante

Los materiales aislantes presentan una resistencia elevada al paso de la corriente, pero ésta 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 figura 1, 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 corriente continua (c.c.) (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 corriente I 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 c.c. 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 los aparatos eléctricos se comprueba la resistencia de aislamiento entre los elementos que van a estar sometidos a tensión y entre ellos y la carcasa del aparato. Naturalmente, estas medidas se realizan con la máquina desconectada de la red.

Se suele exigir una resistencia mínima de un megaohmio para las máquinas con tensiones nominales de hasta 1000 V. Por otra parte, según la instrucción MI BT 017, las instalaciones de 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 250.000Ω .

La figura 1 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 condensador C durante la medición.

3. INTENSIDAD DE VACÍO DE UN TRANSFORMADOR MONOFÁSICO

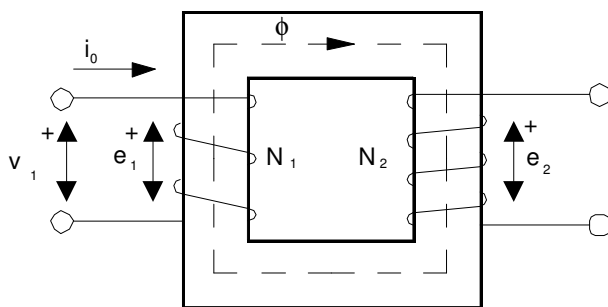


Figura 2: Transformador en vacío

En un transformador monofásico en vacío se verifican las siguientes relaciones (ver la figura 2):

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

En la expresión anterior v_1 representa la tensión de la red a la que está conectado el transformador y ϕ es el flujo que genera su devanado primario cuando está sometido a la tensión v_1 . 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 f.c.e.m. e_1 .

La tensión v_1 es senoidal 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 figura 3), por lo que si el flujo ϕ es senoidal, la intensidad i_0 no lo es. La forma de la intensidad de vacío de un transformador monofásico está representada en la figura 4.

El hecho de que la intensidad i_0 no sea senoidal 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 senoidal 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.

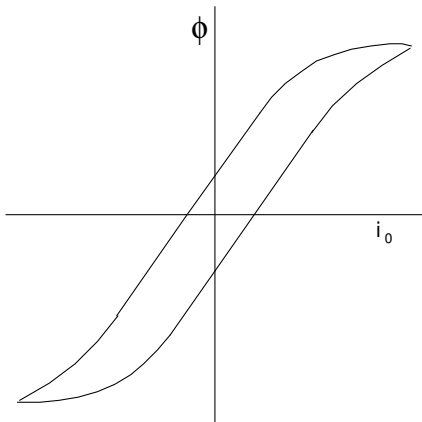


Figura 3: Curva flujo-intensidad

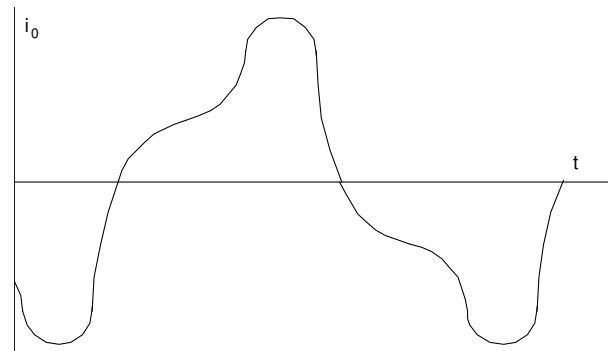


Figura 4: Forma de la corriente de vacío

4. ENSAYO DE VACÍO

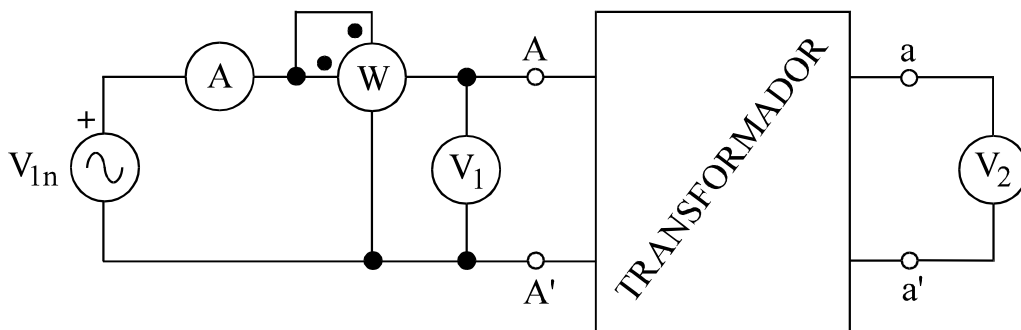


Figura 5.- Circuito para el ensayo de vacío.

En la figura 5, 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). Consiste en alimentar el primario (secundario) a la tensión nominal V_{1n} , con el secundario (primario) abierto ($I_2 = 0$), es decir, en vacío. A continuación, se anotan las lecturas de los aparatos de medida. Dichas lecturas, indican:

- Lectura voltímetro $V_1 =$ tensión nominal primaria, V_{1n} .
- Lectura amperímetro $A_1 =$ corriente de vacío, I_0 .
- Lectura vatímetro $W_0 =$ potencia perdida en el hierro, P_{Fe} .
- Lectura voltímetro $V_2 =$ tensión secundaria de vacío, V_{20} .

La lectura del vatímetro W_0 coincide con las pérdidas en el hierro, debido a que las pérdidas en el cobre del devanado secundario son nulas ($I_2 = 0$), y las pérdidas en el cobre del devanado primario ($R_1 I_1^2$) son despreciables debido a 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 figura 6(a).

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

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_{Fe}}{V_{In} I_0} \quad (1)$$

luego, las corrientes componentes de vacío, resultan:

$$I_{Fe} = I_0 \cos \varphi_0 \quad (2) \quad I_{\mu} = I_0 \sin \varphi_0 \quad (3)$$

La resistencia de pérdidas en el hierro y la reactancia magnetizante, se obtienen de:

$$R_{Fe} \approx \frac{V_{In}}{I_{Fe}} \quad (4) \quad X_{\mu} \approx \frac{V_{In}}{I_{\mu}} \quad (5)$$

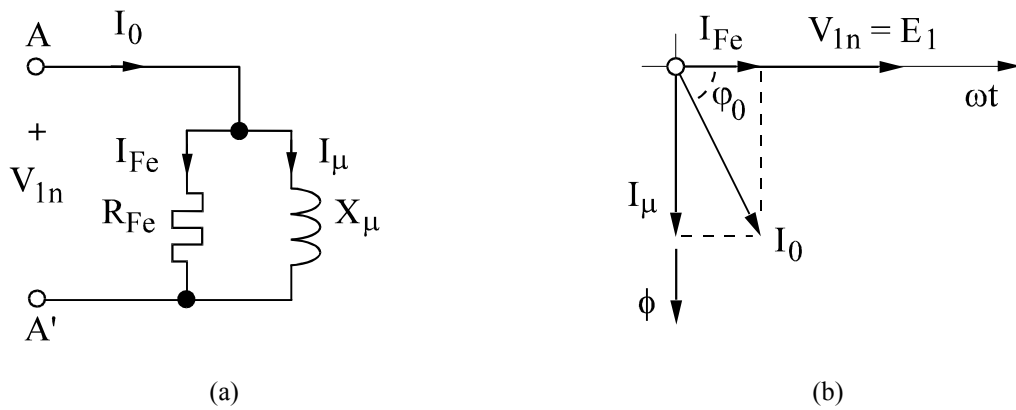


Figura 6.

Finalmente, la *relación de transformación*, vale:

$$m \approx \frac{V_{1n}}{V_{20}} \quad (6)$$

5. ENSAYO DE CORTOCIRCUITO

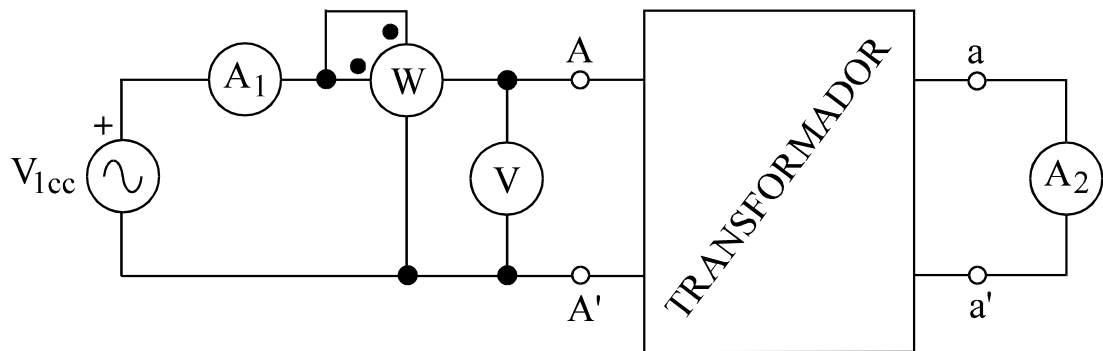


Figura 7.- Circuito para el ensayo de cortocircuito.

Este ensayo consiste en cortocircuitar el devanado secundario, aplicando una tensión primaria, sucesivamente creciente desde cero, hasta que por los devanados circule su corriente nominal. En la figura 7, se muestra el transformador y la conexión de los aparatos de medida necesarios (cuando el ensayo se realiza alimentando a la máquina por el primario).

En este caso, las lecturas de los aparatos de medida, indican:

- Lectura voltímetro V_1 = tensión primaria de cortocircuito, V_{Icc} .
- Lectura amperímetro A_1 = corriente nominal primaria, I_{1n} .
- Lectura vatímetro W_{cc} = potencia perdida en el cobre, en régimen nominal, $(P_{Cu})_n$.
- Lectura amperímetro A_2 = corriente nominal secundaria, I_{2n} .

Como la tensión aplicada, V_{Icc} (tensión de cortocircuito), para alcanzar la intensidad nominal con el secundario en cortocircuito es muy pequeña en comparación con la nominal ($V_{Icc} \approx 3-10 \% V_{1n}$), da lugar a que el flujo establecido también sea pequeño ($V_{Icc} \approx E_1 = 4,44 f N_1 \phi_m$), y por tanto, a que las pérdidas en el hierro sean despreciables ($P_{Fe} \approx Cte \cdot \phi_m^2$). Por consiguiente, la lectura del vatímetro, en este ensayo, mide las pérdidas en el cobre en régimen nominal, ya que por sus devanados circula la corriente nominal.

En consecuencia, dado el pequeño valor que representa la corriente de vacío I_0 , frente a la intensidad nominal I_{1n} , se desprecia la rama en derivación del circuito equivalente aproximado, como se muestra en la figura 8(a), lo que permite el cálculo de los parámetros de la rama en serie del mismo. En la figura 8(b), se muestra el correspondiente diagrama fasorial de cortocircuito.

De las lecturas de los aparatos de medida, se obtiene el *factor de potencia de cortocircuito*, φ_{cc} :

$$\cos \varphi_{cc} = \frac{(P_{Cu})_n}{V_{Icc} I_{1n}} \quad (7)$$

Las caídas de tensión en la resistencia y reactancia de cortocircuito, valen:

$$V_{Rcc} = V_{Icc} \cos \varphi_{cc} \quad (8) \quad V_{Xcc} = V_{Icc} \sin \varphi_{cc} \quad (9)$$

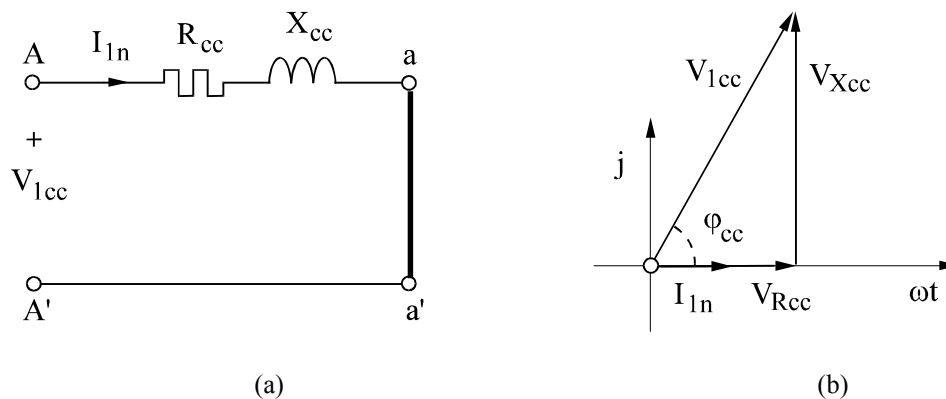


Figura 8.

La resistencia y reactancia de cortocircuito del circuito equivalente, son:

$$R_{cc} \approx \frac{V_{Rcc}}{I_{In}} \quad (10) \quad X_{cc} \approx \frac{V_{Xcc}}{I_{In}} \quad (11)$$

Recibe el nombre de *impedancia de cortocircuito*, Z_{cc} , de un transformador el valor:

$$Z_{cc} \approx \frac{V_{Icc}}{I_{In}} = \sqrt{R_{cc}^2 + X_{cc}^2} \quad (12)$$

6. OTROS PARÁMETROS DEDUCIDOS DE LOS ENSAYOS

6.1 Tensiones porcentuales de cortocircuito

Normalmente, las tensiones de cortocircuito, V_{Icc} , V_{Rcc} y V_{Xcc} , se expresan en tanto por ciento respecto de la tensión nominal, resultando, respectivamente, ε_{cc} , ε_{Rcc} y ε_{Xcc} :

$$\varepsilon_{Rcc} = 100 \frac{V_{Rcc}}{V_{In}} \quad (13) \quad \varepsilon_{Xcc} = 100 \frac{V_{Xcc}}{V_{In}} \quad (14) \quad \varepsilon_{cc} = 100 \frac{V_{Icc}}{V_{In}} \quad (15)$$

6.2 Corriente de cortocircuito permanente

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

La corriente de cortocircuito de un transformador I_{1falta} , no tiene nada que ver con el ensayo de cortocircuito.

La gran magnitud de dicha corriente puede provocar fuertes efectos térmicos y dinámicos sobre instalaciones y máquinas, de aquí que sea necesario conocer su valor al objeto del diseño de las protecciones adecuadas que posibiliten su eliminación.

La corriente de cortocircuito primaria se deduce del circuito equivalente, reducido al primario, del transformador en carga, representado en la figura 7(a):

$$I_{1falta} = 100 \frac{I_{In}}{\varepsilon_{cc}} \quad (16)$$

La corriente de cortocircuito secundaria se relaciona con la primaria a través de la relación de transformación:

$$I_{2falta} = m I_{1falta} \quad (17)$$

6.3 Índice de carga óptimo

El rendimiento máximo del transformador se tiene cuando las pérdidas en el cobre, en régimen nominal, se igualan a las pérdidas en el hierro. Se deduce que el índice de carga óptimo C_{opt} , que produce el máximo rendimiento, para un factor de potencia de la carga dado, vale:

$$C_{opt} = \sqrt{\frac{P_{Fe}}{(P_{Cu})_n}} \quad (18)$$

7. REALIZACIÓN PRÁCTICA

COMPONENTES Y ACCESORIOS

Regleta y módulos:

- El circuito estará conectado entre una *fase* y el *neutro* (127 V) del circuito de 3x220/127 V de la regleta.
- Módulo con interruptor y fusibles de 10 A.
- Módulo con autotransformador monofásico de regulación continua de 0-250 V, 4,1 A. (Al alimentarlo a 127 V, su salida pueda variar entre 0 y 145 V)

Otros materiales utilizados:

- Un megóhmetro.
- Un vatímetro electrodinámico para factores de potencia bajos: 0-150/300 V, 0-2,5/5 A, $\cos\phi$ máximo 0,33, con 250 divisiones. Clase I.
- Un amperímetro de hierro móvil de 2,5/5 A. Clase I.
- Un polímetro digital que tenga los alcances 200 y 20 V c.a.
- Un polímetro analógico con los alcances 250 V c.a. y 10 A c.a.
- Un transformador de intensidad de laboratorio que tenga, al menos, la relación $K_i = 1,5/5$ A.
- Un transformador monofásico 700 VA, 200/100 V, 3,5/7 A.
- Cables de conexiones.

CONEXIONES A REALIZAR

Véanse los esquemas de montaje en las páginas siguientes.

PROCEDIMIENTO A SEGUIR

Resistencias de aislamiento:

1. Con el transformador desconectado de la red, utilice el megóhmetro para medir las resistencias de aislamiento entre los devanados de alta y baja tensión (R_{AB}) y entre éstos y la carcasa del transformador (R_{AC} , R_{BC}).

2. Anote las medidas realizadas y compruebe que estas resistencias de aislamiento son aceptables.

Ensayo de vacío:

1. Montar el circuito de la figura 9 (ver el esquema de montaje de las páginas siguientes). Obsérvese que el amperímetro y el circuito amperimétrico del vatímetro están conectados al circuito a través de un transformador de intensidad de 1,5/5 A.
2. Este ensayo se realizará alimentando el transformador por el lado de B.T.
3. La corriente y la potencia se medirán con aparatos analógicos cuyo alcance de tensión será 150 V y de corriente 2,5 A. La tensión primaria se medirá con un polímetro digital, en el alcance de 200 Vc.a., y la tensión secundaria se medirá con un polímetro analógico en el alcance de 250 Vc.a.
4. Antes de dar tensión al circuito, cerciorarse de que el autotransformador suministrará inicialmente una tensión de cero voltios.
5. Tras la comprobación del circuito por parte del profesor, dar tensión al circuito y regular el autotransformador para que suministre 100 V.
6. Anotar la lectura de los aparatos de medida, la constante de medida del vatímetro (K_W) y la relación de transformación (K_i) del transformador de intensidad.
7. Quitar tensión al circuito y volver a regular el autotransformador para que proporcione una tensión nula.

Ensayo de cortocircuito:

1. Montar el circuito de la figura 10 (ver el esquema de montaje de las páginas siguientes).
2. Este ensayo se realizará alimentando el transformador por el lado de A.T.
3. La corriente y la potencia se medirán con aparatos analógicos cuyo alcance de tensión será 150 V y de corriente 5 A. La tensión primaria se medirá con un polímetro digital, en el alcance de 20 Vc.a., y la intensidad secundaria se medirá con un polímetro analógico en el alcance de 10 Ac.a.
4. Antes de dar tensión al circuito, cerciorarse de que el autotransformador suministrará inicialmente una tensión de cero voltios.
5. Tras la comprobación del circuito por parte del profesor, dar tensión al circuito e ir aumentando la tensión de salida del autotransformador hasta que por el lado de A.T. del transformador circule la corriente nominal (3,5 A).
6. Anotar la lectura de los aparatos de medida y la constante de medida del vatímetro (K_W).
7. Obsérvese que por el secundario también circula su corriente nominal (7 A).
8. Quitar tensión al circuito y volver a regular el autotransformador para que proporcione una tensión nula.

RESULTADOS A OBTENER

1. Calcular los verdaderos valores medidos de la corriente y de potencia en los ensayos de vacío y de cortocircuito, teniendo en cuenta la constante del vatímetro en cada ensayo y, en el caso del ensayo de vacío, la relación de transformación del transformador de intensidad.

2. Los parámetros del circuito equivalente que se van a obtener estarán referidos al lado de A.T. Por lo tanto, las medidas del ensayo de vacío habrá que referirlas al lado de A.T.
3. Para el ensayo de vacío, determinar la corriente y factor de potencia de vacío, las pérdidas en el hierro, la resistencia de pérdidas en el hierro y la reactancia magnetizante.
4. Para el ensayo de cortocircuito, determinar la tensión y factor de potencia de cortocircuito, las pérdidas nominales en el cobre, y la resistencia, reactancia e impedancia de cortocircuito.
5. Completar mediante cálculo las siguientes magnitudes: tensiones porcentuales de cortocircuito, corrientes permanentes de cortocircuito primaria y secundaria, así como, el índice de carga óptimo del transformador.

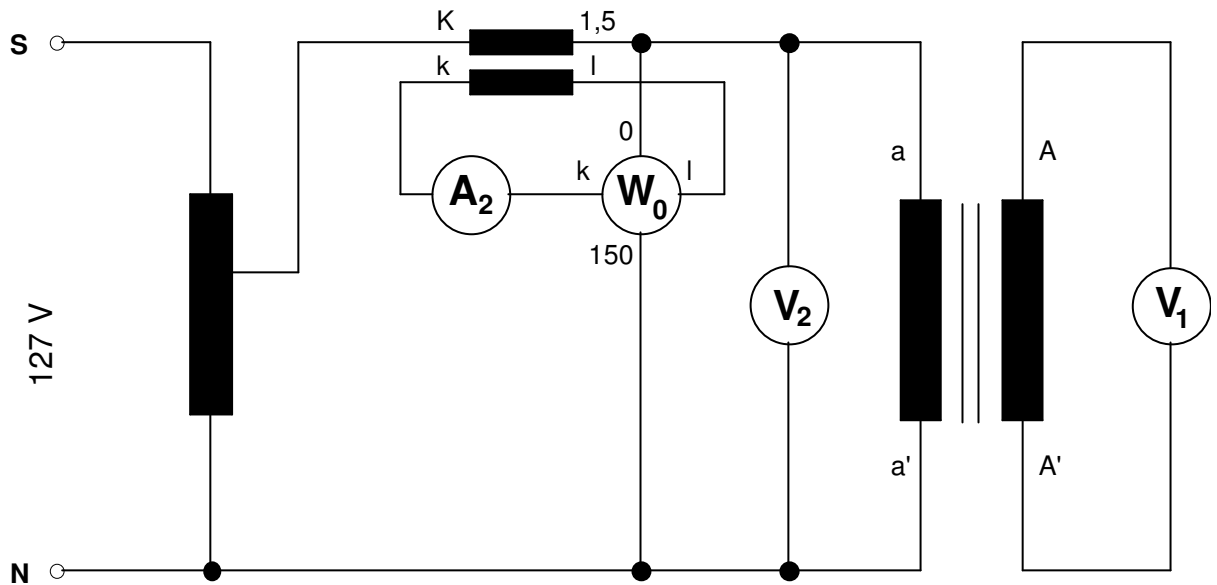


Figura 9: Ensayo de vacío.

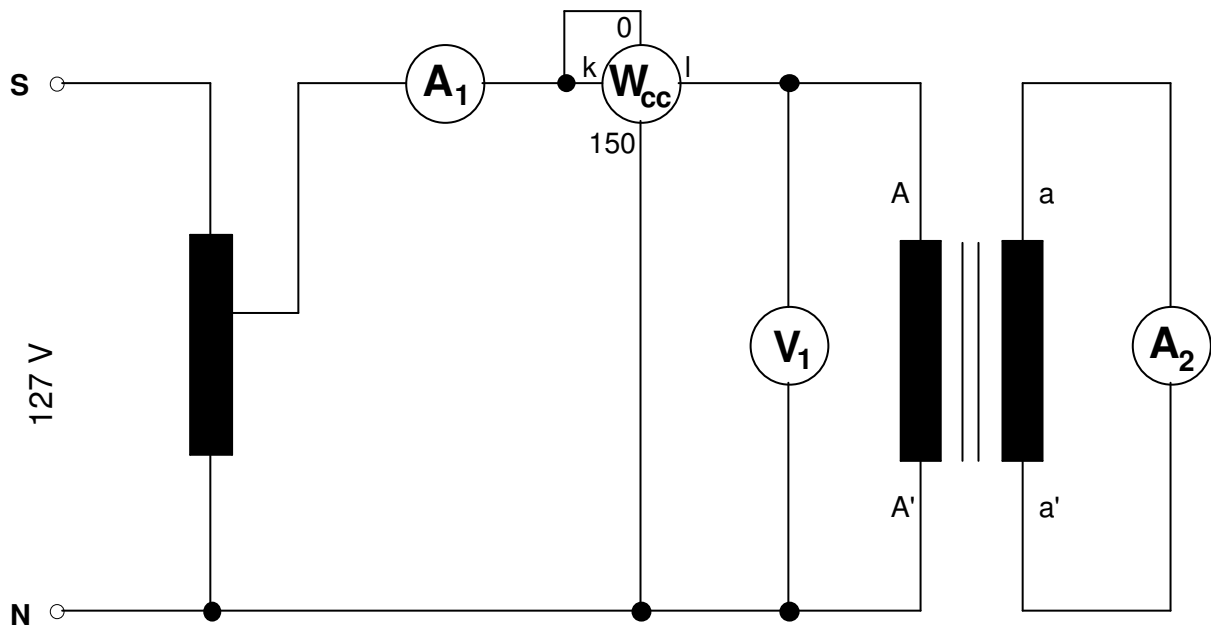
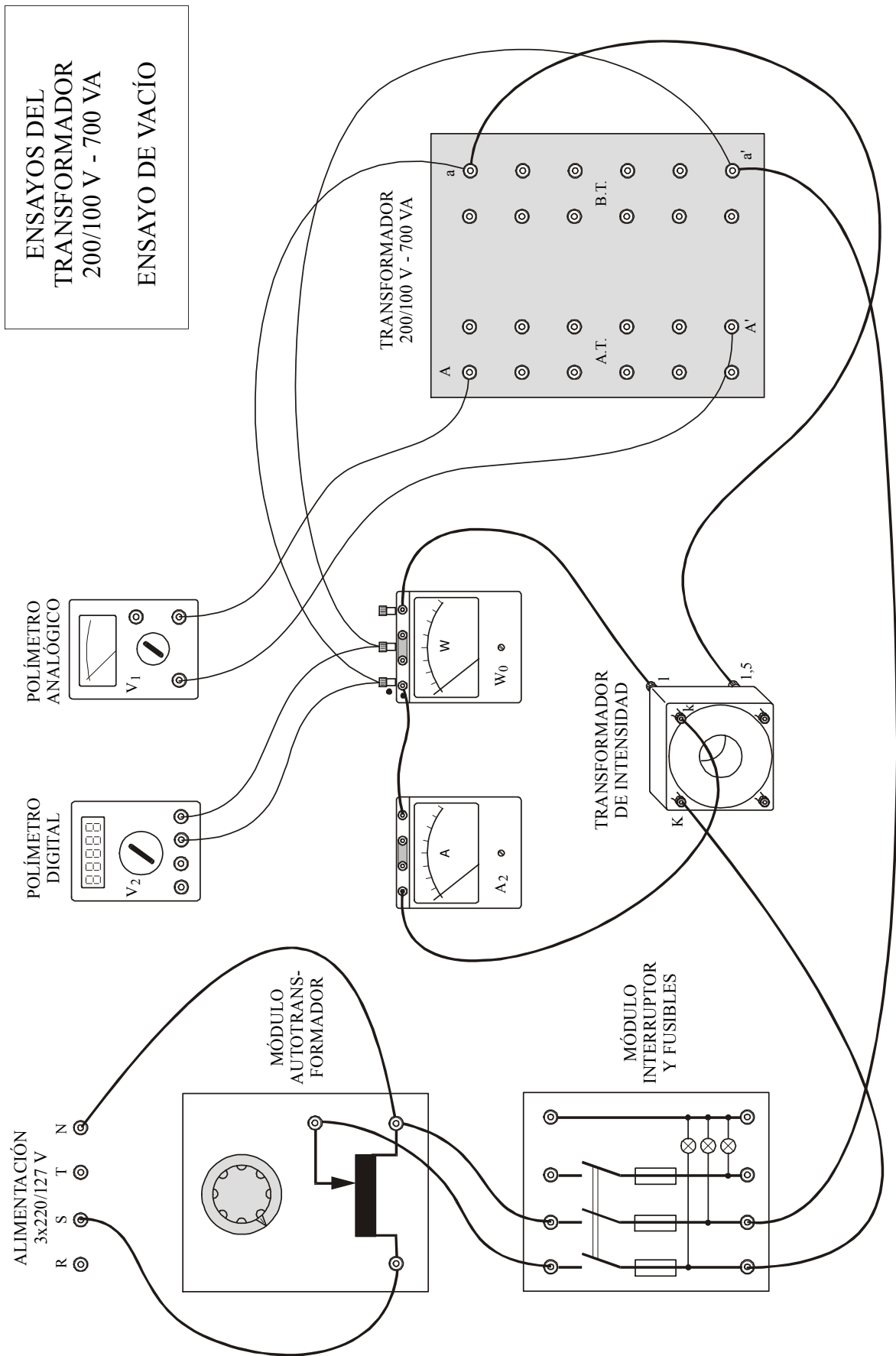
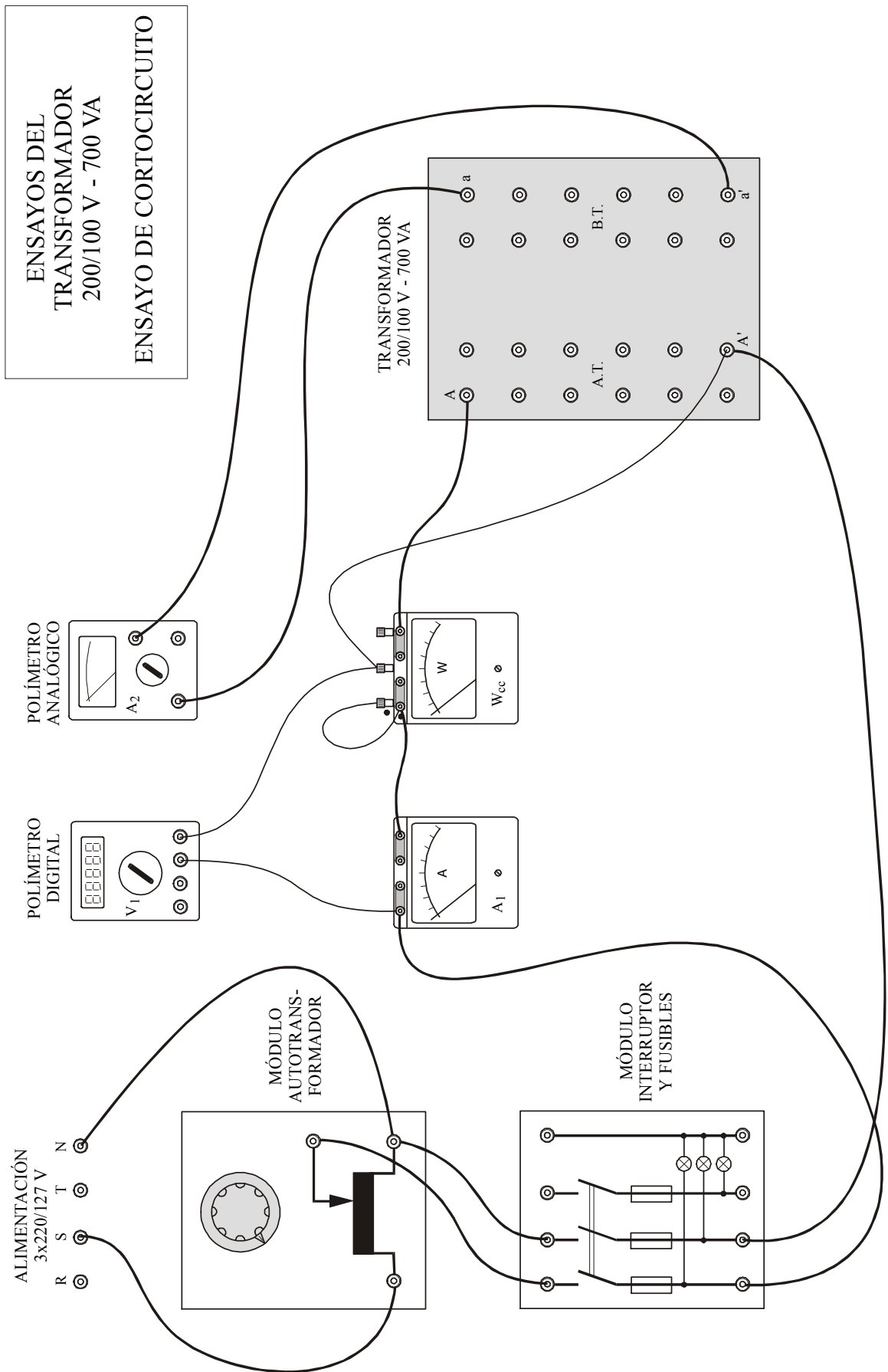


Figura 10: Ensayo de cortocircuito.





UNIVERSIDAD DE CANTABRIA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ENERGÉTICA
 DOCUMENTACIÓN DE LA PRÁCTICA DE LABORATORIO: TRANSFORMADORES

(En esta página se muestra un ejemplo de cómo rellenar la hoja de resultados de esta práctica)

Medidas durante los ensayos:

Resistencias de aislamiento		
R_{AB} (MOhms)	R_{AC} (MOhms)	R_{BC} (MOhms)
1000	1000	1000

Ensayo de vacío					
K_W (W/div)	K_i	V_1 (V)	V_2 (V)	A_2 (A)	W_0 (div)
0,5	1,5/5 A	200	100	1,2	80

Ensayo de cortocircuito				
K_W (W/div)	V_1 (V)	A_1 (A)	A_2 (A)	W_{cc} (div)
1	12	3.5	7	36

Resultados finales:

Valores nominales del transformador			
S_n (VA)		700	
V_{1n} (V)	200	I_{1n} (A)	3,5
V_{20} (V)	100	I_{2n} (A)	7

m	2	ϵ_{cc} (%)	6
P_{Fe} (W)	12	ϵ_{Rcc} (%)	5,14
$(P_{Cu})_n$ (W)	36	ϵ_{Xcc} (%)	3,1

Parámetros circuito equivalente red. al primario			
φ_0 (°)	70,5	X_{cc} (Ω)	1,77
R_{Fe} ($k\Omega$)	3,34	Z_{cc} (Ω)	3,43
X_{μ} ($k\Omega$)	1,18	I_{1falta} (A)	58,3
φ_{cc} (°)	31	I_{2falta} (A)	116,7
R_{cc} (Ω)	2,94	C_{opt}	0,577

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA ELECTRICA Y ENERGETICA

Práctica de Laboratorio: TRANSFORMADOR

Nombre del alumno _____

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

Referencia del transformador ensayado: _____

Características de los aparatos de medida empleados:

Tipo de aparato	Magnitud que mide	Referencia	Sistema indicador	Clase de precisión	Alcances	Nº de divisiones de la escala	Ctes. de medida

Medidas durante los ensayos:

Resistencias de aislamiento		
R_{AB} (MOhms)	R_{AC} (MOhms)	R_{BC} (MOhms)

Ensayo de vacío					
K_W (W/div)	K_i	V₁ (V)	V₂ (V)	A₂ (A)	W₀ (div)

Ensayo de cortocircuito				
K_W (W/div)	V₁ (V)	A₁ (A)	A₂ (A)	W_{cc} (div)

Resultados finales:

Valores nominales del transformador			
S_n (VA)			
V_{1n} (V)		I_{1n} (A)	
V₂₀ (V)		I_{2n} (A)	

m		ε_{cc} (%)	
P_{Fe} (W)		ε_{Rcc} (%)	
(P_{Cu})_n (W)		ε_{Xcc} (%)	

Parámetros circuito equivalente red. al primario			
φ₀ (°)		X_{cc} (Ω)	
R_{Fe} (kΩ)		Z_{cc} (Ω)	
X_μ (kΩ)		I_{1falta} (A)	
φ_{cc} (°)		I_{2falta} (A)	
R_{cc} (Ω)		C_{opt}	

Observaciones: