

MEDIDAS ELÉCTRICAS PARA MANTENIMIENTO PERIÓDICO DE TRANSFORMADORES MT/BT

Luis Carlos Sosa



Megger[®]



Geraldine Dayan

Directora de Marketing
Megger España y Portugal

geraldine.dayan@megger.com

Megger[®]

¿Qué es Megger Academy?

Megger Academy es una iniciativa de **Megger** para promover la formación y actualización de los profesionales de la industria Eléctrica.

- Webinars gratuitos
- Cursos avanzados
- Colaboración con cursos de formación

es.megger.com/megger-academy

Megger®



PRÓXIMOS EVENTOS



ELÉTRICA | 13-16 OCTUBRE | OPORTO/PORTUGAL

Exposição de Material Elétrico e Eletrónica



ARWTR2022 | 24-26 OCTUBRE | BAIONA/VIGO

El 7º Taller Internacional de Investigación Avanzada sobre transformadores



MATELEC | 15-18 NOV | MADRID

Feria de referencia para la industria eléctrica, electrónica y de telecomunicaciones

es.megger.com/eventos



SÍGUENOS EN LAS REDES SOCIALES



<https://www.linkedin.com/showcase/megger-espana-portugal>



<https://www.facebook.com/meggeres>



<https://twitter.com/MeggerES>





Especialista en pruebas de Commissioning, para cables de media y alta tensión, pruebas en transformadores de potencia, Coordinador de Proyectos, Energía Solar, equipos de ensayos no destructivos y Protección Catódica.



PONENTE

Luis Carlos Sosa

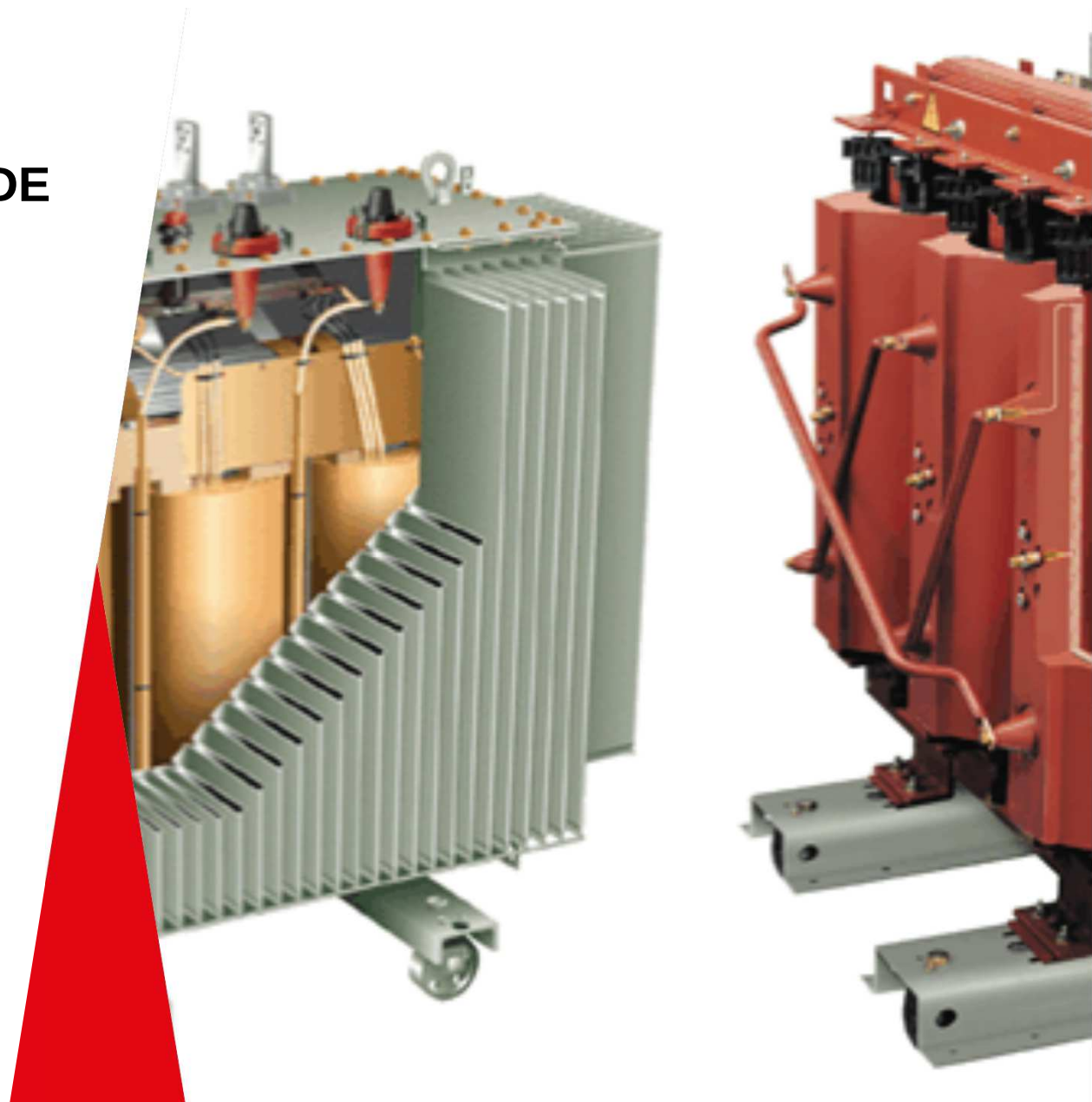
Asesor Técnico y Comercial
Megger España & Portugal

luis.sosa@megger.com

Megger ^R

MEDIDAS ELÉCTRICAS PARA MANTENIMIENTO PERIÓDICO DE TRANSFORMADORES MT/BT

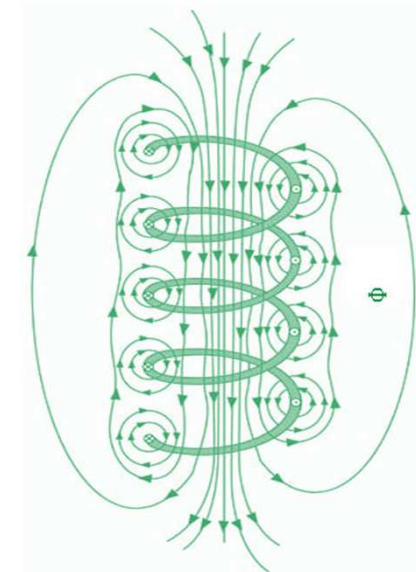
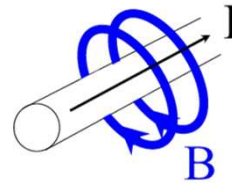
Megger®



PRINCIPIOS DEL TRANSFORMADOR

TEORÍA

- La **Corriente** (A) pasa a través de un conductor y produce una fuerza de campo magnético
- El **campo magnético** se denomina **B** y su unidad es la Tesla (T)

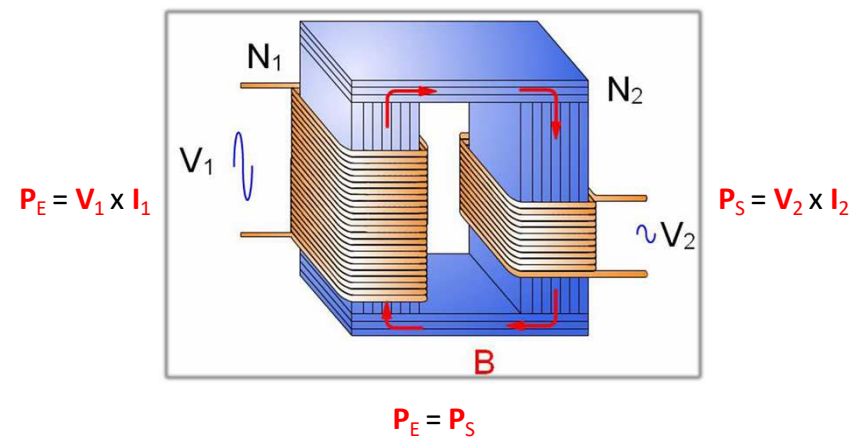


PRINCIPIOS DEL TRANSFORMADOR

TEORÍA

- **Ley de Faraday:** Una fuente de energía aplica una corriente AC que pasa por el devanado primario, produce una densidad de flujo magnético que varía en el tiempo sobre el núcleo.
- Este flujo también pasa a través del secundario induciendo un voltaje en el secundario.
- Cuando la carga esta conectada al secundario, la corriente fluye según la impedancia de la carga

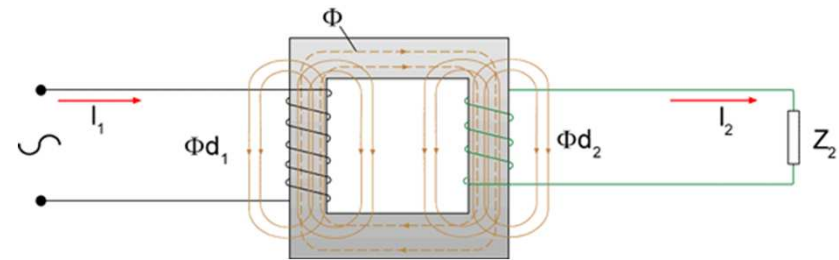
$$\epsilon = \int E \cdot dl = - \frac{d}{dt} \Phi = - \frac{d}{dt} \cdot \int B \cdot dS$$



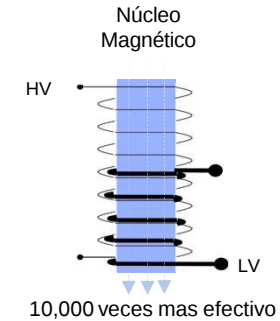
PRINCIPIOS DEL TRANSFORMADOR

TEORÍA

- La intensidad que circula por el primario (I_1) y consecuentemente la intensidad que circula por el secundario (I_2) crean un **flujo común Φ**

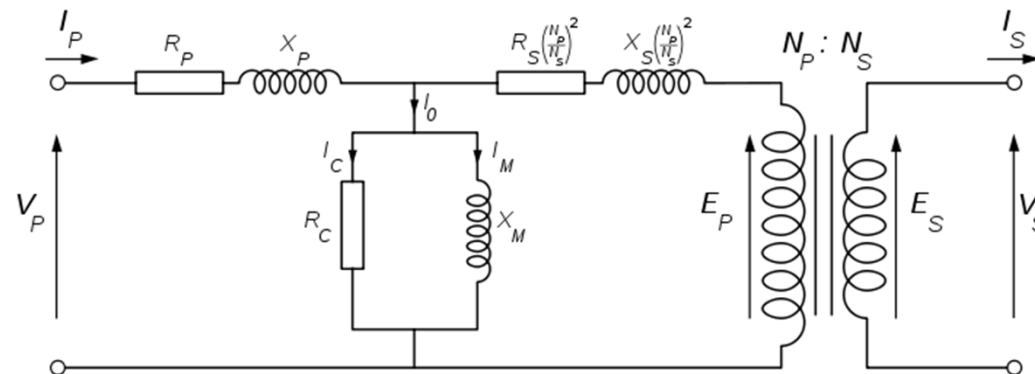
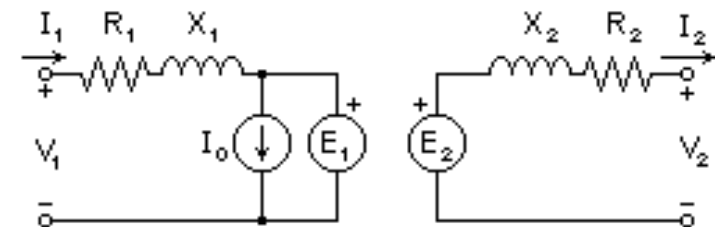
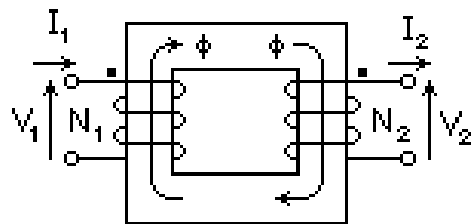


- Cada bobinado crea un flujo que no es abrazado por el otro (Φ_{d1} y Φ_{d2}). **Flujo de dispersión**



PRINCIPIOS DEL TRANSFORMADOR

ESQUEMA ELÉCTRICO

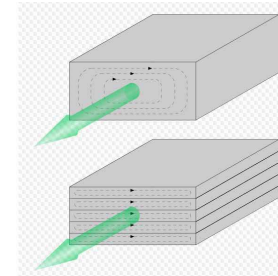


PARTES DEL TRANSFORMADOR

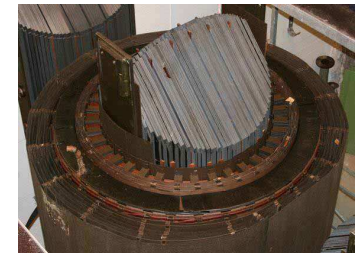
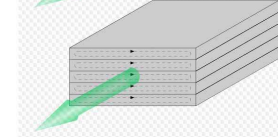
NÚCLEO

- Chapas de Acero al Silicio (3% reduce histéresis)
- Su objetivo es canalizar el flujo magnético Φ
- Esta compuesto por columnas y culata
- Se concentran las mayores pérdidas

Malo



Bueno

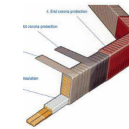


PARTES DEL TRANSFORMADOR

AISLAMIENTO

■ PRIMARIO

- Aislar los potenciales y proveer soporte mecánico
- CELULOSA; papel Kraft, envoltura del Devanado, Papel Crepe, Madera Eléctrica, etc



■ SECUNDARIO

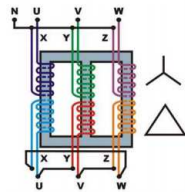
- Aislar potenciales, reducir calentamiento, mantiene alejada la humedad
- Aceite Mineral, Natural, Silicona, Aire, Nitrógeno, SF6



PARTES DEL TRANSFORMADOR

BOBINA

- Paso de electricidad
- Hilos o platina de Cobre o Aluminio cubiertas de aislante
- Sus arrollamientos pueden estar conectados en:
 - Estrella (Y)
 - Triángulo (D)
 - Zig-zag (Z)



PARTES DEL TRANSFORMADOR

BORNAS

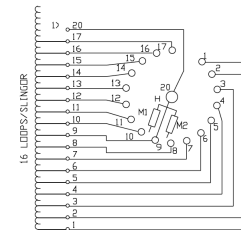
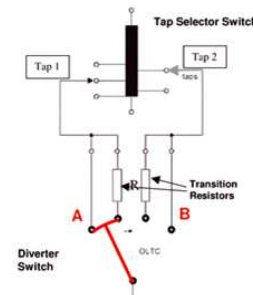
- Elementos del transformador donde existe una **gran concentración de esfuerzo dieléctrico** en muy **reducido volumen**
- Su **vida útil es menor** que la del propio transformador
- Se recomienda realizar con **mayor periodicidad** las pruebas y análisis de diagnóstico que en otros componentes del transformador



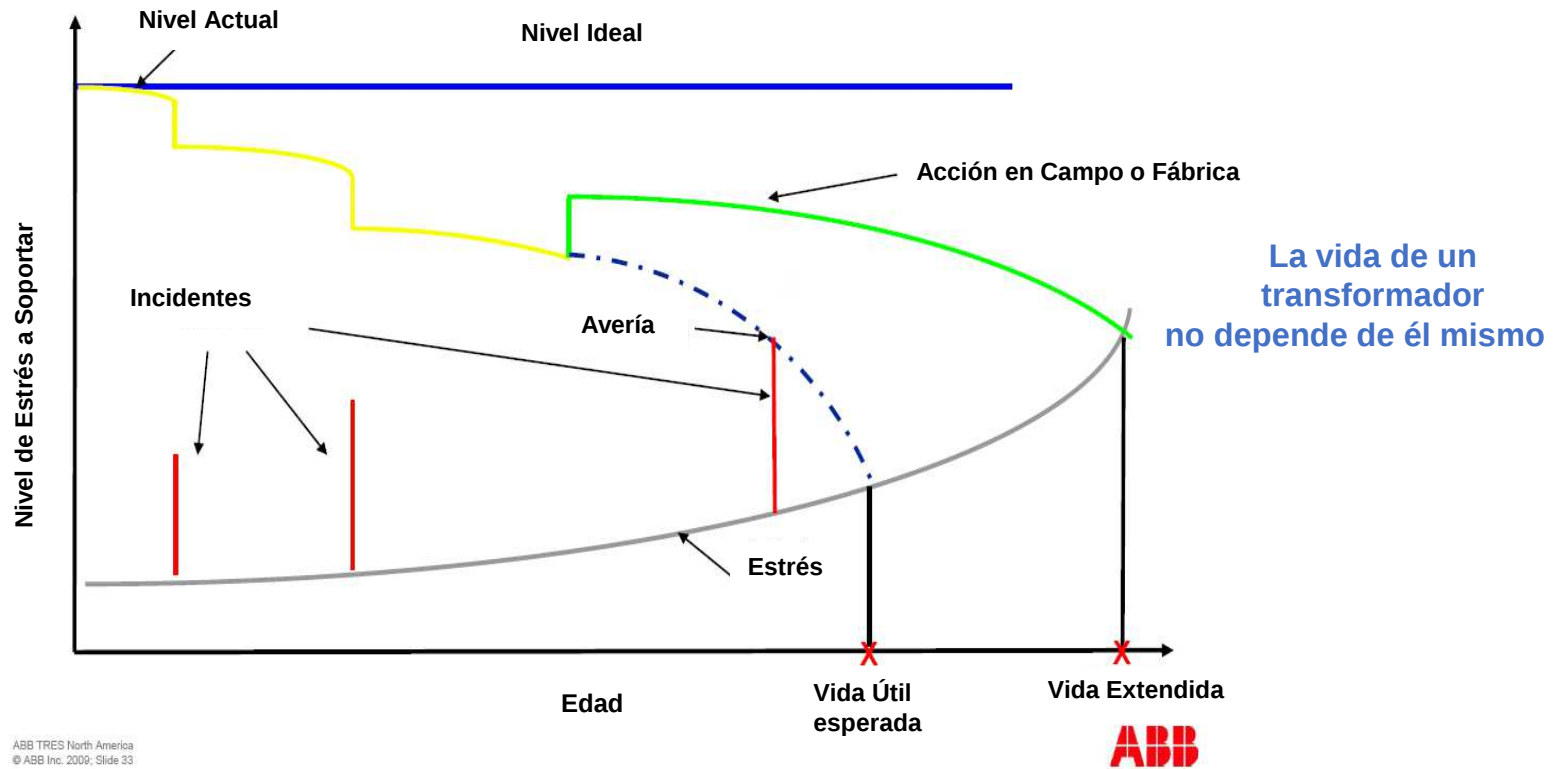
PARTES DEL TRANSFORMADOR

CAMBIADOR DE TOMAS

- Es el **componente del transformador donde se desarrollan mayores esfuerzos eléctricos**
- Donde se acumula la mayor contaminación. La carbonización de los contactos y la degradación del aceite son el principal motivo de los fallos
- Tiene **menor vida útil** que el resto de partes del transformador



VIDA DE UN TRANSFORMADOR



VIDA DE UN TRANSFORMADOR

FACTORES DE ESTRÉS

■ Térmico

- Afecta a todos los componentes. Envejece el material dieléctrico (incluso a temperaturas nominales). El estrés aumenta con temperaturas altas y con cambios repetidos en la temperatura.

■ Químico

- La celulosa descompuesta crea agua en el aislamiento sólido
- Aditivos en el aceite pueden deteriorar componentes del aislamiento.

■ Eléctrico

- El material aislante separa conductores a diferentes potenciales. Esto envejece el material dieléctrico (incluso a tensión nominal). Incidentes y maniobras en la red producen estreses eléctricos

■ Mecánico

- Deformaciones / desplazamientos de los elementos ensamblados. Golpes durante su transporte. Altas corrientes de cortocircuitos deforman los bobinados.

■ Ambiental

- El agua puede entrar a través de juntas con fugas.
- La sal y otras sustancias corrosivas en el ambiente pueden deteriorar tanques y equipos periféricos.

Altas temperaturas y el agua deterioran a todos los transformadores.

TIPOS DE ENSAYO

CIGRE TB 445

		Aislamiento entre espiras	Aislamiento bobinas / Bornas	Continuidad bobinas / Bornas /OLTC	Geometría del Bobinado	Aislamiento Circuito Magnético	Integridad Circuito Magnético
B A S I C O S	Relación Transformación	•					
	Resistencia Bobinado			•			
	Corriente Excitación	•					•
	Capacidad y Tangente Delta		•		•	•	•
	Reactancia de fuga				•		
	Resistencia Aislamiento		•			•	
	Tierra Núcleo					•	
A V A N Z A D O S	FRSL			•	•		
	SFRA	•			•	•	•
	Polarización / Despolarización		•				
	DFR		•				
	RVM		•				
	Detección Eléctrica DP	•	•				
	Detección Acústica DP	•	•				
	Detección UHF DP	•	•				

TIPOS DE ENSAYO

IEEE

Tipos de ensayo ESTÁNDAR (IEEE)		
ELEMENTO VERIFICADO		ENSAYO
Bobinas		Resistencia
		Ratio/polaridad
		Corriente de excitación
		Impedancia de cortocircuito
		Análisis de respuesta de frecuencia – SFRA -
		Resistencia del aislamiento
		Capacidad
		Tangente delta
Bornas		Respuesta de frecuencia dieléctrica – DFR-
		Capacidad
		Tangente delta
Aceite aislante		Resistencia
		Ratio
		Continuidad (antes de la pausa)
Cambiador de tomas	En carga	Resistencia dinámica (DRM)
		Corriente de excitación
		Análisis de respuesta de frecuencia – SFRA -
		Tiempo de contacto (DRM)
	Sin carga	Resistencia
		Corriente de excitación
		Ratio
		Continuidad (antes de la pausa)
Núcleo		Resistencia
		Ratio
		Continuidad (antes de la pausa)
		Resistencia dinámica (DRM)

ENSAYOS BÁSICOS DE RUTINA

IEEE C57,152-2013 / IEC 60076-1

- Resistencia del aislamiento
- Relación de transformación y polaridad
- Resistencia de bobinados
- Corriente de excitación
- Impedancia de cortocircuito / Reactancia dispersión
- Rigidez dieléctrica del aceite



RESISTENCIA DE AISLAMIENTO

OBJETIVO

Verificar que el aislamiento del transformador posee una alta resistencia al paso de corriente entre elementos con diferente potencial.



MIT /S1 5,10, 15 kV
Equipo de medición de resistencia del aislamiento hasta 15 kV

RESISTENCIA DE AISLAMIENTO

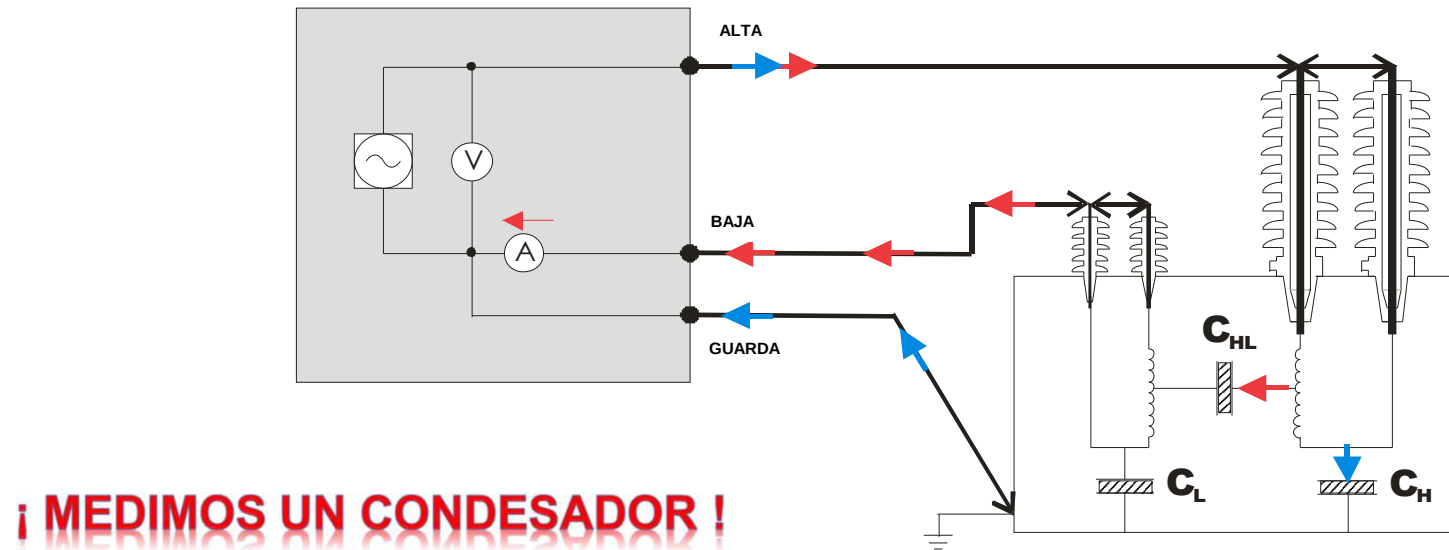
METODOLOGÍA

- La medida se realiza normalmente a 5 kV
- Factores que afectan la prueba:
 - Contaminación en el aislamiento
 - Humedad
 - Temperatura.

Tensión CA del Trafo	Tensión medición CC
$X \leq 100 \text{ V}$	$100 \text{ V} \leq X \leq 250 \text{ V}$
$440 \text{ V} \leq X \leq 550 \text{ V}$	$500 \text{ V} \leq X \leq 1.000 \text{ V}$
2.400 V	$1.000 \text{ V} \leq X \leq 2.500 \text{ V}$
$X \geq 4.160 \text{ V}$	$X \geq 5.000 \text{ V}$

RESISTENCIA DE AISLAMIENTO

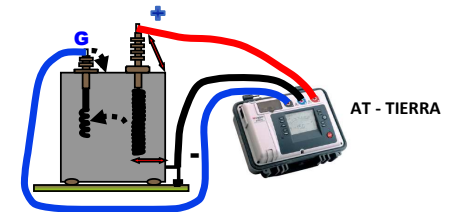
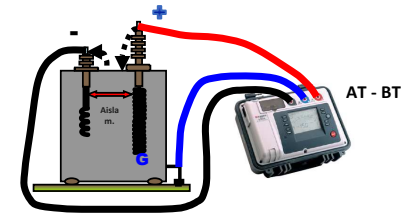
METODOLOGÍA



RESISTENCIA DE AISLAMIENTO

METODOLOGÍA

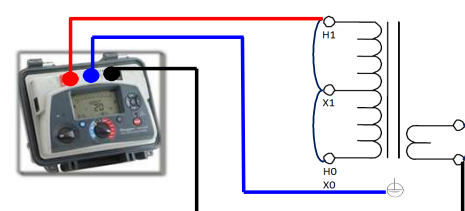
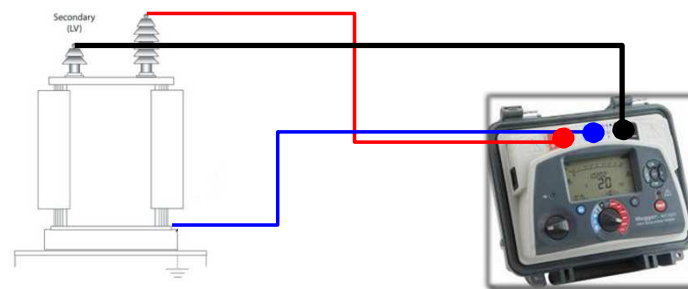
- Medida entre devanados, y estos con tierra.
- Se aconseja el uso de un tercer cable (guarda) para eliminar corrientes superficiales.
- Tipos de medida más usuales:
 - Medida del valor absoluto
 - Medida del índice de polarización (PI)
 - Medida del índice de absorción dieléctrica (DAR)



RESISTENCIA DE AISLAMIENTO

METODOLOGÍA

- Trafo de 2 devanados
 - Primario vs Secundario, Guarda a cuba.
 - Primario vs Cuba , Guarda a Secundario.
 - Secundario vs Cuba, Guarda a Primario
- Auto -Trafo de 3 devanados
 - Primario vs terciario , Guarda a cuba.
 - Primario vs Cuba , Guarda a terciario.
 - Terciario vs Cuba, Guarda a Primario

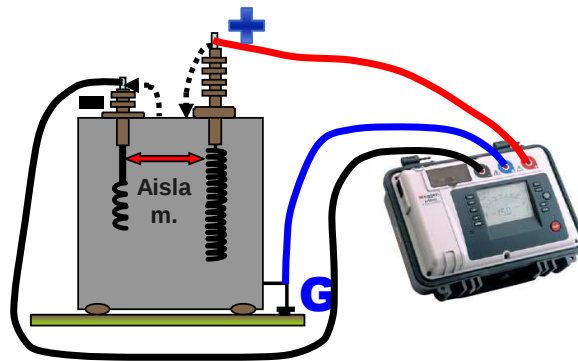


- Positivo
- Guarda
- Negativo

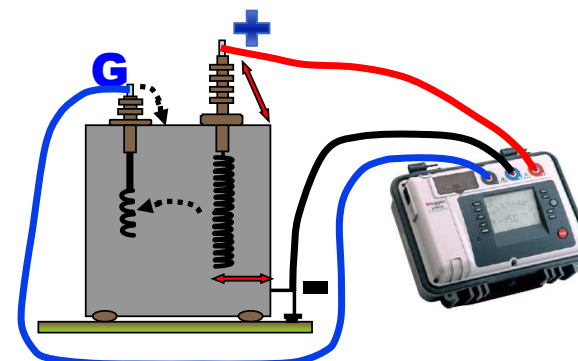
RESISTENCIA DE AISLAMIENTO

USO DEL GUARDA

- Positivo
- Guarda
- Negativo



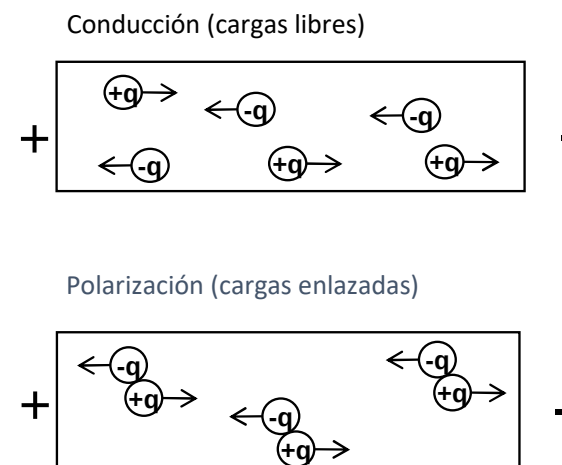
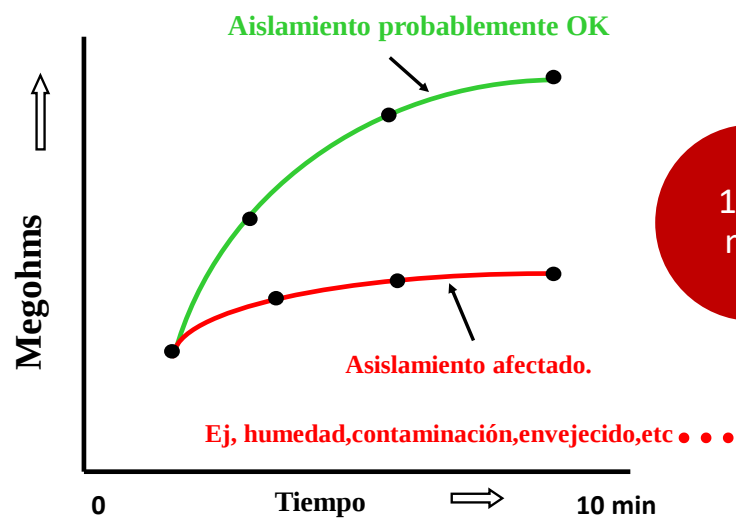
AT - BT



AT - TIERRA

RESISTENCIA DE AISLAMIENTO

ÍNDICE DE POLARIZACIÓN



RESISTENCIA DE AISLAMIENTO

ANÁLISIS DE RESULTADOS

- La resistencia de aislamiento debe ser como mínimo 1 MΩ por cada 1 kV de tensión de servicio, con un valor mínimo de 1 MΩ.

ESTADO AISLAMIENTO	1 min
Peligroso	<500 MΩ
Bueno	>500 MΩ

- Para la medición del índice de polarización:

ESTADO AISLAMIENTO	PI 10/1
Peligroso	$x < 1$
Cuestionable	$1 \leq x \leq 2$
Bueno	$2 < x \leq 4$
Excelente	$4 < x$

RESISTENCIA DE AISLAMIENTO

DEFECTOS DETECTABLES

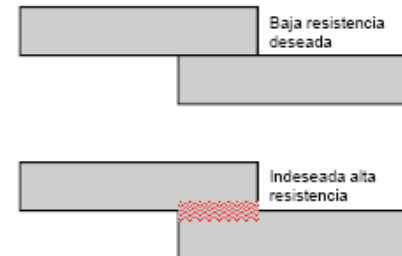
- Devanados en cortocircuito.
- Devanados en cortocircuito con el núcleo.
- Devanados en cortocircuito con la cuba.
- Aislamiento papel-aceite en un pobre estado.



RESISTENCIA DE LOS DEVANADOS

OBJETIVO

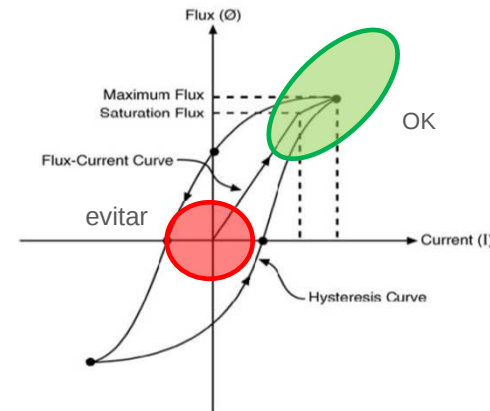
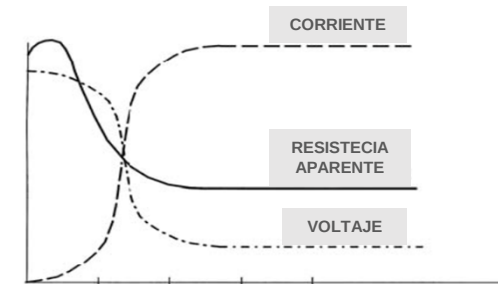
Verificar la condición electromecánica del transformador a través de la medición de la resistencia de sus devanados (para cada posición de conmutador) aplicando una tensión y corriente de CC.



RESISTENCIA DE LOS DEVANADOS

METODOLOGÍA

- Se debe saturar el núcleo
- La corriente de prueba de ser aproximadamente del 1% de la corriente nominal
- Nunca se debe exceder el 15% de la corriente nominal
- Si la corriente de prueba es demasiado baja, la resistencia medida no será correcta



RESISTENCIA DE LOS DEVANADOS

METODOLOGÍA

- La resistencia óhmica varías con la temperatura
- La medición se corrige a la temperatura de elevación de la unidad + 20 °.

- Para el caso de devanados de cobre la corrección es:

$$R_{20^{\circ}C} = R_m \frac{(20 + 234,5)}{(T_m + 234,5)}$$

$R_{20^{\circ}C}$: Resistencia referida a 20 °C

R_m : Resistencia medida a la temperatura T_m

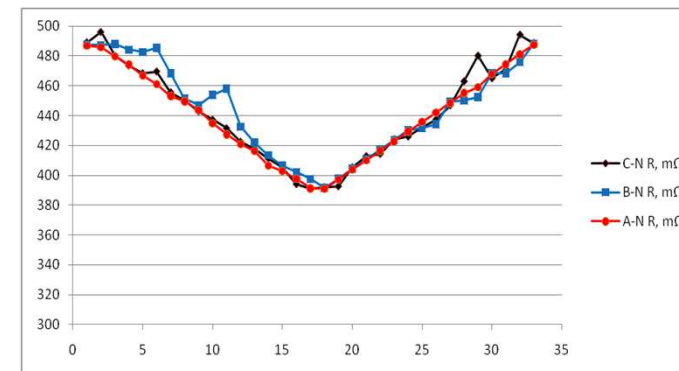
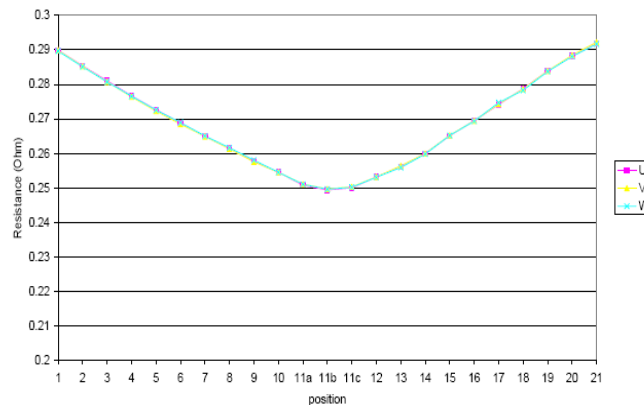
T_m : Temperatura de ensayo, en °C

RESISTENCIA DE LOS DEVANADOS

La desviación aceptable para esta prueba en el campo es del 2% de los valores de referencia (S.D.Mayer)

- IEEE C57.152 establece que las discrepancias admisibles de los valores medidos entre fases sea del 2%.
- CIGRE (Brochure 445) establece que las discrepancias máximas admisibles respecto a los valores obtenidos en fábrica, deben ser de hasta el 1%. Por su parte, las diferencias entre las fases debe ser como máximo entre el 2-3%

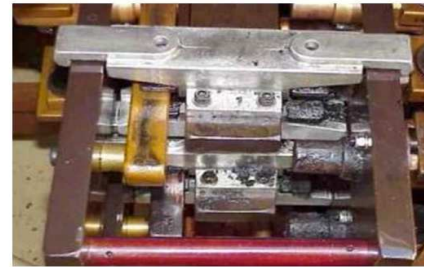
ANÁLISIS DE RESULTADOS



RESISTENCIA DE LOS DEVANADOS

DEFECTOS DETECTABLES

- Posibles conexiones y puentes abiertos o deteriorados
- Problemas en cambiadores de tomas como consecuencia de:
 - La deformación de las superficies de los contactos debido a un calentamiento localizado
 - El aumento de la resistencia entre los contactos a debido a depósitos de carbonización y/o contaminación
 - La disminución de la presión mecánica de los contactos como consecuencia de anomalías/ deterior en el sistema mecánico.



RESISTENCIA DE LOS DEVANADOS

DESMAGNETIZACIÓN

- Después de una medición de CC y antes de ponerlo en servicio se debe desmagnetizar el núcleo del transformador.
- La desmagnetización debe asegurar un valor de la remanencia de 0.
- Se aconseja realizar la desmagnetización mediante un algoritmo rápido y eficiente que realice el proceso dependiendo de tipo de transformador..
- Se aconseja poder visualizar el remanente magnético antes y después del proceso.



RELAC. TRANSFORMACIÓN Y POLARIDAD

OBJETIVO

Determinar la funcionalidad correcta del transformador de acuerdo a los datos de su placa, niveles de tensión y diagrama vectorial

ÍNDICE DE DESFASE	TABLA DE ACOPLAMIENTO	DIAGRAMA VECTORIAL	ESQUEMA DE CONEXIONES	RELACION DE TRANSFORMACIÓN
0 (0°)	Dd0			$\frac{N_1}{N_2}$
				$\frac{N_1}{N_2}$
				$\frac{2 N_1}{3 N_2}$
5 (150°)	Dy5			$\frac{1 N_1}{\sqrt{3} N_2}$
				$\frac{\sqrt{3} N_1}{N_2}$
				$\frac{2 N_1}{\sqrt{3} N_2}$

ÍNDICE DE DESFASE	TABLA DE ACOPLAMIENTO	DIAGRAMA VECTORIAL	ESQUEMA DE CONEXIONES	RELACION DE TRANSFORMACIÓN
6 (180°)	Dd6			$\frac{N_1}{N_2}$
				$\frac{N_1}{N_2}$
				$\frac{2 N_1}{3 N_2}$
11 (330°) (-30°)	Dy11			$\frac{1 N_1}{\sqrt{3} N_2}$
				$\frac{\sqrt{3} N_1}{N_2}$
				$\frac{2 N_1}{\sqrt{3} N_2}$

RELAC. TRANSFORMACIÓN Y POLARIDAD

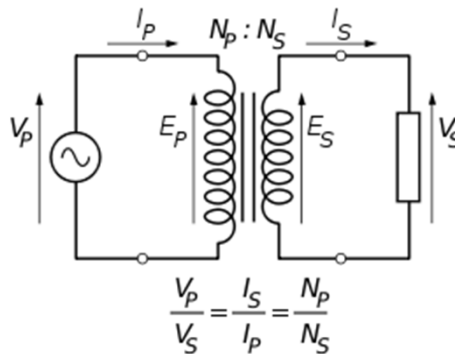
METODOLOGÍA

Para las mediciones se considera que la relación de las tensiones en vacío es aproximadamente igual a la relación entre el número de espiras

$$U_p = e_p = N_p \cdot \left(\frac{d\phi}{dt} \right) \quad \wedge \quad U_s = e_s = N_s \cdot \left(\frac{d\phi}{dt} \right)$$
$$\Rightarrow \frac{U_p}{U_s} = \frac{N_p \cdot \left(\frac{d\phi}{dt} \right)}{N_s \cdot \left(\frac{d\phi}{dt} \right)} = \frac{N_p}{N_s} = N$$

en el caso del transformador ideal $U_p \cdot I_p = U_s \cdot I_s$

$$\therefore \frac{U_s}{U_p} = \frac{N_s}{N_p} = \frac{I_p}{I_s}$$



RELAC. TRANSFORMACIÓN Y POLARIDAD

METODOLOGÍA

- Se excita un devanado con una fuente de **tensión CA** y se mide la tensión inducida en el devanado opuesto.
- La tensión de medida se puede aplicar tanto en el devanado de alta tensión (80,100,250V) como en el de baja tensión (2,8 V).
- La corriente demandada en el devanado donde se aplica la tensión es la **corriente de excitación**.

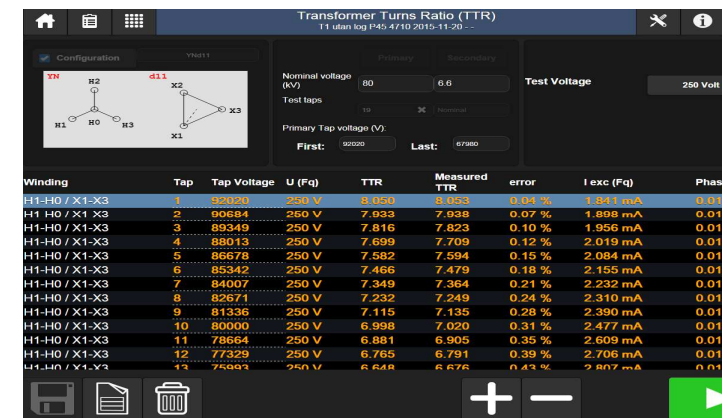
$$V_{rms} = 4.44 \cdot f \cdot N \cdot A \cdot B_{max}$$

$$B \propto I$$

RELAC. TRANSFORMACIÓN Y POLARIDAD

ANÁLISIS DE RESULTADOS

- Los valores medidos deben coincidir con los valores indicados en la placa de características .
- Las normativas IEEE y IEC establecen que la diferencia entre los valores indicados en la placa de características no debe ser superior del 0,5 % en ninguno de los devanados.



Transformer Turns Ratio (TTR)

11 uten bag (145.4710.2015-11-20-...)

Configuration

Primary: Secondary

Nominal voltage (kV): 80 6.6

Test taps: 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100

Primary Tap voltage (V): First: 52000 Last: 67500

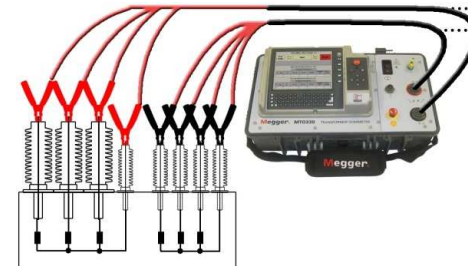
Test Voltage: 250 Volt

Winding	Tap	Tap Voltage	U (Fq)	TTR	Measured TTR	error	I exc (Fq)	Phase
H1-H0 / X1-X3	1	92020	250 V	5.050	5.033	0.34 %	1.891 mA	0.01°
H1-H0 / X1-X3	2	90684	250 V	7.933	7.938	0.07 %	1.898 mA	0.01°
H1-H0 / X1-X3	3	89349	250 V	7.816	7.823	0.10 %	1.956 mA	0.01°
H1-H0 / X1-X3	4	88013	250 V	7.699	7.709	0.12 %	2.019 mA	0.01°
H1-H0 / X1-X3	5	86678	250 V	7.582	7.594	0.15 %	2.084 mA	0.01°
H1-H0 / X1-X3	6	85342	250 V	7.466	7.479	0.18 %	2.155 mA	0.01°
H1-H0 / X1-X3	7	84007	250 V	7.349	7.364	0.21 %	2.232 mA	0.01°
H1-H0 / X1-X3	8	82671	250 V	7.232	7.249	0.24 %	2.310 mA	0.01°
H1-H0 / X1-X3	9	81336	250 V	7.115	7.135	0.28 %	2.390 mA	0.01°
H1-H0 / X1-X3	10	80000	250 V	6.998	7.020	0.31 %	2.477 mA	0.01°
H1-H0 / X1-X3	11	78664	250 V	6.881	6.905	0.35 %	2.609 mA	0.01°
H1-H0 / X1-X3	12	77329	250 V	6.765	6.791	0.39 %	2.706 mA	0.01°
H1-H0 / X1-X3	13	75993	250 V	6.648	6.676	0.43 %	2.807 mA	0.01°

RELAC. TRANSFORMACIÓN Y POLARIDAD

DEFECTOS DETECTABLES

- Circuitos abiertos
- Espiras en cortocircuito
- Defectos graves en el cambiador de tomas
- Terminales identificados incorrectamente, etc..
- Midiendo el desplazamiento de fase se verifica la desviación angular entre el primario y el secundario

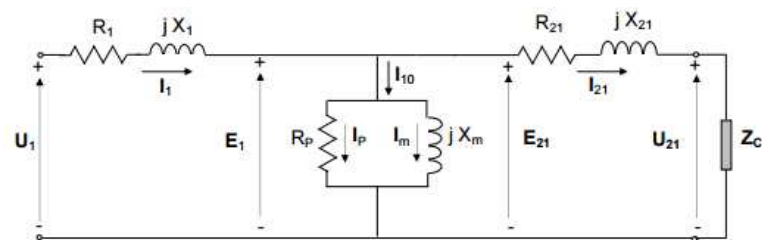


CORRIENTE DE EXCITACIÓN

¿QUÉ ES?

Corriente de magnetización (I_m): Es la corriente necesaria para que exista un flujo magnético en el núcleo.

Corriente de pérdidas (I_p): Es la corriente existente en el núcleo como consecuencia de las pérdidas por histéresis y corrientes parásitas.

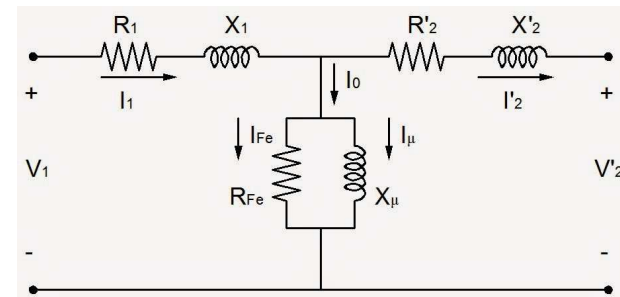
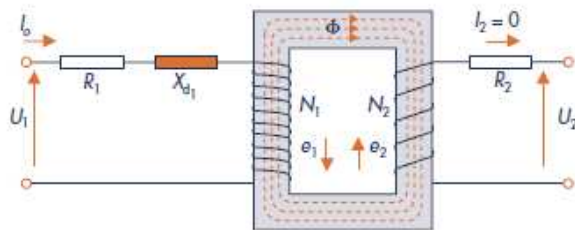


Corriente de Excitación (I_0): Es la suma vectorial de $I_m + I_p$. La corriente total si el transformador está sin carga.

CORRIENTE DE EXCITACIÓN

OBJETIVO

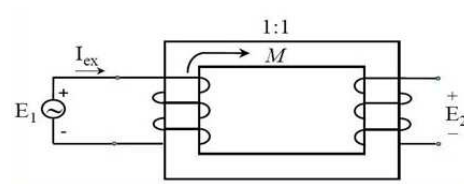
Verificar la condición electromecánica del transformador a través de la medición de la corriente de excitación de cada una de las fases del transformador.



CORRIENTE DE EXCITACIÓN

METODOLOGÍA

- La medición se realiza aplicando una tensión CA a cada uno de los devanado de AT:
 - Fase U, fase V y luego fase W
 - Los devanados secundarios / terciarios deben quedar en vacío (abierto)



$$V = 4.44 \times f \times A \times N \times B$$
$$B \propto I_o$$

CORRIENTE DE EXCITACIÓN

METODOLOGÍA

- Evitar hacer la medición después de una medida con CC, por ejemplo, resistencia de devanados. Desmagnetizar.
- La corriente de excitación depende del nivel de tensión aplicada. Se recomienda hacer la medida siempre con los mismos valores.
- Se recomienda realizar la medida a valores de tensión lo más cercanos a lo de servicio.
- La medición debe realizarse desde el lado del devanado de AT.
- Se miden posiciones extremas y media del cambiador de tomas

CORRIENTE DE EXCITACIÓN

ANÁLISIS DE RESULTADOS

- Los valores se darán en mA.
- Los valores obtenidos se deben comparar con otros valores medidos anteriormente (IEEE C57.152).
- De existir una espira en corto circuito, la corriente de excitación incrementará

	Actual Ratio	% Error	I _{exc} mA
L1	4,536	0,05	0,7
L2	4,535	0,05	0,4
L3	4,536	0,06	0,7
L1	4,471	0,10	0,7
L2	4,470	0,08	0,4
L3	4,470	0,08	0,7
L1	4,404	0,10	0,7
L2	4,405	0,11	0,4
L3	4,404	0,09	0,7
L1	4,341	0,17	0,7
L2	4,340	0,14	0,4
L3	4,340	0,15	0,7
L1	4,273	0,16	0,8
L2	4,274	0,17	0,4
L3	4,274	0,17	0,8
L1	4,203	0,08	0,8
L2	4,203	0,07	0,5
L3	4,202	0,06	0,8
L1	4,132	0,03	0,8
L2	4,131	0,05	0,5
L3	4,131	0,06	0,8
L1	4,066	0,01	0,9
L2	4,065	0,03	0,5
L3	4,066	0,02	0,9

CORRIENTE DE EXCITACIÓN

ANÁLISIS DE RESULTADOS

- En los transformadores trifásicos el valor de la corriente de excitación de las fases exteriores deben ser iguales y mayores que la de la fase central
- El valor de la fase central va a diferir en un sistema trifásico dependiendo de la configuración de los devanados. La lectura en la fase central será del 50 al 70% de la lectura de los exteriores.
- Compare los resultados de fabrica o de pruebas anteriores si están disponibles:
 - Si la $I_{ex} < 50mA$, la diferencia entre los dos valores mas altos debe ser $\leq 10\%$.
 - Si la $I_{ex} > 50mA$, la diferencia entre los dos valores mas altos debe ser $\leq 5\%$.

CORRIENTE DE EXCITACIÓN

DEFECTOS DETECTABLES

- Cambio en la geometría del núcleo y devanados
- Espiras en cortocircuito.
- Problemas en el cambiador
- Cambio en la reluctancia efectiva del núcleo.
- Delaminación del núcleo
- Corrientes circulares
- Anomalías en la puesta a tierra del núcleo



¡Muchas Gracias!

Luis Carlos Sosa

luis.sosa@megger.com

+34 91 616 54 96

megger.iberia@megger.com

es.megger.com



¿Preguntas?

¿Dudas?

Megger®