



Megger

**Seminario Teórico-Practico
Pruebas Eléctricas de Mantenimiento
y Puesta en Servicio de Transformadores**

Colombia

Agosto/Septiembre 2011

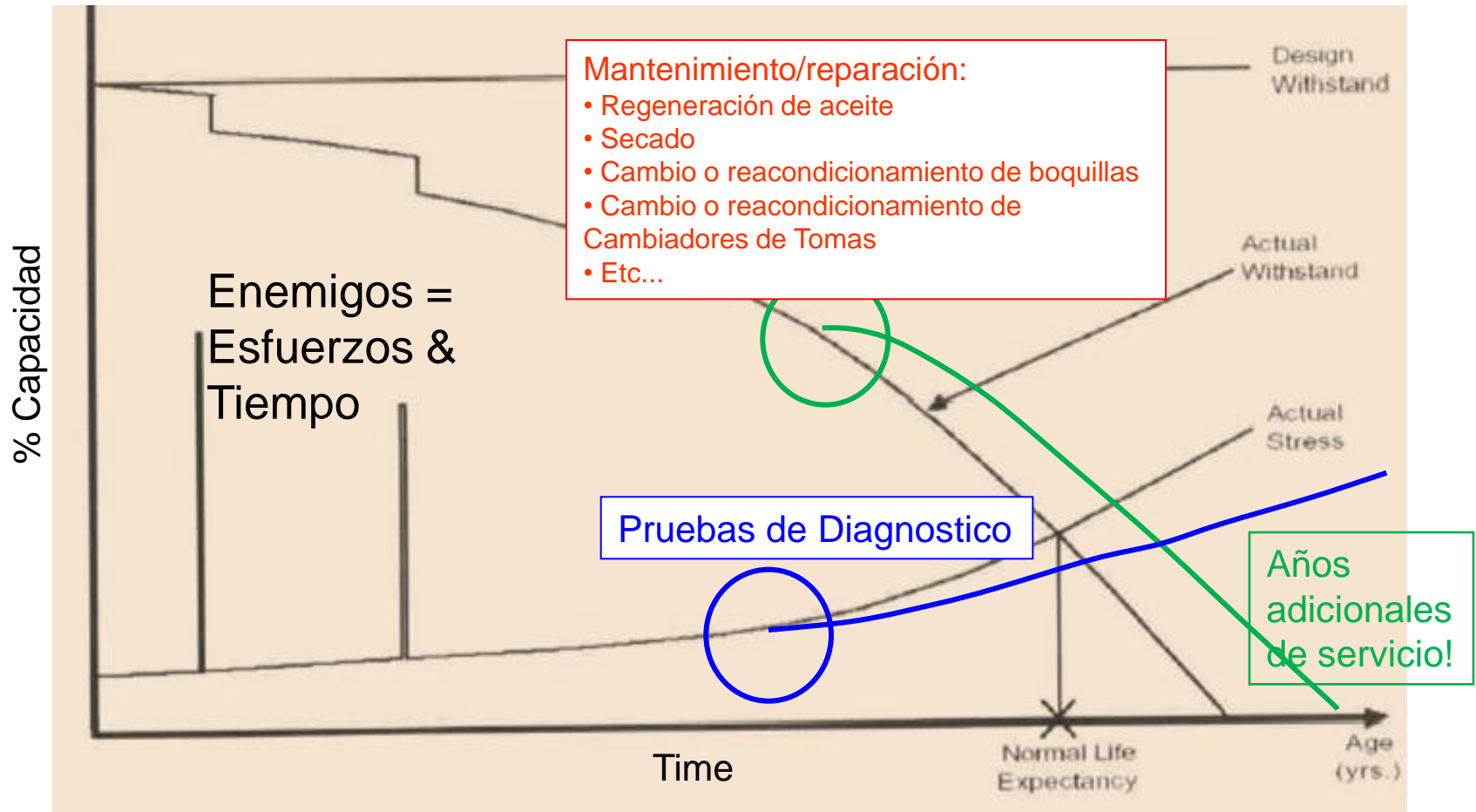
Megger[®]

Necesidad de Pruebas – Evitar Fallas

- Pocos son los transformadores que fallan por envejecimiento y fin de su vida útil
 - Normalmente salen de operación por:
 - **FALLAS del Sistema**
 - **Sobrecalentamiento**
 - Corrientes de Circulación
 - Desbalance de Corrientes
 - Efecto de fuga de flujo
 - **FALLAS de Accesorios**
 - Bujes
 - Cambiador de Tomas
 - Sistema de Enfriamiento
 - Pararrayos
 - **FALLA del Aislamiento Dieléctrico**
 - Etapa final de un combinación de eventos previos
-



Maximizar la Vida Útil del Transformador



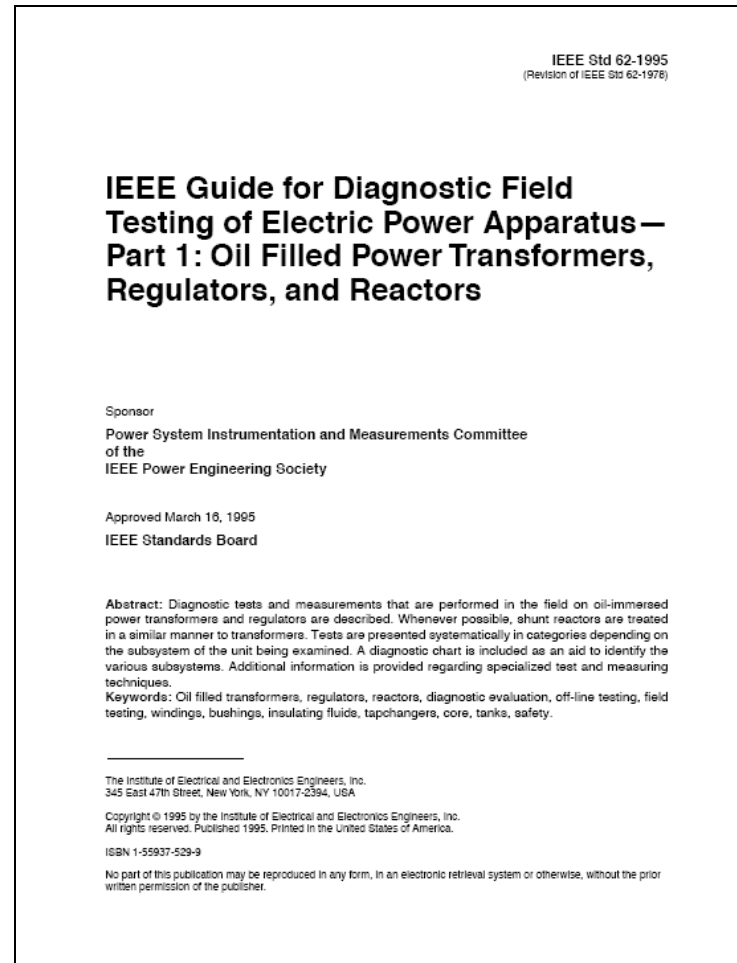
Pruebas / Mantenimiento Preventivo

1. Inspección Visual
2. Pruebas en Línea
3. Pruebas con Equipo Fuera de Servicio
4. Inspección Interna

Pruebas de Campo - Estándar

■ IEEE 62

- Guía para Pruebas de Campo
- (revisión IEEE C57.152)



IEEE 62

Detalle de Pruebas, basado en los componentes del Transformador

Component		Test	Megger products
Windings		Resistance	MTO
		Ratio/polarity	TTR
		Excitation current	Delta/TTR
		Short-circuit impedance	MLR/FRAX
		Frequency response analysis	FRAX
		Insulation resistance	S1
		Capacitance	Delta/IDAX
		Power factor/tan delta	Delta/IDAX
		Dielectric frequency response	IDAX
		Induced voltage/partial discharge	
Bushings		Capacitance	Delta/IDAX
		Power factor/tan delta	Delta/IDAX
		Dielectric frequency response	IDAX
		Partial discharge	
		Temperature (Infrared)	
Insulating oil		Water content	KF
		Dissolved gas	
		Dielectric strength	OTS
		Particle count	
		Power factor/tan delta	IDAX/Delta
		Interfacial tension	
		Acidity	
		Visual	
		Color	
Cellulose insulation		Oxidation stability	
		Moisture content	IDAX-MODS
Tap changers	Load	Contact/winding resistance	MTO
		Temperature (Infrared)	
		Ratio	TTR
		Timing (make before break)	MTO
		Motor current	
	De-energized	Limit switch	
		Contact pressure (resistance test)	MTO
		Centering	
		Ratio	TTR
		Visual inspection	
Core		Insulation resistance	MIT/S1
		Frequency response analysis	FRAX
		Ground test	MoM/DLRM

Pruebas de Campo en Transformadores

■ Pruebas de Rutina en Campo:

- Relación de Transformación y Polaridad
- Resistencia de Devanados
- Corriente de Excitación
- Conexión a tierra del núcleo
- Reactancia de Fuga (corto circuito)
- Factor de Potencia del Aislamiento
- Resistencia de Aislamiento
- Aislamiento del aceite dieléctrico
- Respuesta del Barrido de Frecuencia
- Espectroscopia Dieléctrica

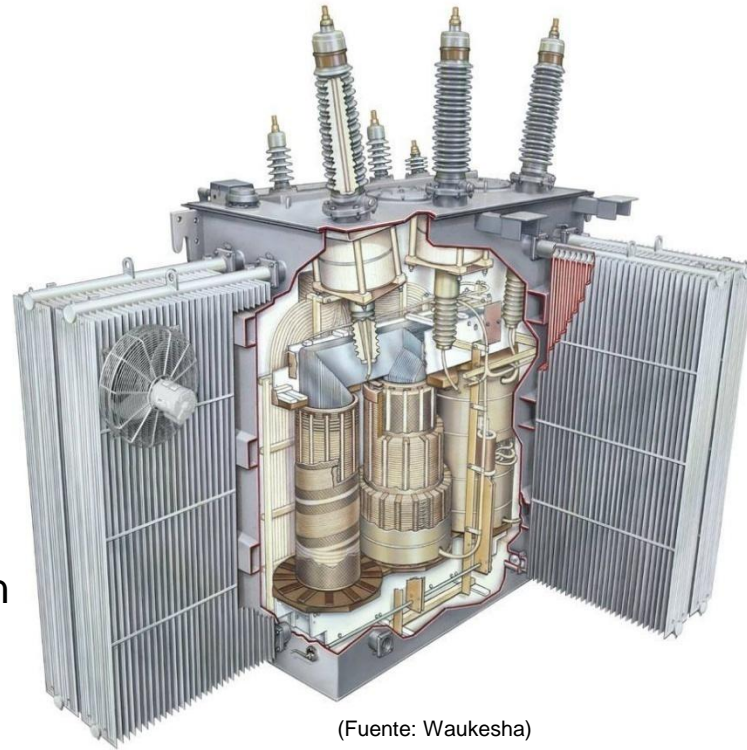


Prueba TTR en Transformador
(Fuente: Megger)



Prueba de Factor de Potencia
(Fuente: Megger)

Pruebas de Campo para Transformadores



(Fuente: Waukesha)

■ Relación de Transformación

■ Resistencia de Devanados

■ Corriente de Excitación

■ Reactancia de Fuga

■ Resistencia de Aislamiento

Relación de Transformación – Resultados

■ Defectos de fábrica en los devanados

- Errores en
 - Espiras
 - Polaridad
 - Configuración del Devanado

■ Falla del aislamiento

- Corto circuito entre espiras por daño de aislamiento
- Fallas mayores de aislamiento: inter-devanados o devanado a tierra

■ Cambiador de Tomas defectuoso

- Montaje incorrecto de las conexiones de los devanados
- Conexiones de alta resistencia
- Configuración incorrecta del cambiador de tomas

Relación de Transformación – Teoría

- Para todas las mediciones de relación de transformación se considera que:
 - La relación de voltajes en vacío es aproximadamente igual a la relación entre el numero de espiras

$$V_p = e_p = N_p \cdot \left(\frac{d\phi}{dt} \right) \quad \wedge \quad V_s = e_s = N_s \cdot \left(\frac{d\phi}{dt} \right)$$

N_p = Numero de espiras en el primario

N_s = Numero de espiras en el secundario

V_p = Voltaje Primario

V_s = Voltaje Secundario

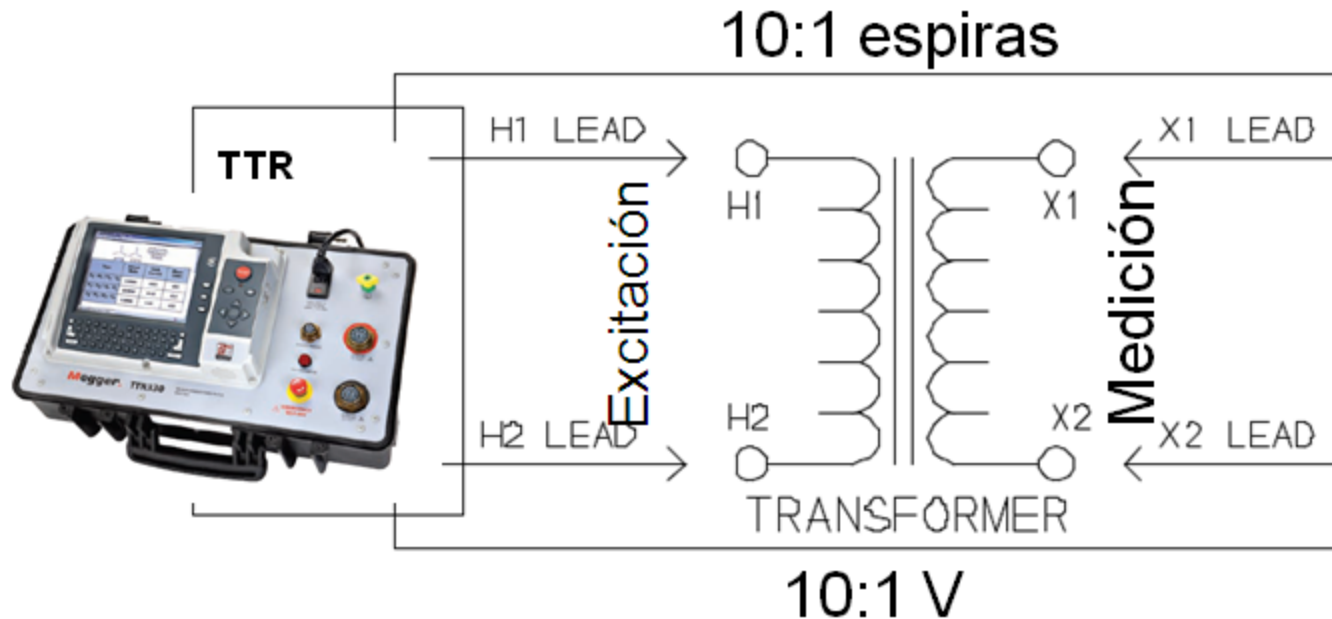
$$\Rightarrow \frac{V_p}{V_s} = \frac{N_p \cdot \left(\frac{d\phi}{dt} \right)}{N_s \cdot \left(\frac{d\phi}{dt} \right)} = \frac{N_p}{N_s} = N$$

en el caso del transformador ideal $V_p \cdot I_p = V_s \cdot I_s$

$$\therefore \frac{V_s}{V_p} = \frac{N_s}{N_p} = \frac{I_p}{I_s}$$

Relación de Transformación– Configuración

- **Excite** un devanado y **mida** el voltaje inducido en el devanado opuesto
- El voltaje de prueba se aplica sea al devanado de alta o al de baja tensión
- La corriente generada en el devanado donde se aplica el voltaje es la corriente de excitación



Relación de Transformación – Prueba

- La medición de relación debe realizarse con pocos voltios de excitación, de preferencia desde el lado de AT
 - Si se excita el devanado de BT 2, 5, 8 V
 - Si se excita el devanado de AT 80, 100 V
 - Una de las principales fuentes de error es la excesiva corriente de magnetización
 - Limite el voltaje de prueba a una fracción del voltaje nominal del espécimen
 - Magnetismo residual en el núcleo puede generar mayores corrientes de magnetización.
 - Use un voltaje de prueba menor

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

$$B \propto I$$



TTR 3-fase automático
(Fuente: Megger – Modelo TTR330)

V_{rms} = Voltaje de prueba

f = Frecuencia

A = área del núcleo

N = # de espiras

B_{max} = Densidad Máxima de Flujo Magnético

I = Corriente de Excitación

Relación de Transformación– Prueba

Table 5-4. ANSI Transformer Winding Phase Relationship

Diag No.	IEC Vector Group	Winding Connection		Phase Tested	Winding Shorted By TTR	Winding Tested		Measured Turn Ratio	Remarks
		High-Voltage Winding (H)	Low-Voltage Winding (X)			High-Voltage Winding	Low-Voltage Winding		
1	1 ϕ 1ph0			1 ϕ	—	H ₁ - H ₂	X ₁ - X ₂	$\frac{V_H}{V_X}$	Single-phase transformer
2	1 ϕ 1ph6			1 ϕ	—	H ₁ - H ₂	X ₂ - X ₁	$\frac{V_H}{V_X}$	Single-phase transformer
3	Dd0			A B C	—	H ₁ - H _b H ₂ - H _c H ₃ - H _a	X ₁ - X ₃ X ₂ - X ₁ X ₃ - X ₂	$\frac{V_H}{V_X}$	—
4	Dd6			A B C	—	H ₁ - H _b H ₂ - H _c H ₃ - H _a	X ₃ - X ₁ X ₁ - X ₂ X ₂ - X ₃	$\frac{V_H}{V_X}$	—
5	Dyn1			A B C	—	H ₁ - H _b H ₂ - H _c H ₃ - H _a	X ₁ - X ₀ X ₂ - X ₀ X ₃ - X ₀	$\frac{V_H \cdot \sqrt{3}}{V_X}$	Neutral accessible on wye winding

Relación de Transformación– Cambiadores de Tomas

- Cambiadores de Tomas Bajo Carga (CTBC)
- Cambiadores de Tomas Des-energizados (CTD)
 - La relación de transformación se debe probar en todas las posiciones de las tomas bajo carga con el cambiador de tomas des energizado en una misma posición sea esta la posición nominal o la posición del numero máximo de espiras

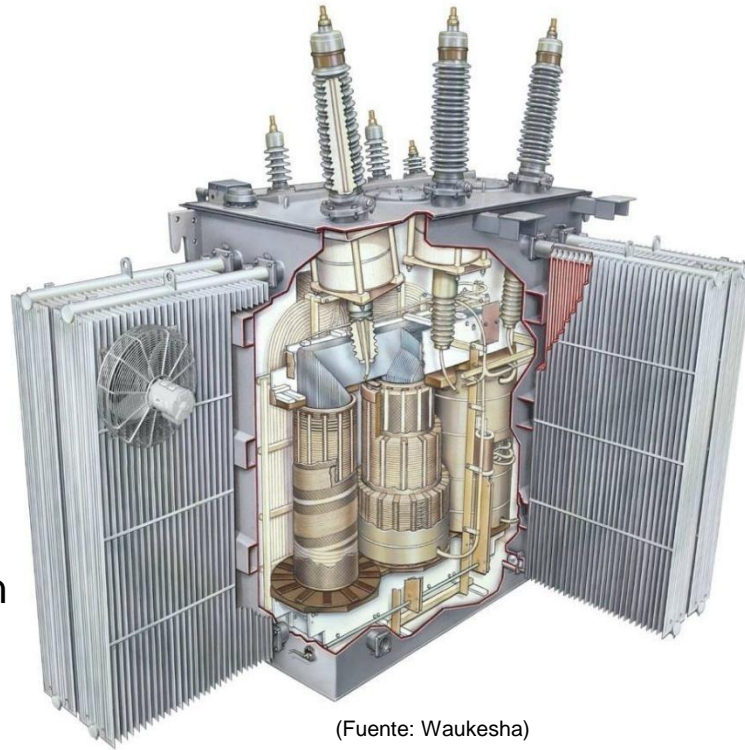
Relación de Transformación - Resumen

- La prueba de Relación de Transformación se usa para validar las especificaciones de diseño
 - Antes de puesta en marcha del equipo
 - Define la condición presente y se obtiene una referencia
 - Determina si ha ocurrido algún daño
- La Relación de transformación medida debe estar dentro del 0.5 % del valor de placa



TTR Monofásico Automático
(Fuente: Megger – Modelo TTR100)

Pruebas de Campo en Transformadores



(Fuente: Waukesha)

■ Relación de Transformación

■ Resistencia de Devanados

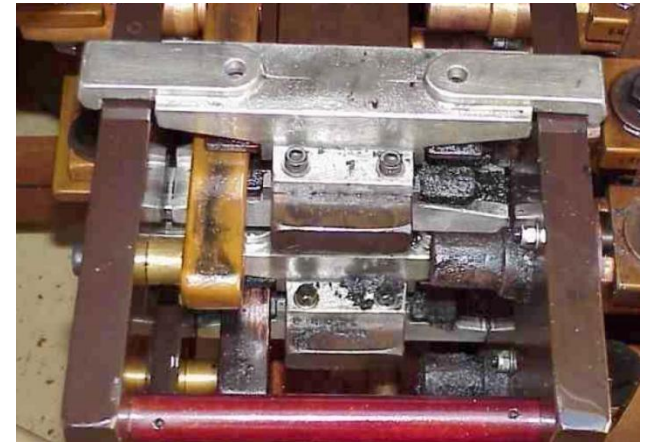
■ Corriente de Excitación

■ Reactancia de Fuga

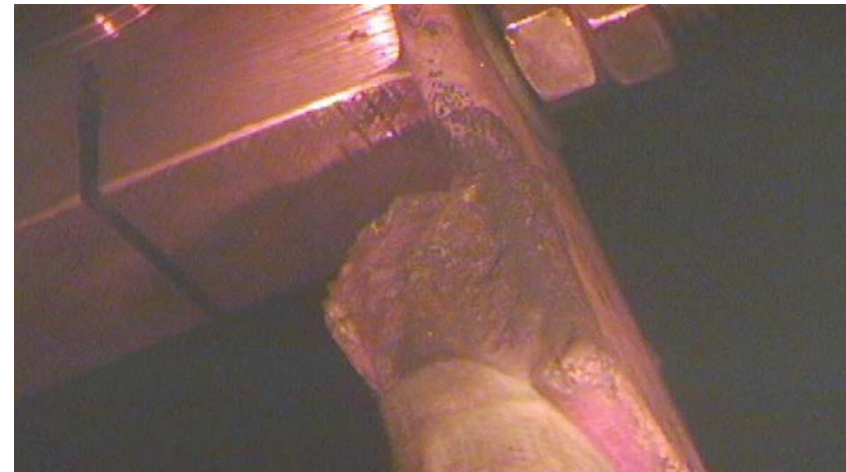
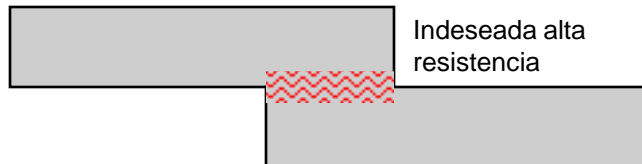
■ Resistencia de Aislamiento

Resistencia de Devanados – Resultados

- Detección de fallas:
 - Alta resistencia en contactos metálicos
 - Conexiones en los cambiadores de tomas
 - Conexión de boquillas
 - Conexión de Devanados



Contactos deteriorados en CTBC
(Fuente: Foster Miller)



Conexión de Boquilla Deteriorada
(Fuente: Foster Miller)

Resistencia de Devanados - Teoría

- Valores de Resistencia típicos en Transformadores de Potencia
 - AT rango de ohms Ω
 - BT rango de $m\Omega$ o $\mu\Omega$

$$R_w = \frac{V - \left(L \cdot \frac{di}{dt} \right)}{I}$$

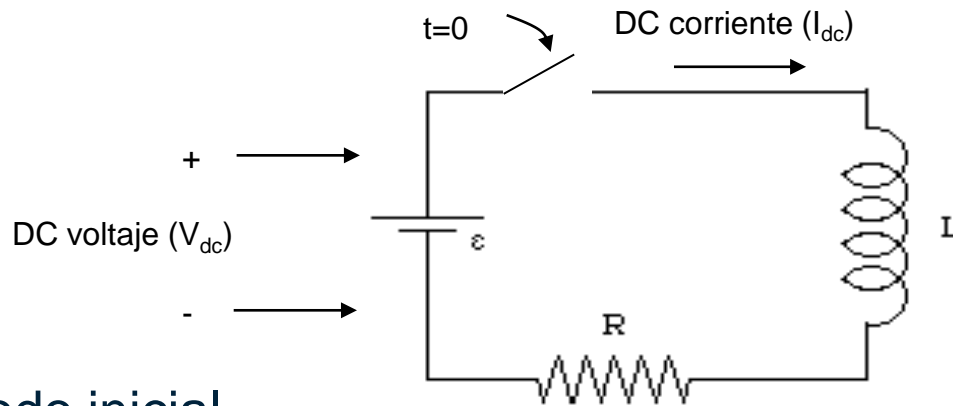
$V = V_{DC}$ a lo largo del devanado

$I = I_{DC}$ a través del devanado

$L =$ Inductancia del devanado

$di/dt =$ valor variable de corriente

Resistencia de Devanados – Tiempo de Prueba



Transformador = Alta L, Baja R

1. Periodo inicial

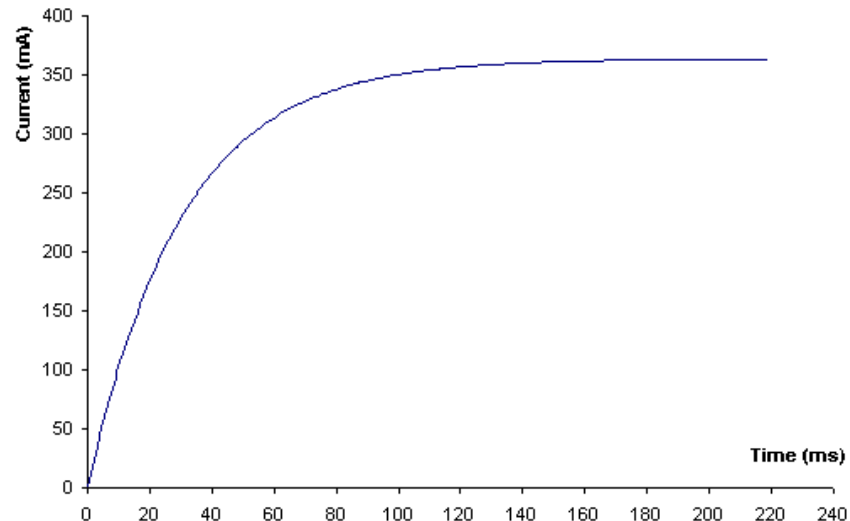
- $i=0$

2. Periodo transitorio

- Carga de corriente
- Constante de Tiempo
- $T = L/R$ (sec)

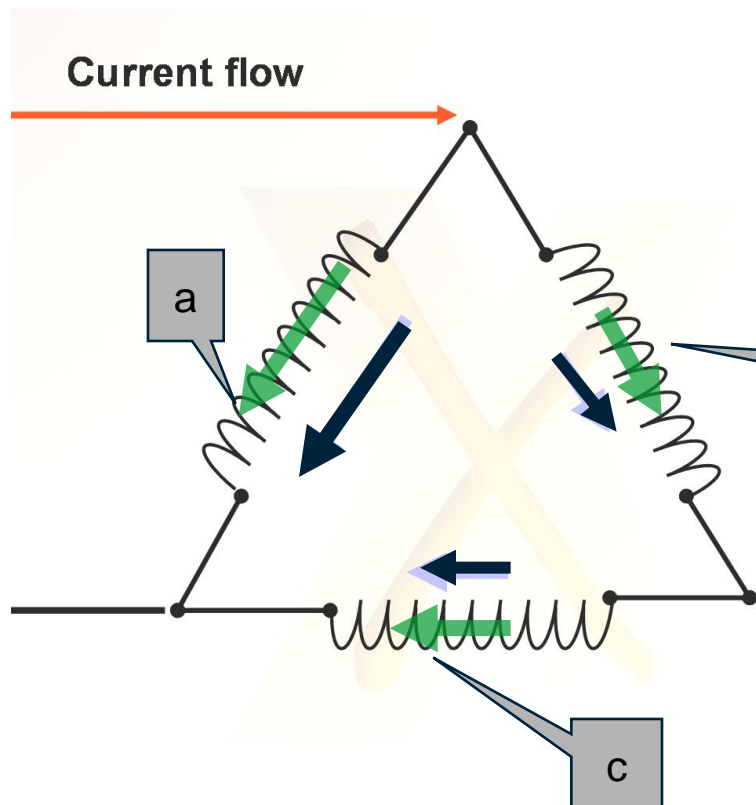
3. Periodo de estado estacionario

- $R = v / i$



Resistencia de Devanados: DELTA Trifásico

- Los 4 pasos de medición



Paso 1:

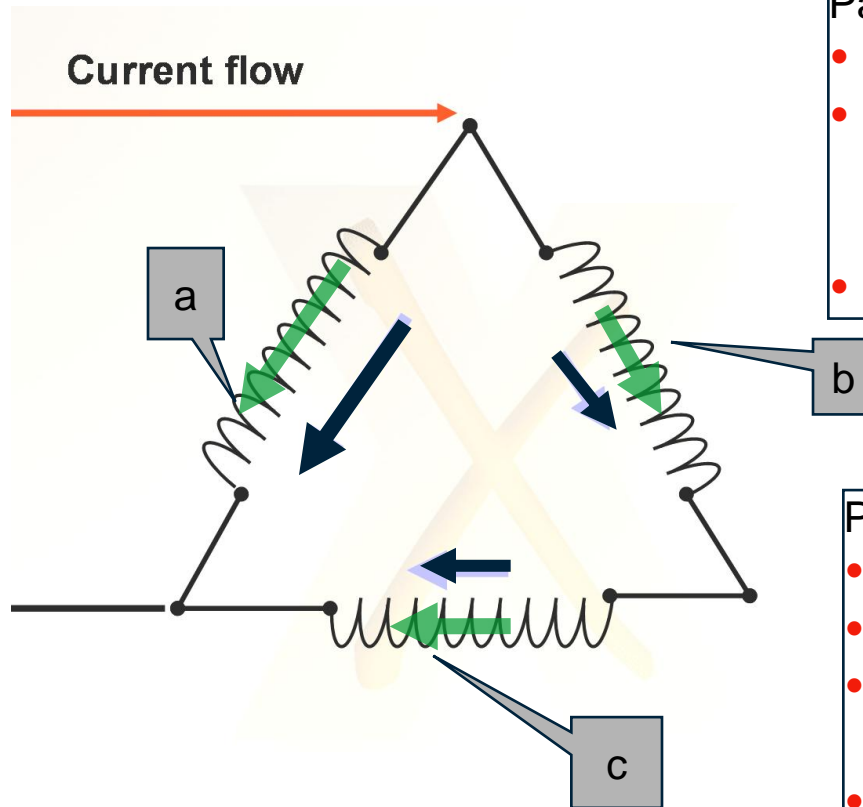
- Voltaje aplicado en la salida
- La Inductancia es $L(a) // L(b)+L(c)$
- Mayor valor de corriente en el devanado "a".

Paso 2:

- "a" esta saturado
- El voltaje se fija en su máximo y el voltaje cae
- "b" y "c" no están saturados

Resistencia de Devanados: DELTA Trifásico

- Los 4 pasos de medición



Paso 3:

- Parece estable— pero no lo es!
- La corriente en “b” y “c” se incrementa lentamente debido al bajo voltaje
- Esto puede tomar tiempo...

Paso 4:

- “a” sigue saturado
- “b” y “c” se saturan
- Los valores de voltaje y corriente son estables
- $R(a) // R(b) + R(c)$

Resistencia de Devanados – Prueba

■ Corriente de Prueba

- Rango de Corriente = Aplique del 1 al 10% del valor de corriente nominal. El núcleo se satura aproximadamente al 1% de la corriente nominal
- Nunca sobrepase el 10% del valor de corriente nominal
 - Stress innecesario
 - Lecturas erróneas (por calentamiento del devanado)

Resistencia de Devanados – Interpretación de Resultados

- Comparación con:
 - Mediciones originales de fabrica
 - Mediciones preliminares en campo
 - Comparación entre fases

- IEEE 62 (6.1.1) recomienda que los valores comparativos no excedan de una diferencia del 5%.

- La industria recomienda 2% de diferencia (ABB Handbook).

Resistencia de Devanados – Corrección de Resultados por Variación de Temperatura

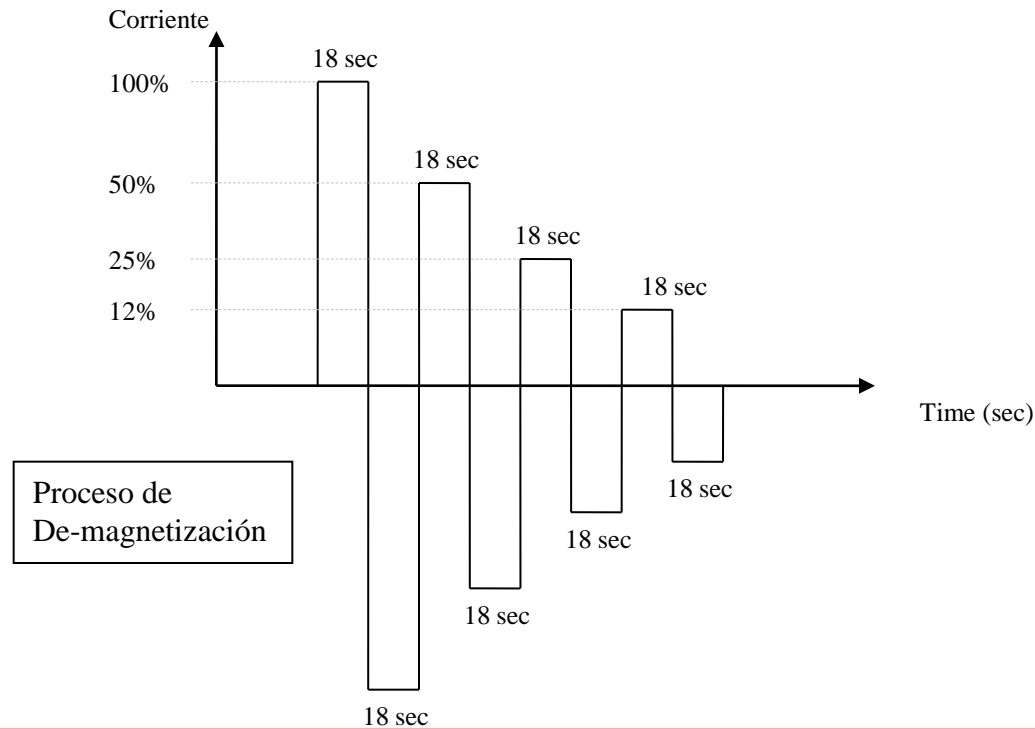
- La prueba es dependiente de la temperatura
- Normalmente no se requiere corrección de temperatura de las mediciones de resistencia de devanados en sitio porque la comparación se realiza entre fases (IEEE 152. Borrador)
- Máximo 5°C de diferencia entre el piso y la cumbre del transformador y haberlo tenido fuera de servicio por lo menos durante tres horas (IEC 60076-1)
- La corrección del valor de resistencia por variación de temperatura se resuelve con la siguiente ecuación:

$$R_{CT} = \frac{R_M \cdot (CF + CT)}{CF + T_d}$$

- R_{CT} = Resistencia corregida
- R_M = Resistencia medida
- CF = 234.5 (Cu) o 225 (Al)
- CT = 75 para 55 elevación, 85 para 65 elevación
- T_d = Temperatura de Devanado en °C.

Resistencia de Devanados – De-magnetización

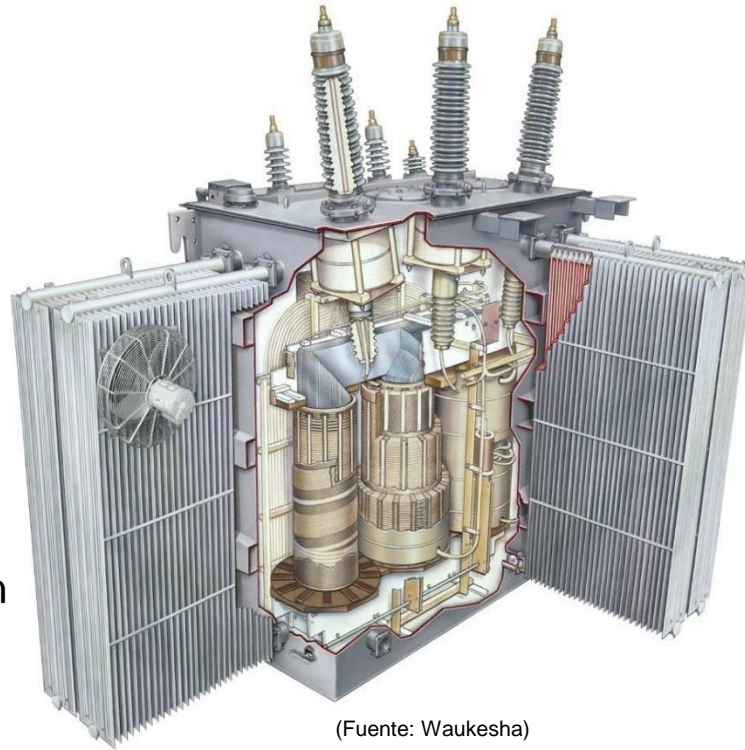
- La de-magnetización del núcleo del transformador se consigue aplicando DC de polaridad inversa con intervalos de reducción de magnitud.
- Solo se requiere conectar a un devanado de AT (luego de finalizar la prueba)



Resistencia de Devanados– Resumen

- Nunca desconecte los cables antes de que la inductancia del transformador este completamente descargada.
- De-magnetice el núcleo luego de la prueba
- Realice la medición en el lado de AT en todas las posiciones del cambiador de tomas
- Continúe con el lado de BT
- Mediciones de doble canal minimizan el tiempo de prueba

Pruebas de Campo en Transformadores



(Fuente: Waukesha)

■ Relación de Transformación

■ Resistencia de Devanados

■ Corriente de Excitación

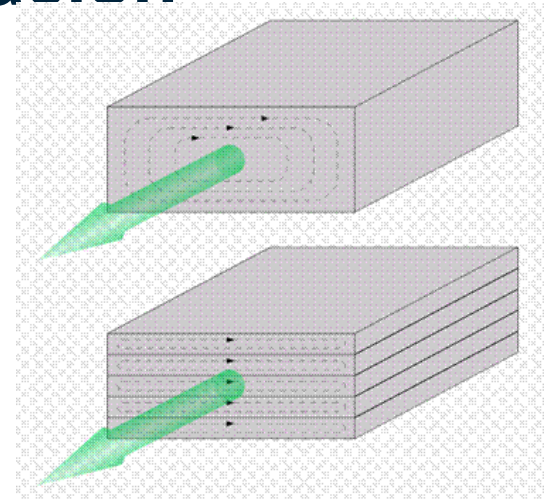
■ Reactancia de Fuga

■ Resistencia de Aislamiento

Prueba de Corriente de Excitación

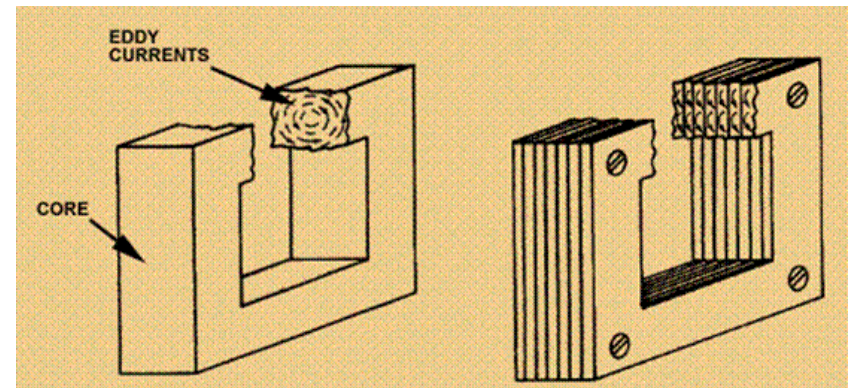
■ Detecta problemas en el núcleo:

- Cortos entre láminas
- Problemas de uniones o juntas
- Corrientes circulantes



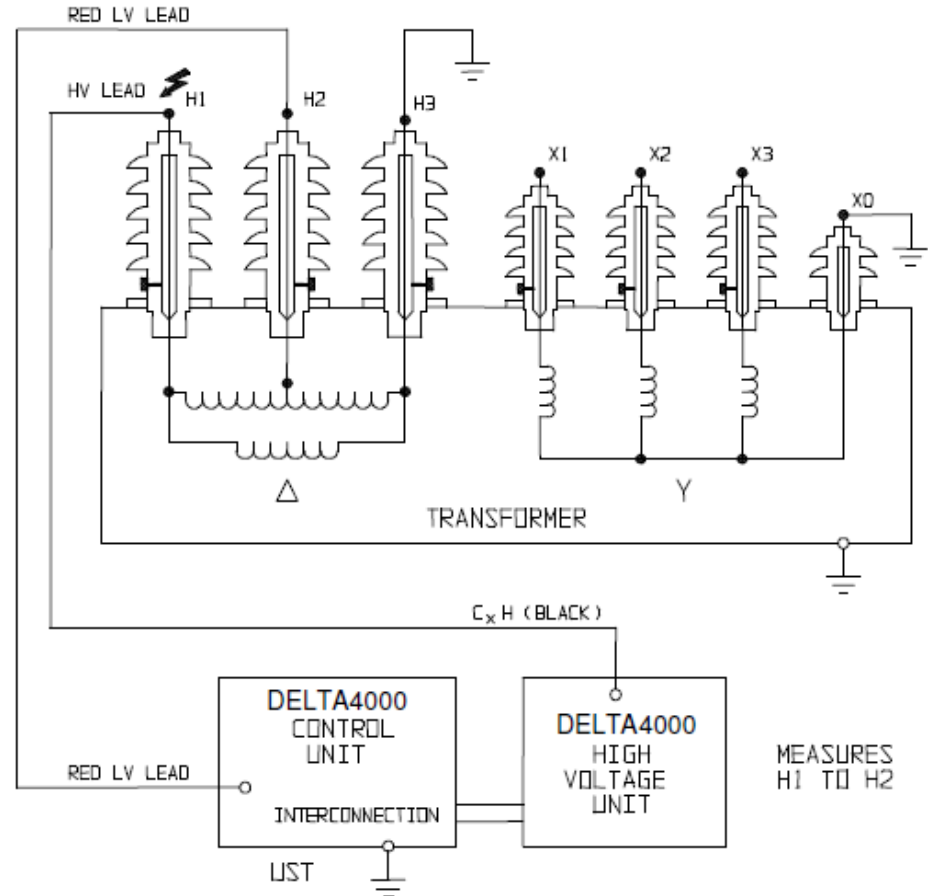
■ Detecta problemas en los devanados:

- Cortos entre espiras
- Circuito abierto
- Malas conexiones



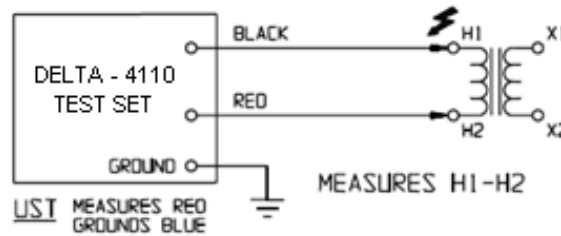
Prueba de Corriente de Excitación- Teoría

- También se le conoce como:
 - Prueba de circuito abierto
 - Prueba en vacío
- Realice la Prueba aplicando voltaje AC a cada uno de los devanados de AT
 - Fase A, luego fase B, luego fase C
 - Todos los otros devanados están flotando
 - Configuración de prueba UST en equipo de pruebas de Factor de Potencia
- Mida en el devanado
 - Corriente
 - Voltaje
 - Potencia Real



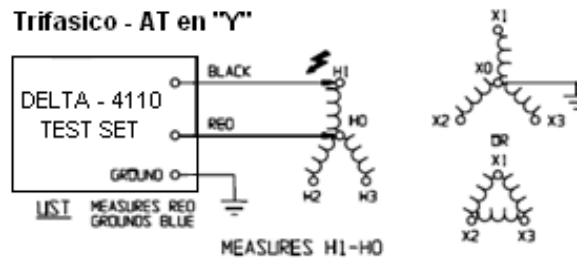
Prueba de Corriente de Excitación

Monofasico



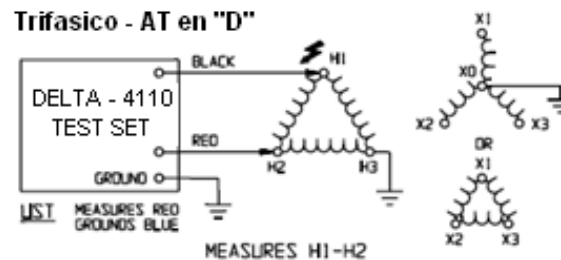
Measures	Test Lead Connections		
Terminal Symbol	⚡		
H1-H2	H1	H2	—
H2-H1	H2	H1	—

Trifasico - AT en "Y"



Measures	Test Lead Connections		
Terminal Symbol	⚡		
H1-H0	H1	H0	—
H2-H0	H2	H0	—
H3-H0	H3	H0	—

Trifasico - AT en "D"



Measures	Test Lead Connections		
Terminal Symbol	⚡		
H1-H2	H1	H2	H3
H2-H3	H2	H3	H1
H3-H1	H3	H1	H2

Prueba de Corriente de Excitación - CTBC

- **Cambiadores de Tomas Bajo Carga (CTBC)**
 - La corriente de excitación se prueba a la posición intermedia del CTBC, en la posición neutral y a un paso en la dirección opuesta.

Prueba de Corriente de Excitación- Resultados

- Para comparar las lecturas, use los mismos valores de voltaje de prueba
- El valor de la corriente de excitación en el devanado de la fase intermedia en un transformador tipo columna trifásico debe ser distinto al valor obtenido en los otros dos devanados simétricos.
- De existir una espira en corto circuito, la corriente de excitación incrementa

Prueba de Corriente de Excitación- Resultados

- (IEEE Std. 62 – 6.1.3.3): Compare contra los resultados de fábrica o de pruebas anteriores.
- Para la gran mayoría de transformadores trifásicos, el patrón de referencia es dos valores altos en las fases exteriores y un valor bajo en la fase central.

- Si la $I_{ex} < 50\text{mA}$, la diferencia entre los dos valores mas altos debe ser $< 10\%$

$$A = 25\text{mA}$$

$$B = 17 \text{ mA} \quad (28-25) / [(25+28)/2] = 0.11 = 11\%$$

$$C = 28 \text{ mA} \quad \text{Investigar C}$$

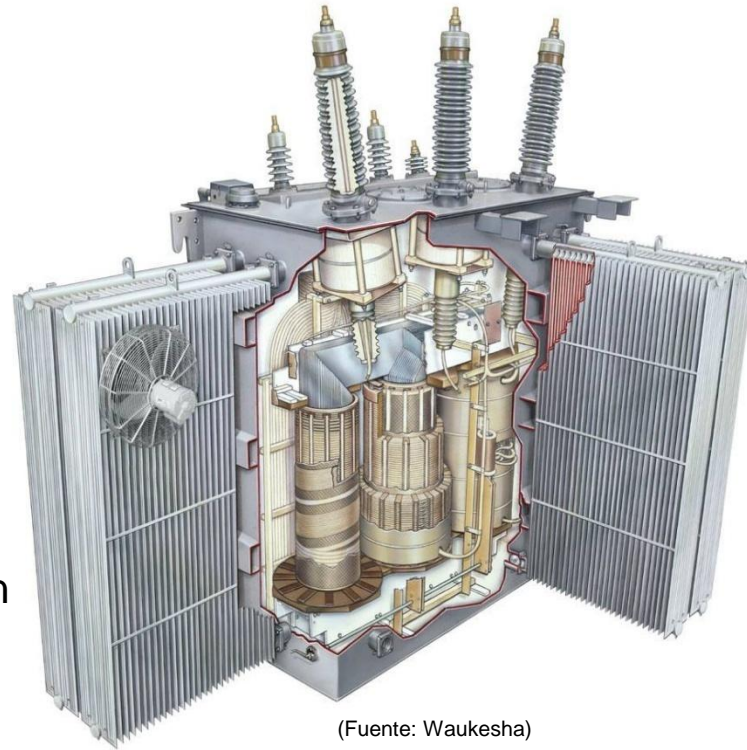
- Si la $I_{ex} > 50\text{mA}$, la diferencia entre los dos valores mas altos debe ser $< 5\%$

$$A = 68 \text{ mA}$$

$$B = 56 \text{ mA} \quad (70-68) / [(70+68)/2] = 0.02 = 2\%$$

$$C = 70 \text{ mA} \quad \text{OK}$$

Pruebas de Campo en Transformadores



(Fuente: Waukesha)

■ Relación de Transformación

■ Resistencia de Devanados

■ Corriente de Excitación

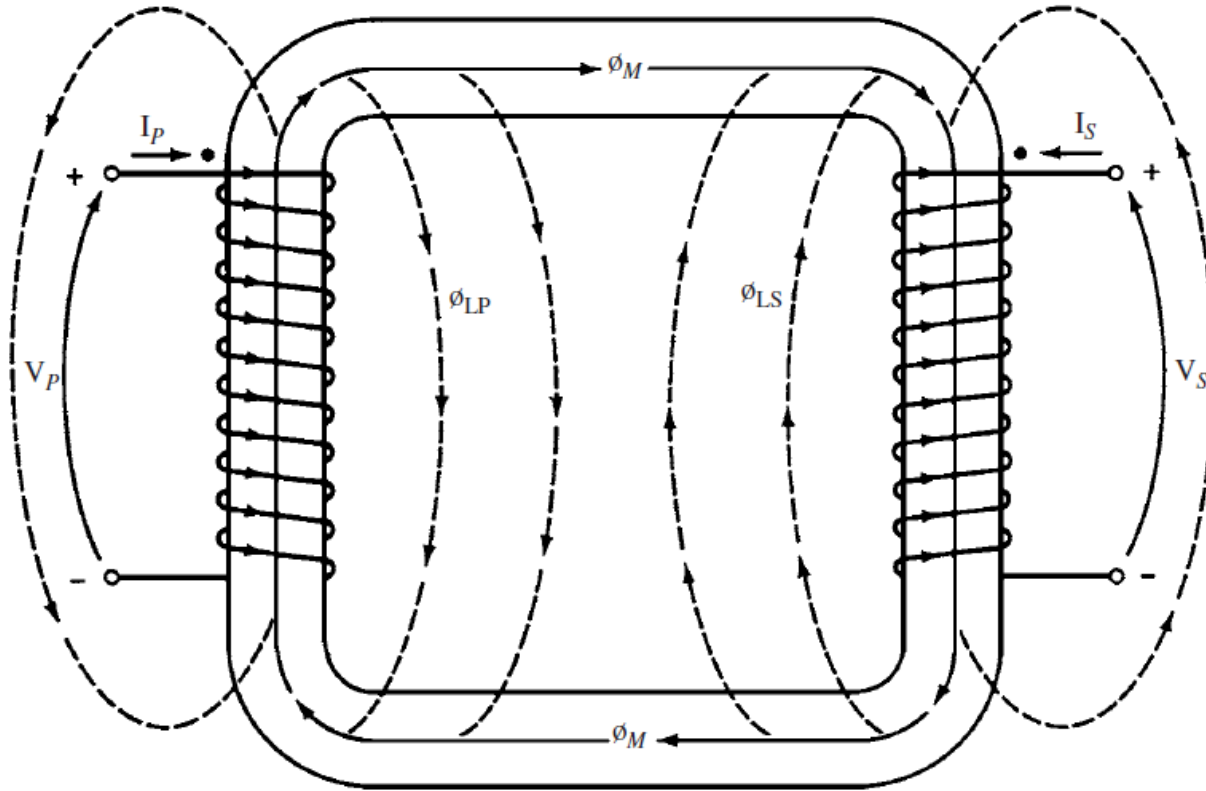
■ Reactancia de Fuga

■ Resistencia de Aislamiento

Reactancia de Fuga - Teoría

- También se la conoce como prueba de Impedancia de Corto Circuito (%Z)
 - La reluctancia del circuito magnético es aislada
 - Si la trayectoria de flujo magnético varía, una fuga de flujo no deseado ocurre.
 - La prueba detecta cortos entre laminas del núcleo, mala conexión del núcleo a tierra, cambios mecánicos en el transformador (registro de datos)
-

Reactancia de Fuga - Teoría



Flujo Magnético (mutuo y de fuga) en el núcleo de un Transformador

Idealmente 100% del flujo pasa por el núcleo, 0% fuga

Reactancia de Fuga - Medición

- Mida independientemente cada fase. El voltaje se regula para circular una corriente en el orden de 0.5 -1% del valor de la corriente nominal del devanado.
- El devanado de BT se conecta en corto-circuito
 - Asegúrese de usar un conductor lo suficientemente dimensionado para corto-circuito del devanado (No.1 AWG)
 - Valores altos de corriente se producirán en el devanado de BT
- El voltaje y la corriente a través de la impedancia son medidos simultáneamente
- Medición en el devanado de AT
 - Corriente
 - Voltaje
 - Potencia Real

$$Z_{ps} \% = \left(\frac{I_{rated} \times Z_{ps}}{V_{prated}} \right) \times 100$$

= (voltage drop at rated voltage / rated voltage) × 100

Reactancia de Fuga– Calculo

- Impedancia de Corto-circuito en transformadores monofásicos

$$\% Z_{1\phi} = \left(\frac{1}{10} \right) \cdot \left[\frac{\left(\frac{E_m}{I_m} \right) \cdot kVA_r}{\llcorner V_r \rceil^2} \right]$$

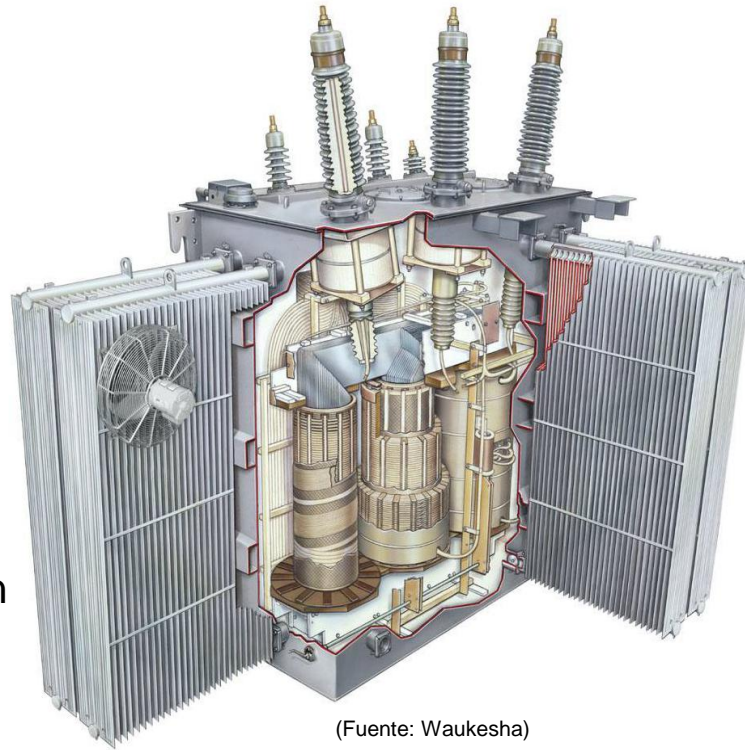
- Impedancia de Corto-circuito en transformadores trifásicos

$$\% Z_{3\phi} = \left(\frac{1}{60} \right) \cdot \left[\frac{\left(\frac{E_{12} + E_{23} + E_{31}}{I_m} \right) \cdot kVA_{3r}}{\llcorner V_{lr} \rceil^2} \right]$$

Reactancia de Fuga– Interpretación de Resultados

- ❑ Cambios de 2% en la impedancia de corto circuito no se consideran importantes.
- ❑ Cambios superiores a 3% de la impedancia de corto circuito son relevantes y requieren investigación.

Pruebas de Campo en Transformadores



■ Relación de Transformación

■ Resistencia de Devanados

■ Corriente de Excitación

■ Reactancia de Fuga

■ Resistencia de Aislamiento

(Fuente: Waukesha)

Resistencia de Aislamiento - Prueba

■ Prueba con Voltaje DC

- 250V, 500V, 1000V, 5000V, 10000V
- La duración de la prueba es de 1 a 10 min
- Diferentes tipos de pruebas

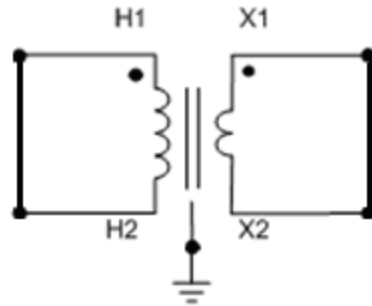
■ Conexión

- Los devanados se conectan en cortocircuito
- La cuba y el núcleo están aterrizados
- Los devanados que no estén bajo prueba se aterrizan
- Realice la prueba en cada devanado por separado

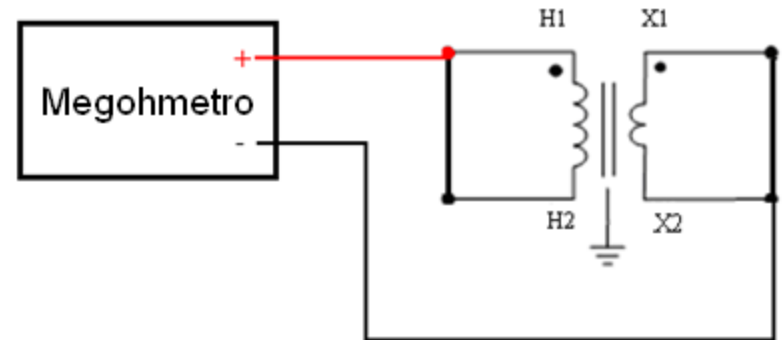


Prueba de Resistencia de Aislamiento
(Fuente: Megger)

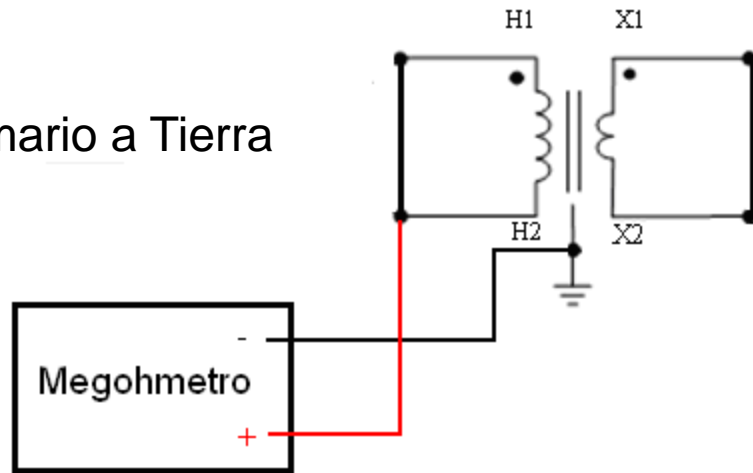
Resistencia de Aislamiento – Configuración



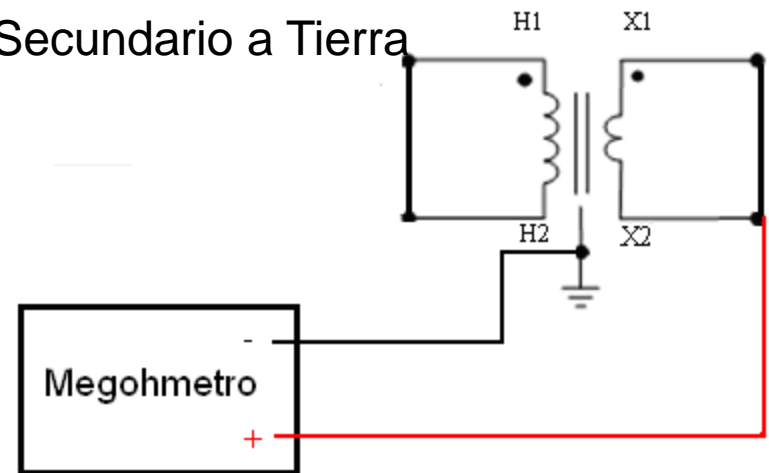
Primario a Secundario



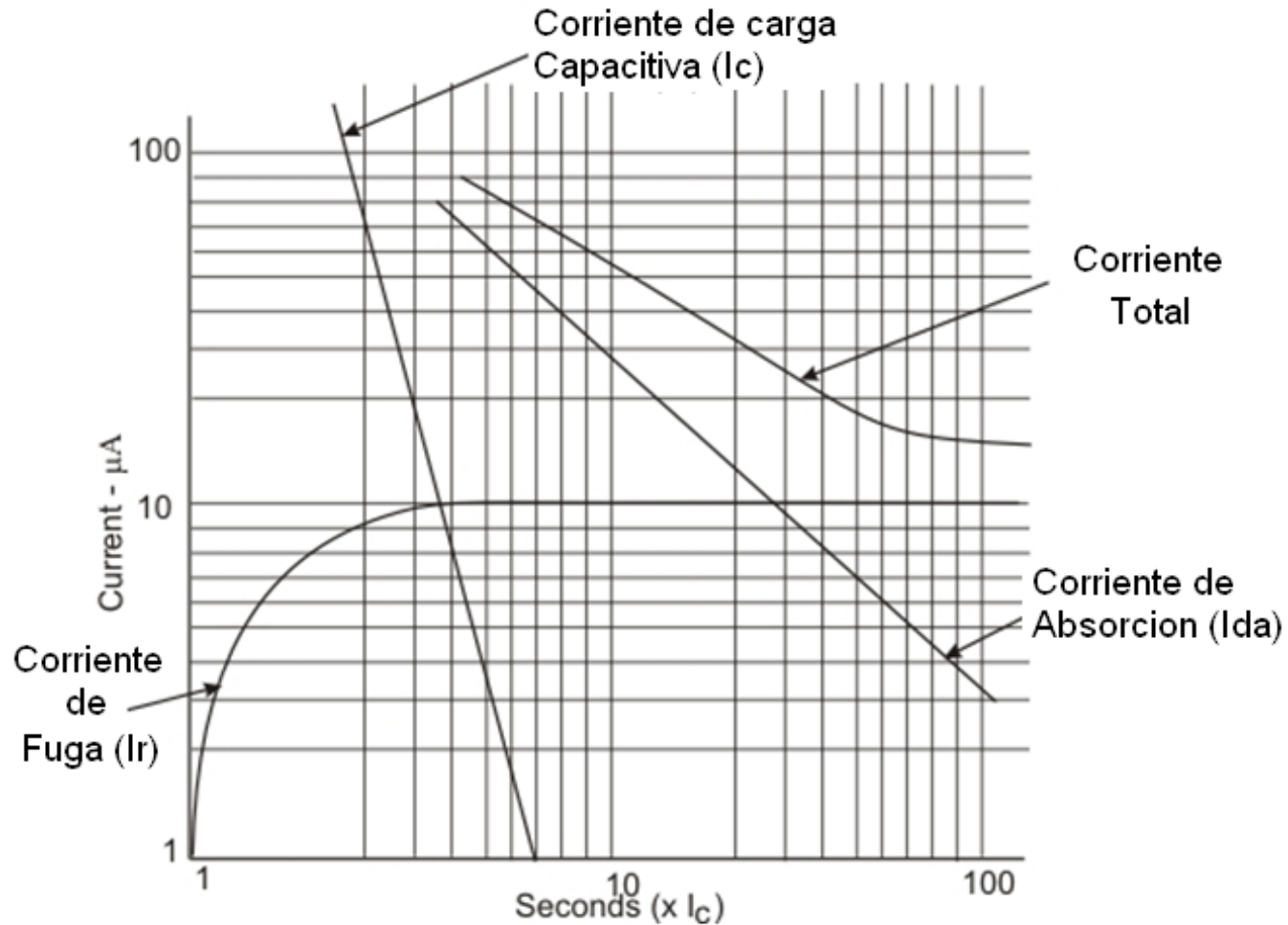
Primario a Tierra



Secundario a Tierra



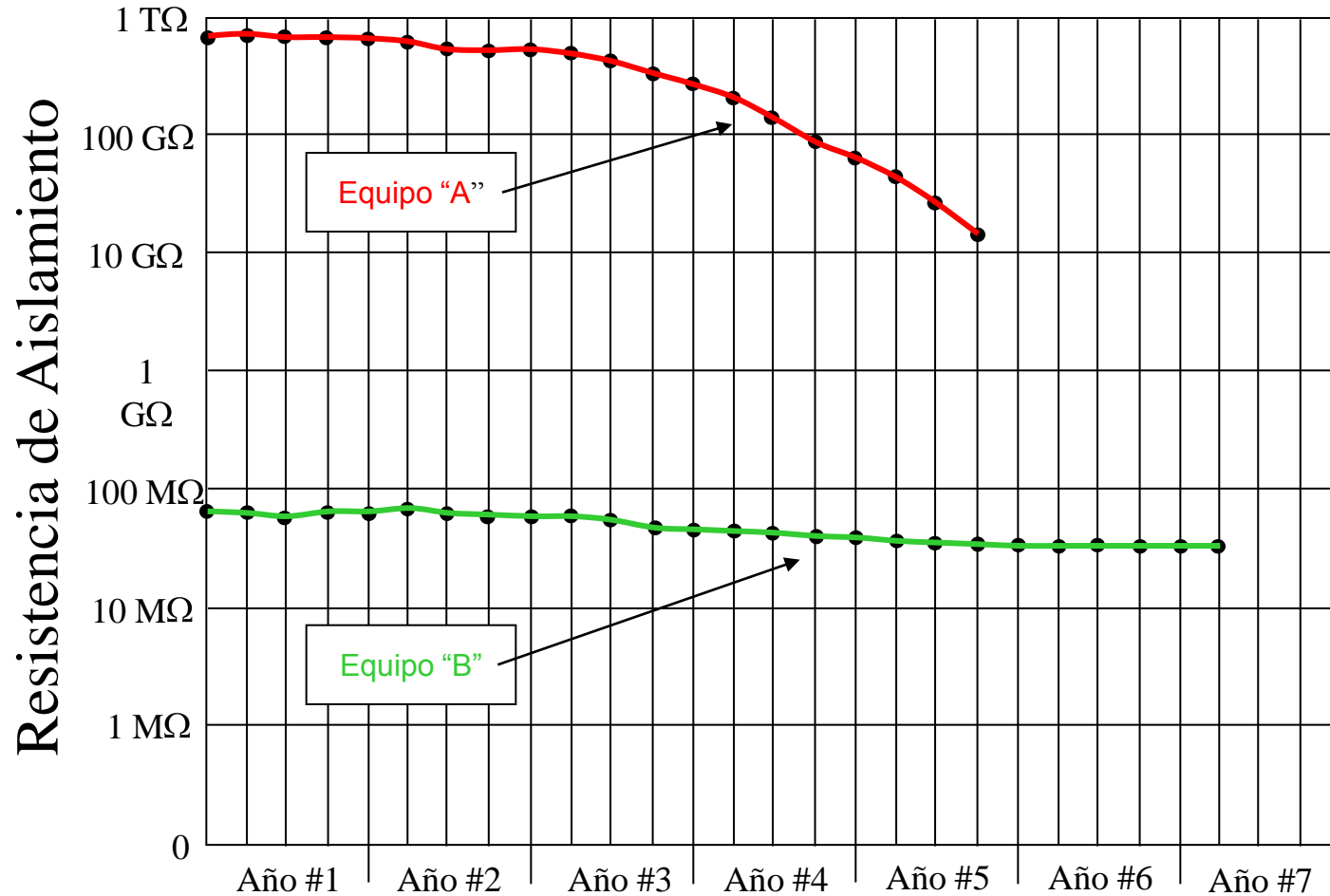
Resistencia de Aislamiento - Corrientes



Resistencia de Aislamiento - Pruebas

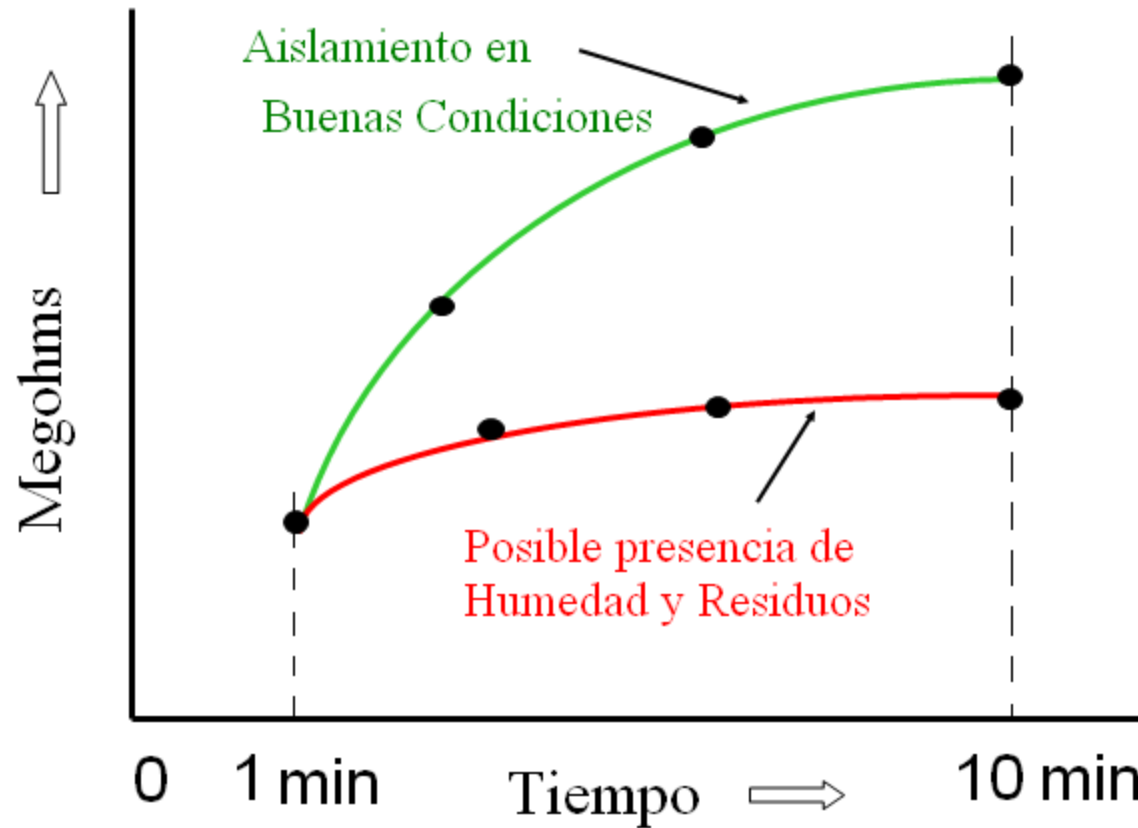
1. Resistencia de Aislamiento
2. Índice de Polarización (PI)
3. Relación de Absorción del Dieléctrico (DAR)
4. Voltaje de Elevación (SV)
5. Descarga Dieléctrica (DD)

Resistencia de Aislamiento – Registro



Índice de Polarización

■ Prueba Tiempo-Resistencia



Índice de Polarización - Prueba

- Se toman lecturas a 1 y 10 minutos
- El índice de polarización (PI) es la relación de las resistencias medidas

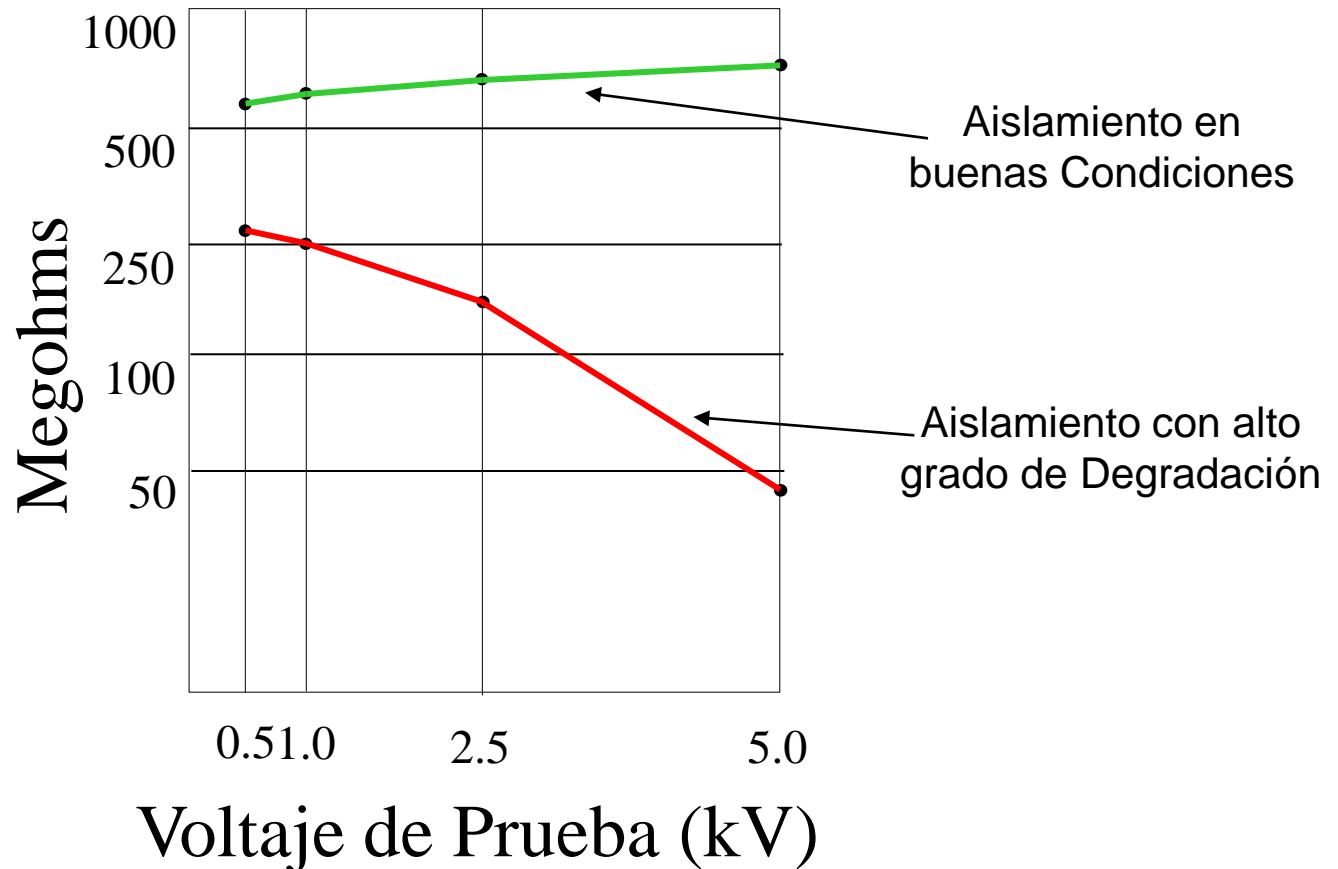
$$PI = R_{10\text{min}} / R_{1\text{min}}$$

- Valores superiores a 1.5 son indicativo de una buena condición del aislamiento. Transformadores de Potencia normalmente registran valores entre 1.1 y 1.3. Valores <1 requiere acción correctiva inmediata.
- La relación de Absorción del Dieléctrico (DAR) se utiliza para aislamientos de poca absorción

$$DAR = R_{60\text{sec}} / R_{30\text{sec}}$$

- PI y DAR no son dependientes de la temperatura del aislamiento

Prueba de Elevación de Voltaje

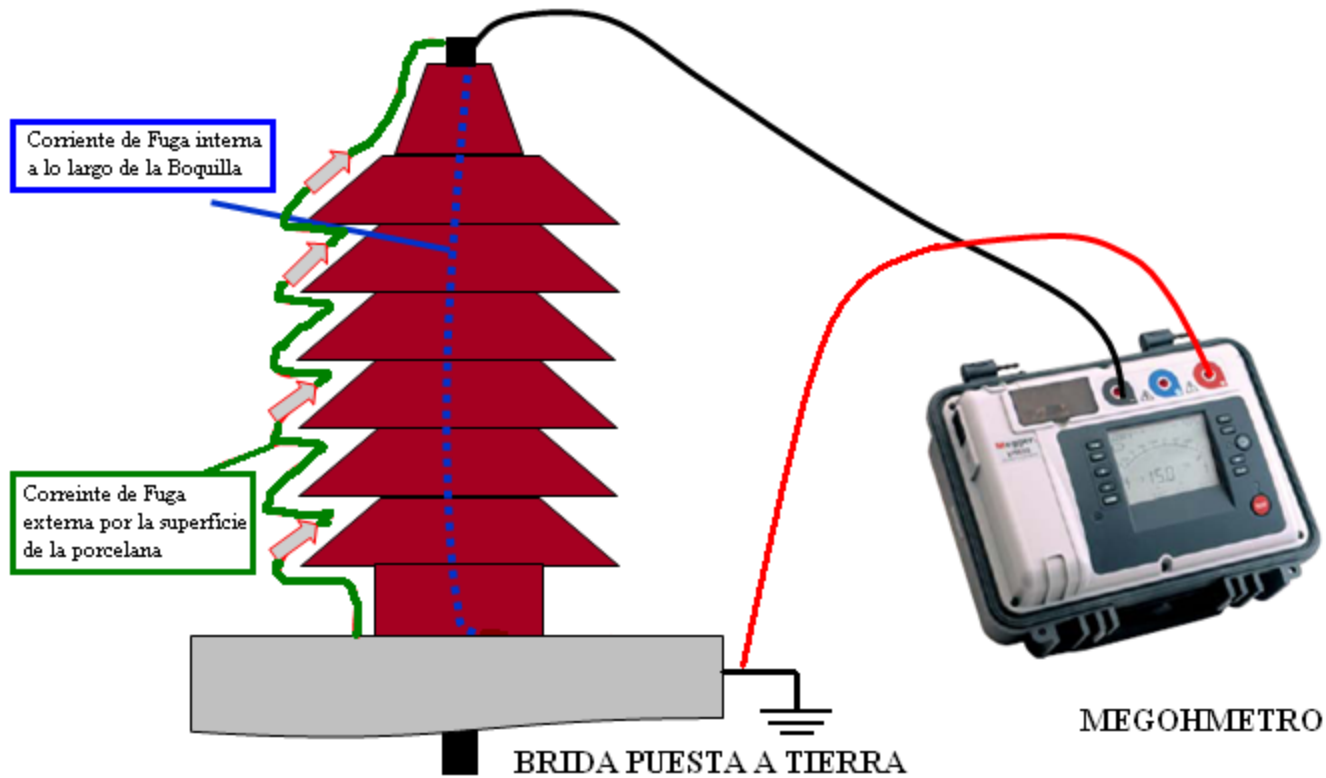


Prueba de Descarga Dieléctrica

- Mide las corrientes de descarga 60 segundos después de completar una prueba de resistencia de aislamiento
 - La corriente de re-absorción permite verificar la condición del aislamiento
 - Una re-absorción lenta es indicativo de problemas de aislamiento
 - El valor de DD es el valor de corriente que fluye después de 1 minuto (nA)
-

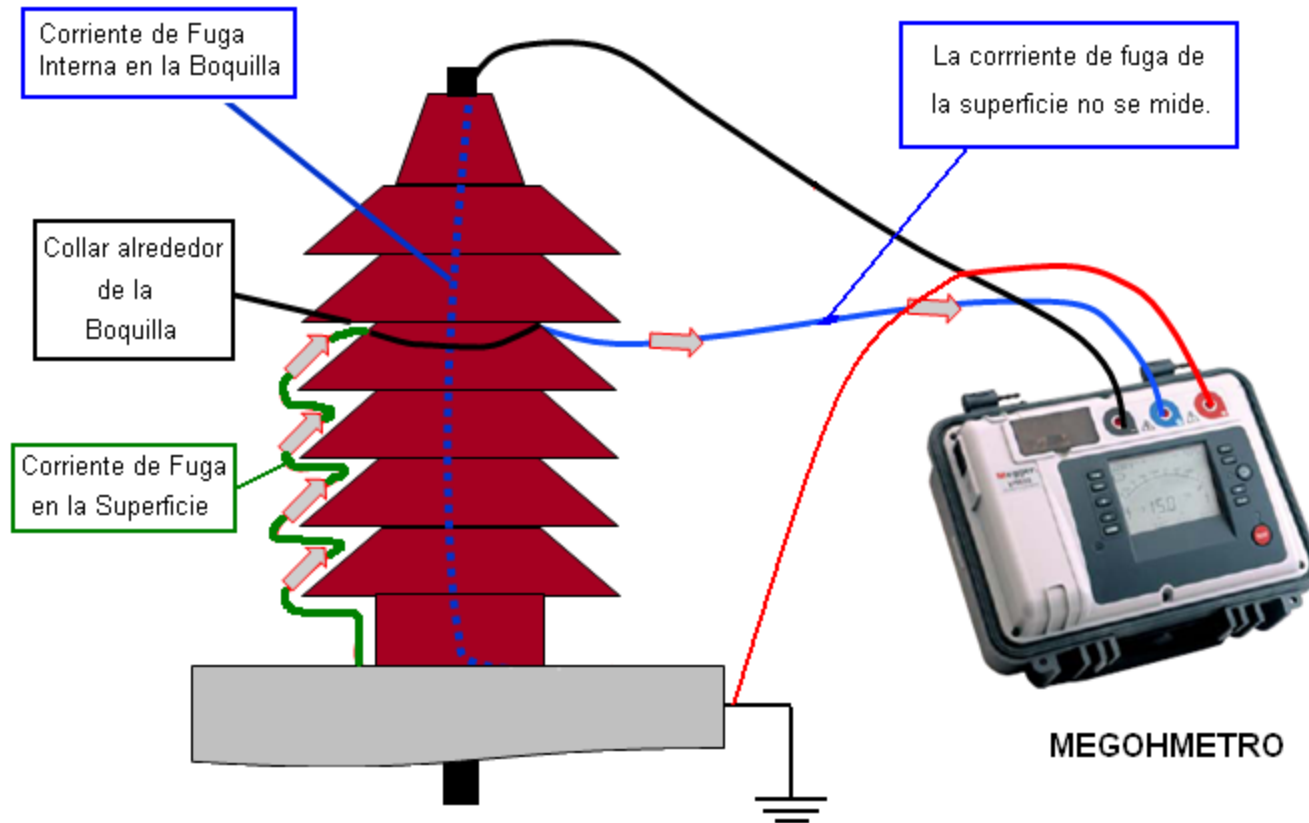
Resistencia de Aislamiento - Boquilla

CONEXION SIN TERMINAL DE GUARDA



Resistencia de Aislamiento - Boquilla

CONEXION CON TERMINAL DE GUARDA





DELTA



FRAX



MTO



TTR



MCT



MoM



DLRO

TYPES OF TRANSFORMER TESTS

Component	Megger Instrument:		
Windings	Resistance	MTO	
	Ratio/polarity	TTR	
	Excitation current	DELTA	TTR
	Short-circuit impedance	FRAX	MLR
	Frequency response analysis	FRAX	
	Insulation resistance	MIT/S1	
	Capacitance	DELTA	IDA.X
	Power factor/tan delta	DELTA	IDA.X
	Dielectric frequency response	IDA.X	
Bushings	Capacitance	DELTA	IDA.X
	Power factor/tan delta	DELTA	IDA.X
	Dielectric frequency response	IDA.X	
Insulating oil	Water content	KF	
	Dielectric strength	OTS	
	Power factor/tan delta	DELTA	IDA.X
Cellulose	Insulation		
	Moisture content	IDA.X	
Tap Changers - Load	Contact/winding resistance	MTO	
	Ratio	TTR	
Tap Changers - De Energized	Timing (make before break)	MTO	
	Contact pressure (resistance test)	MTO	
	Ratio	TTR	
Core/Tank	Insulation resistance	MCT	MIT/S1
	Frequency response analysis	FRAX	IDA.X
	Ground test	MoM	DLRO



MIT/S1



IDA.X



OTS



KF