Introducción a pruebas para transformadores de potencia

Arturo H. Oropeza
Principal Engineer
Doble Engineering Company
aoropeza@doble.com

©2022 Altanova Group. All Rights Reserved.

ALTANOVA
A DOBLE COMPANY

ALTANOVA, una empresa Doble, suministra soluciones de diagnóstico a empresas del sector de energía eléctrica e industrias asociadas, con el propósito de mejorar el desempeño y rendimiento de los activos eléctricos aportando instrumentos de prueba portátiles, sistemas de monitoreo avanzado, y servicios profesionales especializados.

©2022 Altanova Group. All Rights Reserved

Breve historia de Altanova

1938 Se establece I.S.A. (Istrumentazioni Sistemi Automatici S.r.l.) en Taino ITALY

1999 Nace TECHIMP como producto indirecto de la Universidad de Bolonia, Italia.

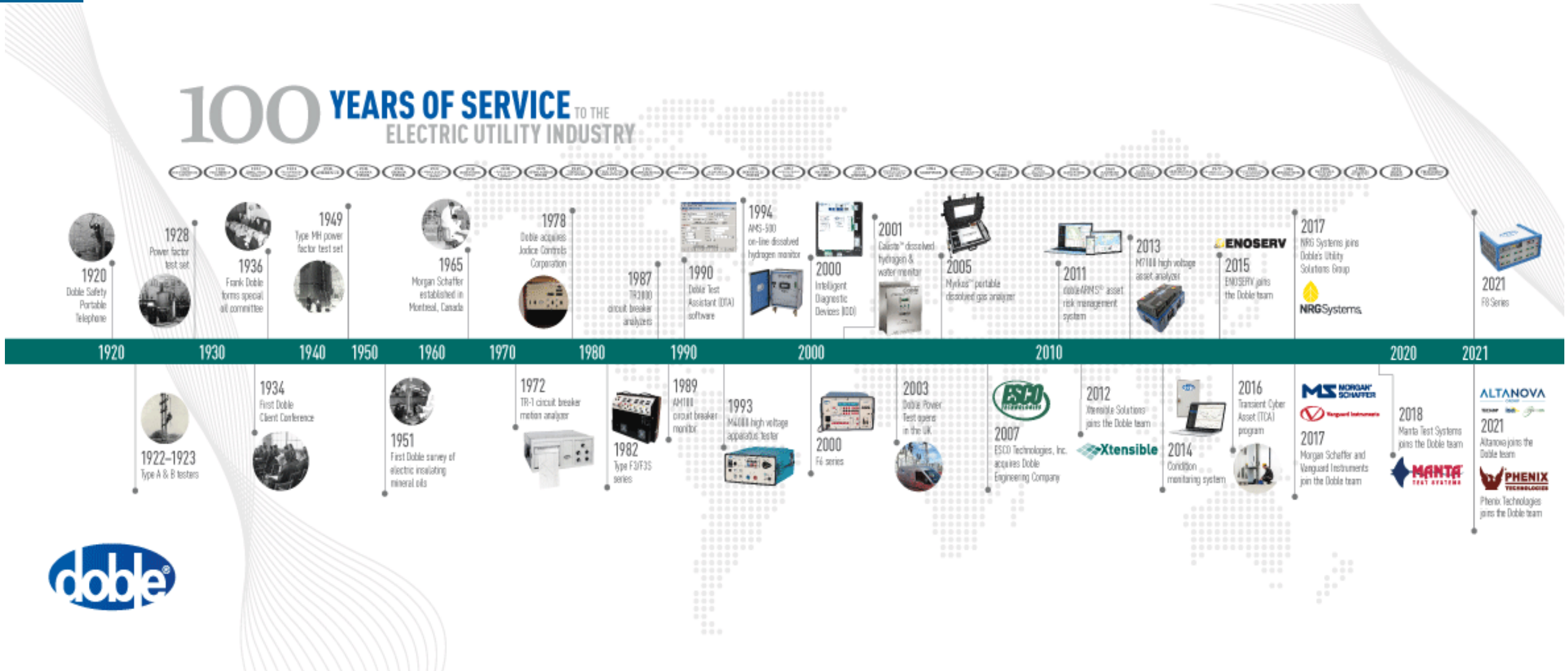
2017 I.S.A. y TECHIMP se unen dando así nacimiento al grupo ALTANOVA

2019 INTELLISAW se une al grupo ALTANOVA

2021 ALTANOVA GROUP se convierte en parte del grupo de tecnología ESCO uniéndose a Doble Engineering Company, como parte de la división USG.

©2022 Altanova Group. All Rights Reserved

Breve Historia de Doble



©2022 Altanova Group. All Rights Reserved

Altanova Hoy

100
Paises

12
Oficinas en el mundo

+150
Empleados

+150
Socios de Ventas

+5550
Clientes a nivel mundial

Como parte del grupo de soluciones en tecnología para el sector eléctrico ESCO

Productos de Marcas

©2022 Altanova Group. All Rights Reserved

Nuestras Soluciones

Equipos de prueba

Esenciales para pruebas de mantenimiento. Útiles en diferentes fases de la vida útil de activos

- Aceptación y puesta en marcha
- Operación
- Mantenimiento
- De comisión

Servicios Profesionales

Diversidad en ofertas de acuerdo al aparato eléctrico y su vida útil:

- Instalación y puesta en marcha
- Diagnósticos
- Análisis de datos
- Consultoría
- Capacitación

Sistemas de Monitoreo

Cambio de tipo de mantenimiento (de base tiempo a base condición)

Enfoque en mantenimiento preventivo y cambio a evaluación de costo de consecuencia de falla

Marcada tendencia de digitalización en la industria.

©2022 Altanova Group. All Rights Reserved

Soluciones en pruebas y equipos de monitoreo para:

- Transformadores
- Interruptores o disyuntores
- Equipo GIS
- Cables
- Switchgear
- Baterías
- Transformadores de Corriente y Voltaje
- Relés de Protección
- Transductores y medidores
- Maquinas Rotativas
- Unidades de velocidad variable
- Líneas aéreas

Objetivo general del seminario

- Dirigido a personal de mantenimiento para transformadores
- Entender las diferencias entre las pruebas para transformadores
- Entender los propósitos de las pruebas para transformadores
- Breve y superficial resumen de filosofías de mantenimiento

©2022 Altanova Group. All Rights Reserved

Pruebas a Transformadores

©2022 Altanova Group. All Rights Reserved

Temas

- Transformador
- Normas
- Pruebas de fabrica vs. Pruebas de campo
- Teoría básica y modelo dieléctrico
- Gestión de Activos y Mantenimiento
- Pruebas recomendadas
- Casos de estudio

©2022 Altanova Group. All Rights Reserved

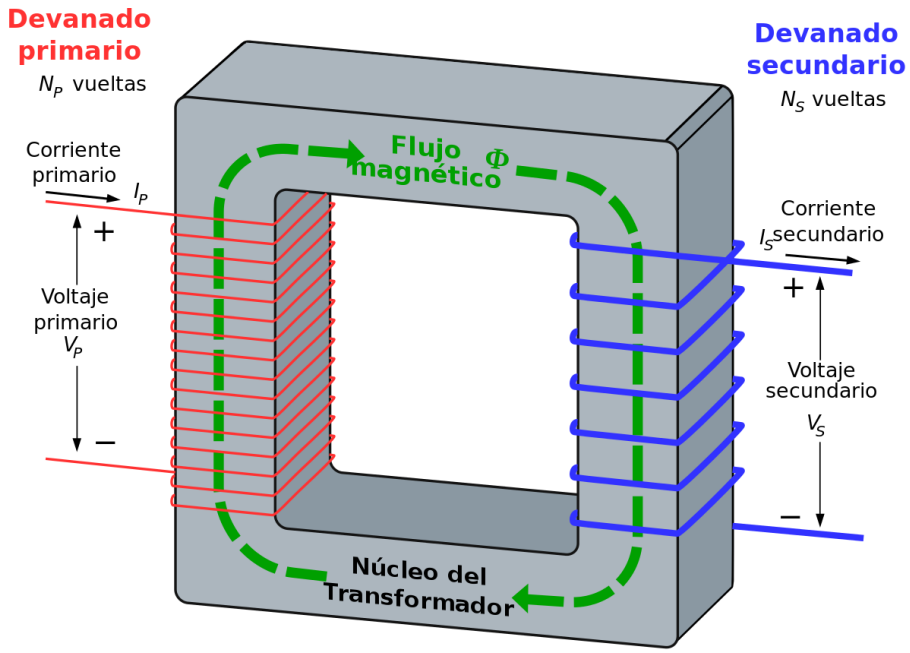
Transformador

©2022 Altanova Group. All Rights Reserved

Transformador

¿Qué es un Transformador?

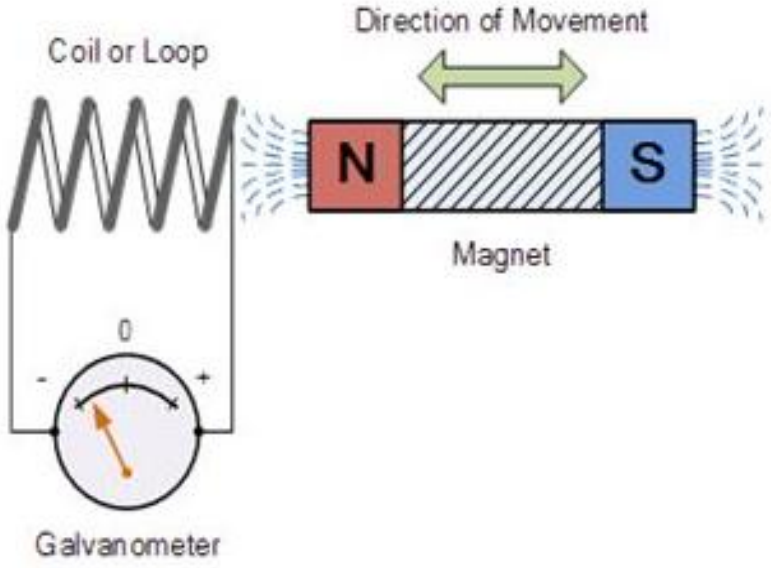
Un transformador es un dispositivo electromagnético que transfiere energía de un circuito a otro mediante un acoplamiento inductivo.



©2022 Altanova Group. All Rights Reserved

Transformador (cont.)

1830s - Los trabajos de Michael Faraday relacionados a electromagnetismo le permiten descubrir las propiedades y funcionamiento del transformador.

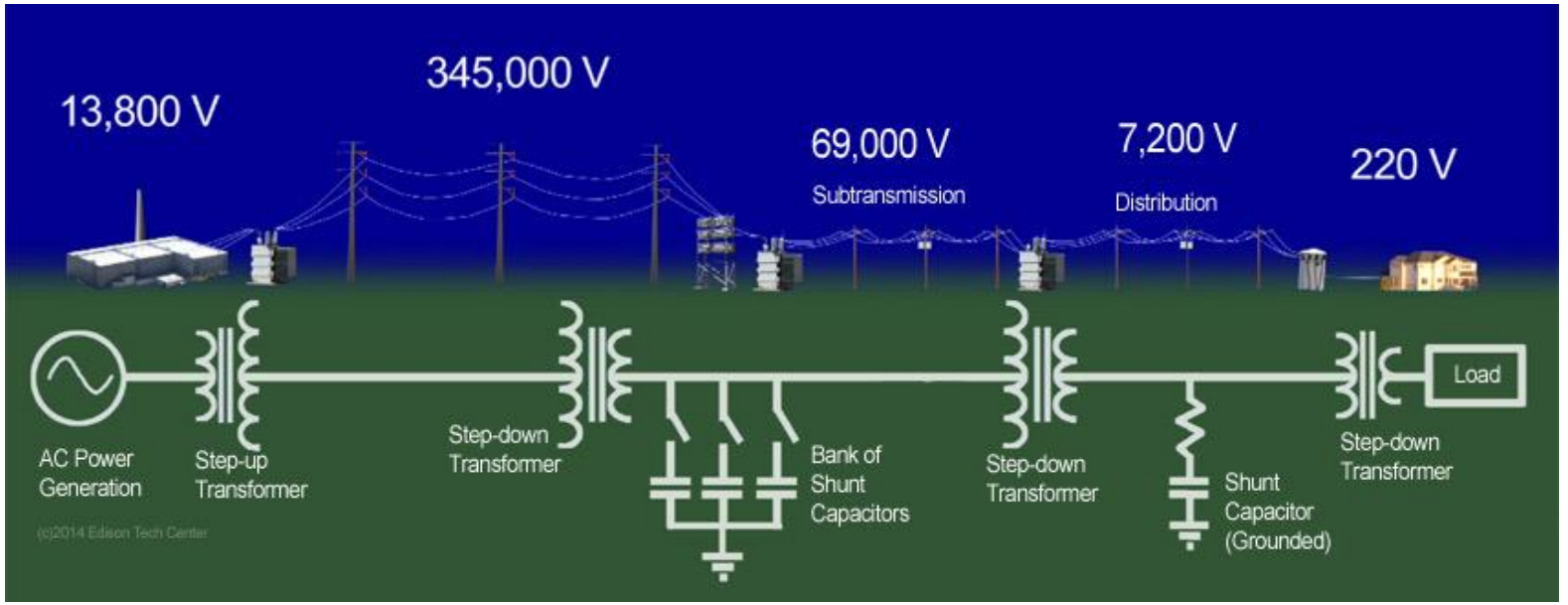


El Experimento de Faraday –
Relación entre el campo electromagnético y el flujo magnético

©2022 Altanova Group. All Rights Reserved

Transformador (cont.)

- ¿Porque necesitamos transformadores?
- ¿Dónde necesitamos transformadores?



©2022 Altanova Group. All Rights Reserved

Transformador (cont.)

Componentes principales del transformador

- Núcleo
- Devanados
- Cambiadores de carga
- Bushings
- Fluido aislante
- Tanque (cuba)
- Relés auxiliares
- Caja de control
- Válvulas de presión e Indicadores de temperatura
- Radiadores, ventiladores y bombas

Sistema de aislamiento

©2022 Altanova Group. All Rights Reserved

Temas

- Transformador
- Normas
- Pruebas de fabrica vs. Pruebas de campo
- Teoría básica y modelo dieléctrico
- Gestión de Activos y Mantenimiento
- Pruebas recomendadas
- Casos de estudio

©2022 Altanova Group. All Rights Reserved

Normas

- IEEE
  - Serie IEEE C57.2.00 (Requerimientos Generales para Transformadores inmersos en líquidos)
  - Serie IEEE C57.12.90 (Código de pruebas a Transformadores inmersos en líquidos)
  - Serie IEEE C57.152 2013 (Guia para diagnósticos de pruebas en campo para transformadores con fluidos aislantes)
- IEC
  - Serie IEC 60076 Transformadores de Potencia (Partes 1 – 26)
  - IEC 60076 – 3: 2013 + AMD: 2018 (Niveles de aislamiento, pruebas dieléctricas y espacios externos en aire)

©2022 Altanova Group. All Rights Reserved

Temas

- Transformador
- Normas
- Pruebas de fabrica vs. Pruebas de campo
- Teoría básica y modelo dieléctrico
- Gestión de Activos y Mantenimiento
- Pruebas recomendadas
- Casos de estudio

©2022 Altanova Group. All Rights Reserved

Fabrica vs. Campo

- Diferencias en protocolo de pruebas
- Pruebas en Fabrica
  - Diferentes clases según potencia y voltaje
  - Diferente clasificación
  - De acuerdo a especificación del Cliente
- Pruebas en campo
  - Motivación
  - Tipo de instrumentación
  - Tiempo de autorización

©2022 Altanova Group. All Rights Reserved

Fabrica vs. Campo (cont.)

- Pruebas en Fabrica tema muy extenso (para otro día)
- Pruebas en campo
  - Motivación y propósitos
  - Guias de recomendación para instalación y mantenimiento
  - Lineamientos de seguridad requeridos
  - Recomendaciones y prácticas para pruebas a diferentes voltajes
  - Tipo y propósito de instrumentación
  - Tiempo de autorización para ejecución de pruebas
  - Relación con programas de gestión de activos

©2022 Altanova Group. All Rights Reserved

Fabrica vs. Campo (cont.)

- Pruebas en campo
  - Motivación
    - Costo del transformador
    - Expuesto a fallas difíciles de prevenir (posiblemente catastróficas)
    - Valor limitado de inspecciones visuales y difícil de diagnosticar
    - Reparaciones costosas
  - Filosofías de Mantenimiento
    - Dependiente de la experiencia del practicante
    - Dependiente a la criticalidad del activo
    - Dependiente del presupuesto

©2022 Altanova Group. All Rights Reserved

Temas

- Transformador
- Normas
- Pruebas de fabrica vs. Pruebas de campo
- Teoría básica y modelo dieléctrico
- Gestión de Activos y Mantenimiento
- Pruebas recomendadas
- Casos de estudio

©2022 Altanova Group. All Rights Reserved

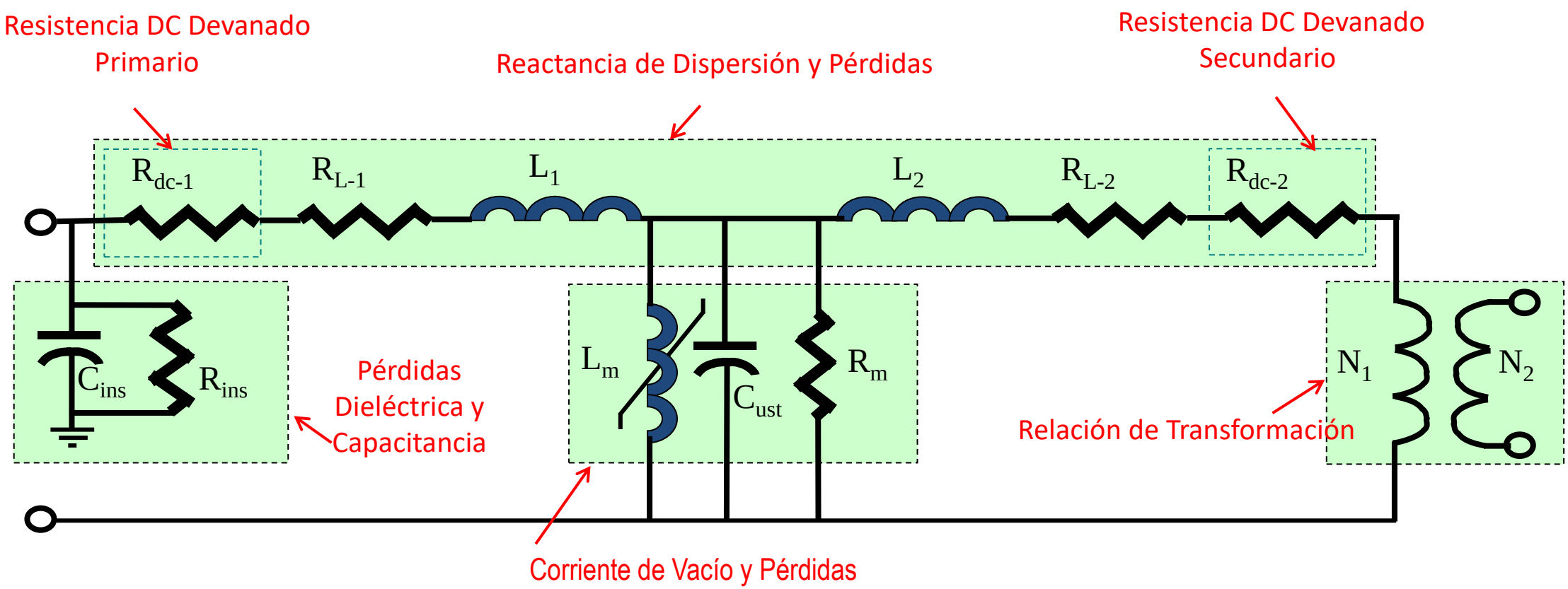
Teoría básica y modelo dieléctrico

- Componentes del transformador
  - Núcleo
  - Devanados (cambiadores de carga)
  - Bushings
  - Fluido aislante
  - Tanque (cuba)
  - Sistemas de enfriamiento (bombas, radiadores, tanques auxiliares)
  - Relés
  - Sistemas auxiliares (Apartarrayos, controles, indicadores)

©2022 Altanova Group. All Rights Reserved

Teoría básica y modelo dieléctrico

Modelo dieléctrico simplificado de un trasformador



©2022 Altanova Group. All Rights Reserved

Teoría básica y modelo dieléctrico

- Componentes en las mediciones
  - Dependerá del instrumento
  - Efectos de las pruebas de AC y DC
  - Área de foco
  - Simplificación en la interpretación de resultados
  - Medir características eléctricas fundamentales
  - Verificar la eficiencia de los componentes
  - Identificar condiciones de falla incipientes

©2022 Altanova Group. All Rights Reserved

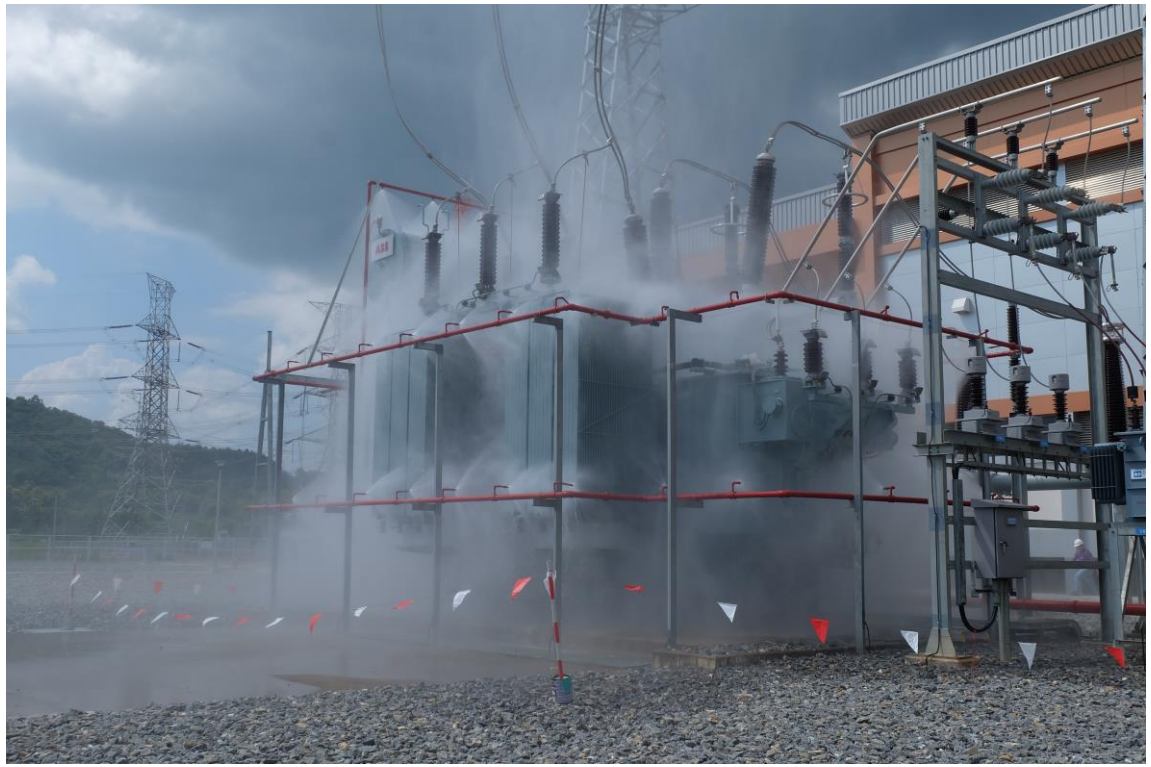
Temas

- Transformador
- Normas
- Pruebas de fabrica vs. Pruebas de campo
- Teoría básica y modelo dieléctrico
- Gestión de Activos y Mantenimiento
- Pruebas recomendadas
- Casos de estudio

©2022 Altanova Group. All Rights Reserved

Cuestionamientos importantes

- ¿Porque probar?
- ¿Cuándo probar?
- ¿Quién deberá hacer las pruebas?
- ¿Qué pruebas hacer?



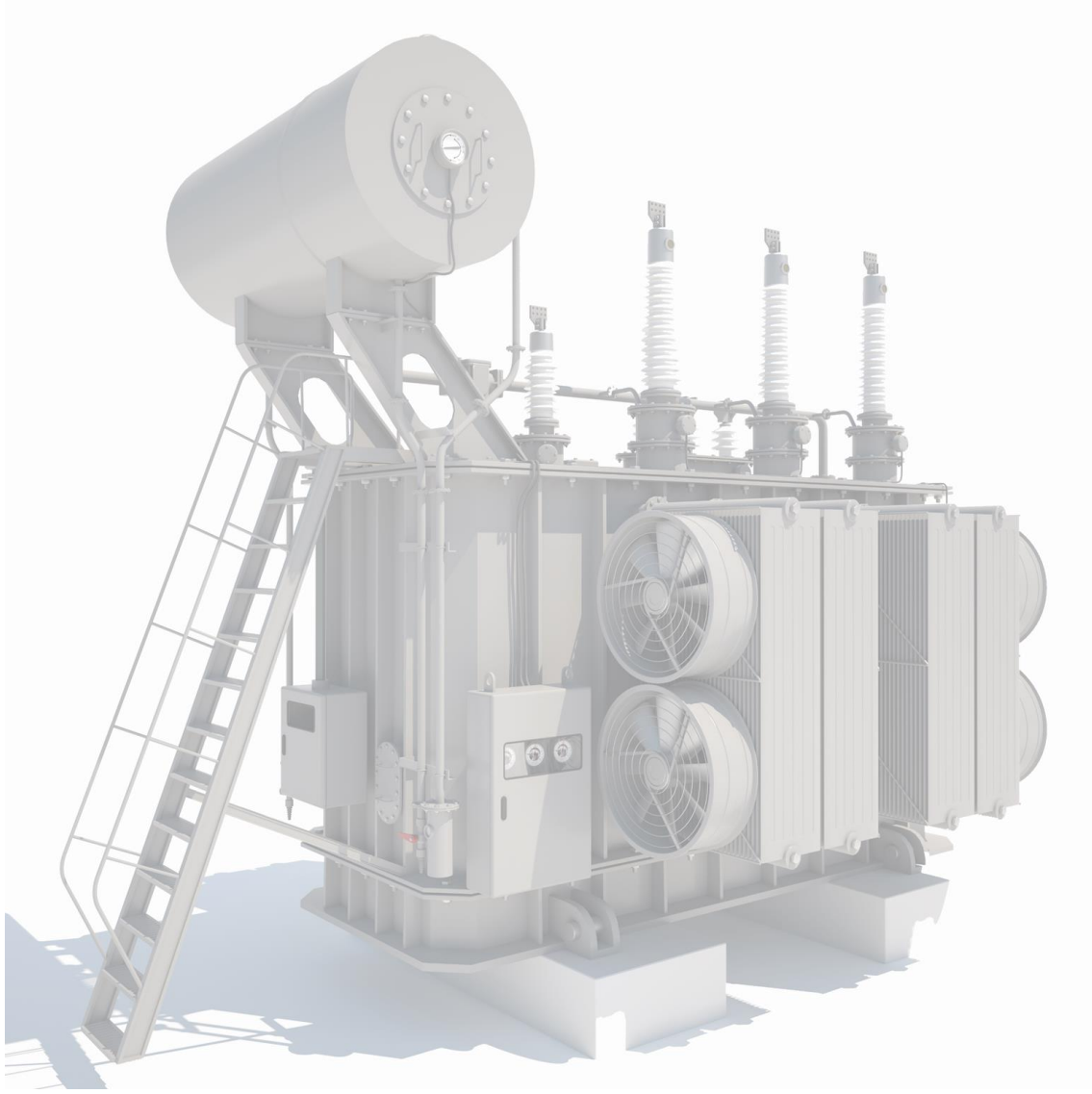
©2022 Altanova Group. All Rights Reserved

Consideraciones

¿Porque probar?

- Los transformadores son costosos
- Generalmente confiables y durables pero:
  - Difícil de diagnosticar condición sin pruebas
  - Reparaciones costosas
- La primera pregunta cuando se presenta una falla es:

¿Cuándo fue la última vez que se probó?

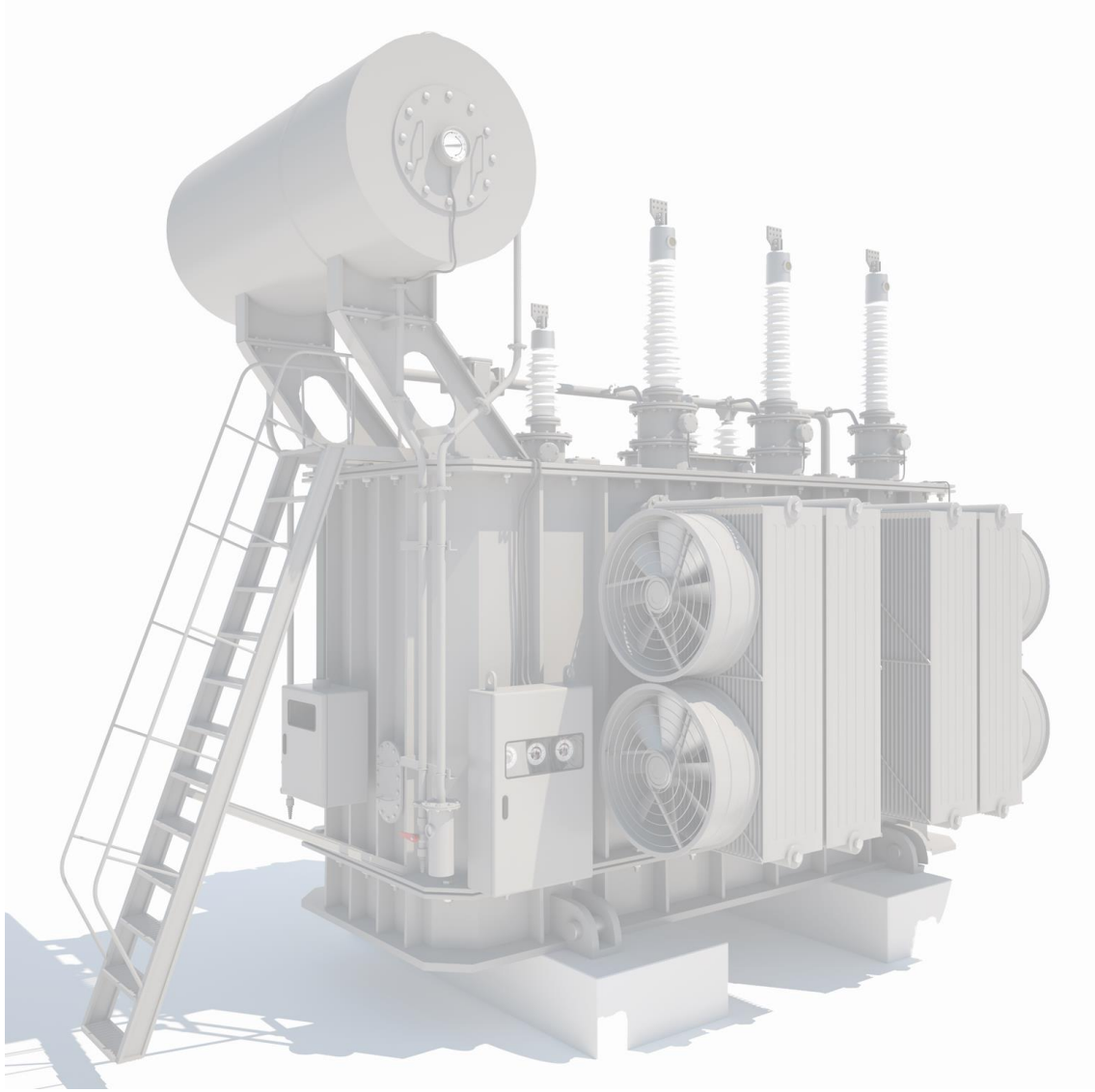


©2022 Altanova Group. All Rights Reserved

Consideraciones (cont.)

¿Cuándo probar?

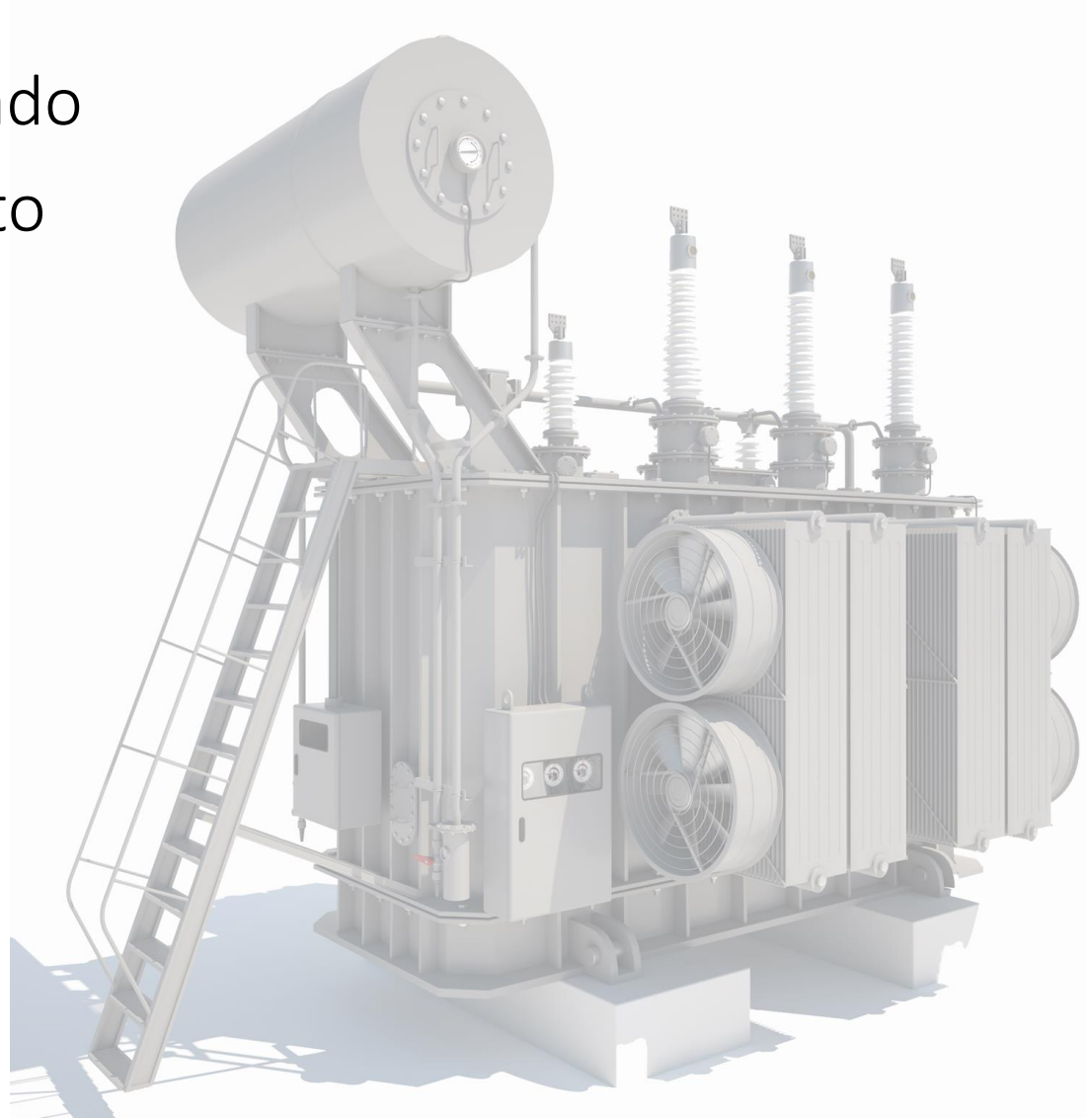
- En fabrica
  - De acuerdo a especificaciones de pruebas en fabrica según normas seleccionadas
- En uso (campo)
  - Seguir recomendación de normas de acuerdo a guias para pruebas en campo



©2022 Altanova Group. All Rights Reserved

Consideraciones (cont.)

- Programa de Gestión de Activos adecuado
- Metodología/Filosofía de mantenimiento
- Protocolo normativo de pruebas
- Evaluación de riesgos
- Políticas de manejo de recursos
  - Personal
  - Equipos
  - Base de conocimiento
- Acciones correctivas apropiadas

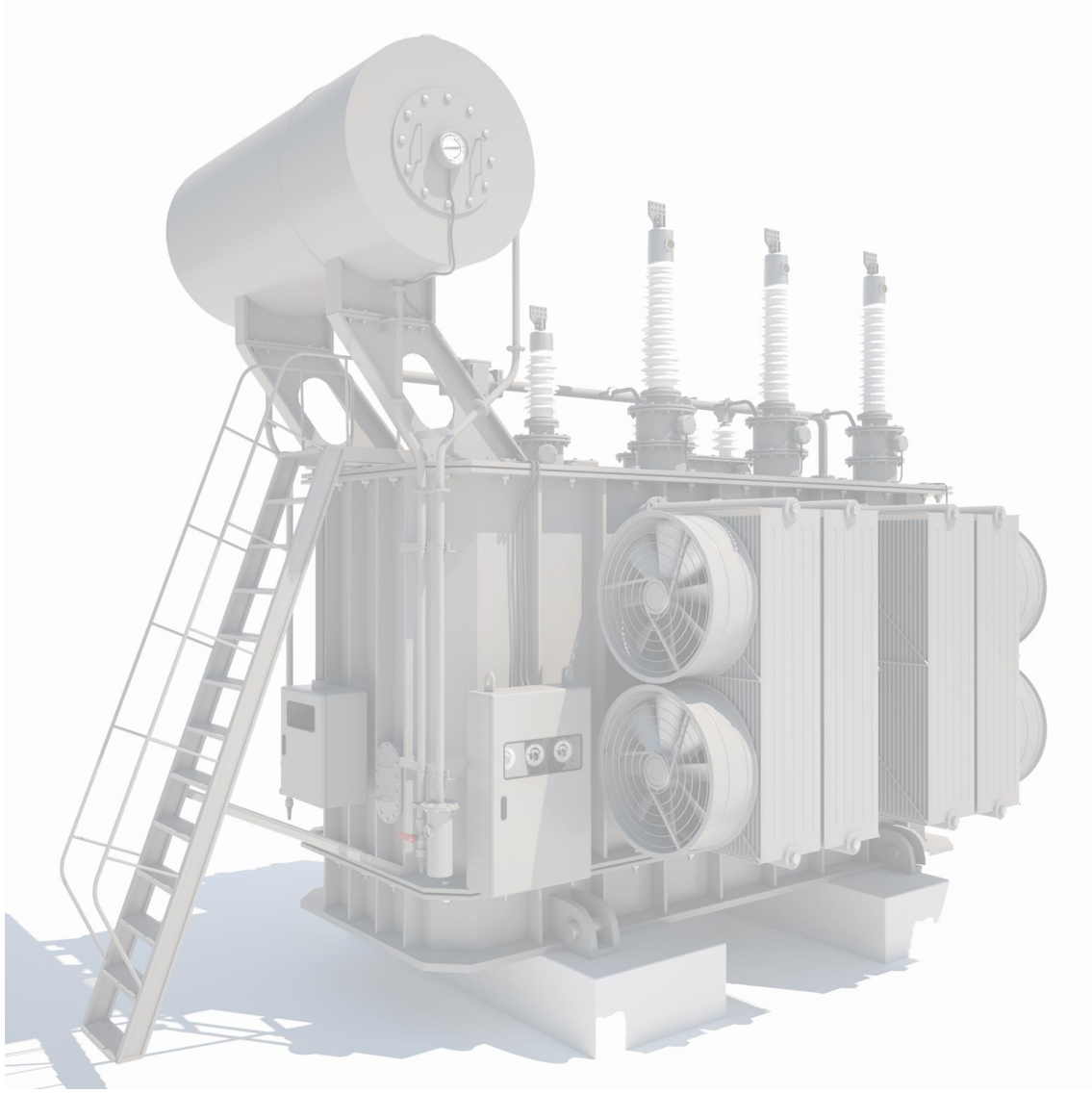


©2022 Altanova Group. All Rights Reserved

Consideraciones (cont.)

¿Quién deberá hacer las pruebas?

- Recursos internos
  - Capacitación de Personal
    - Competencia
  - Equipos de pruebas
    - Adecuados para los objetivos trazados
  - Base de conocimiento
    - Fácilmente accesible
- Recursos externos
  - Fabricantes de transformadores
  - Fabricantes de equipos de pruebas
  - Proveedores de servicios

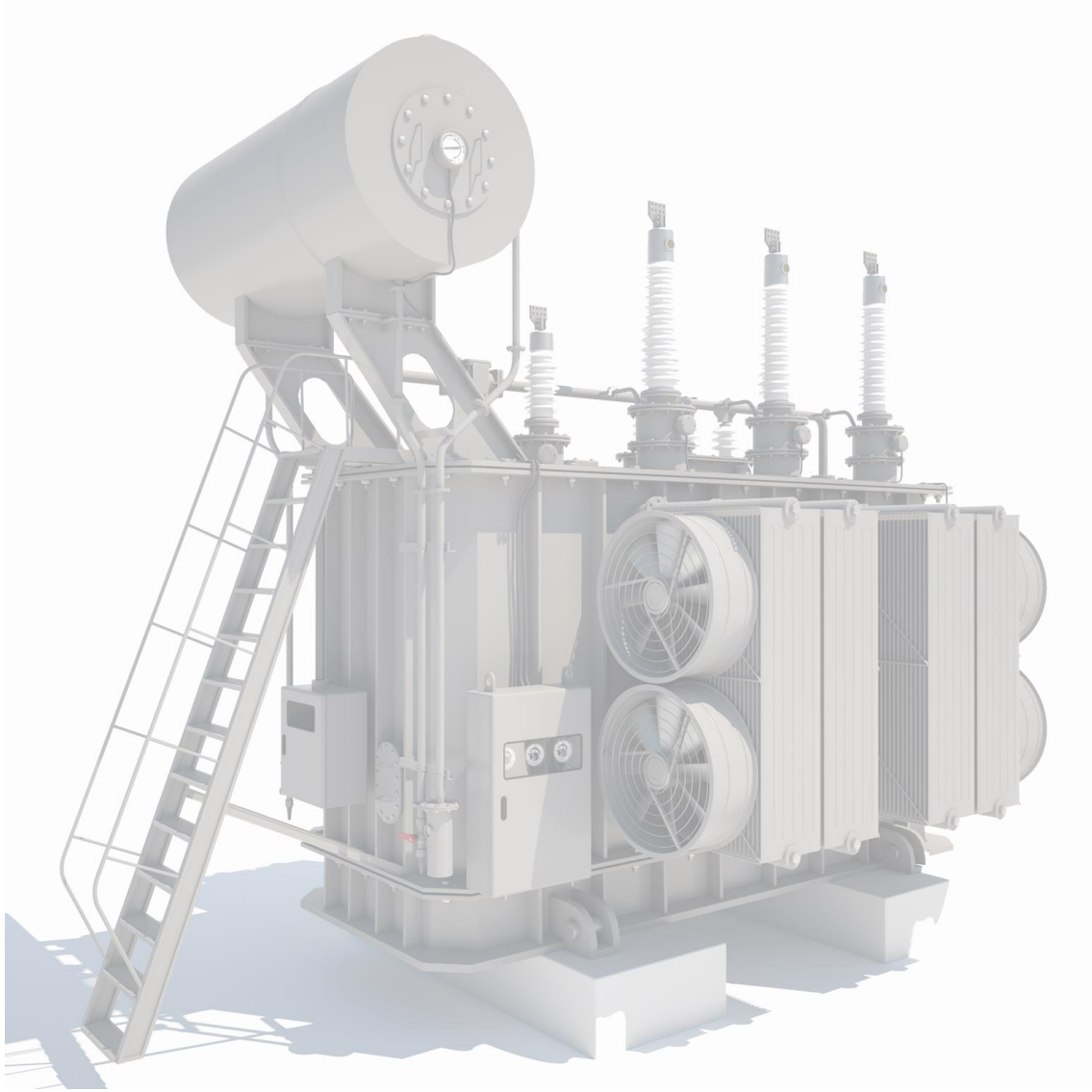


©2022 Altanova Group. All Rights Reserved

Consideraciones (cont.)

¿Qué pruebas hacer?

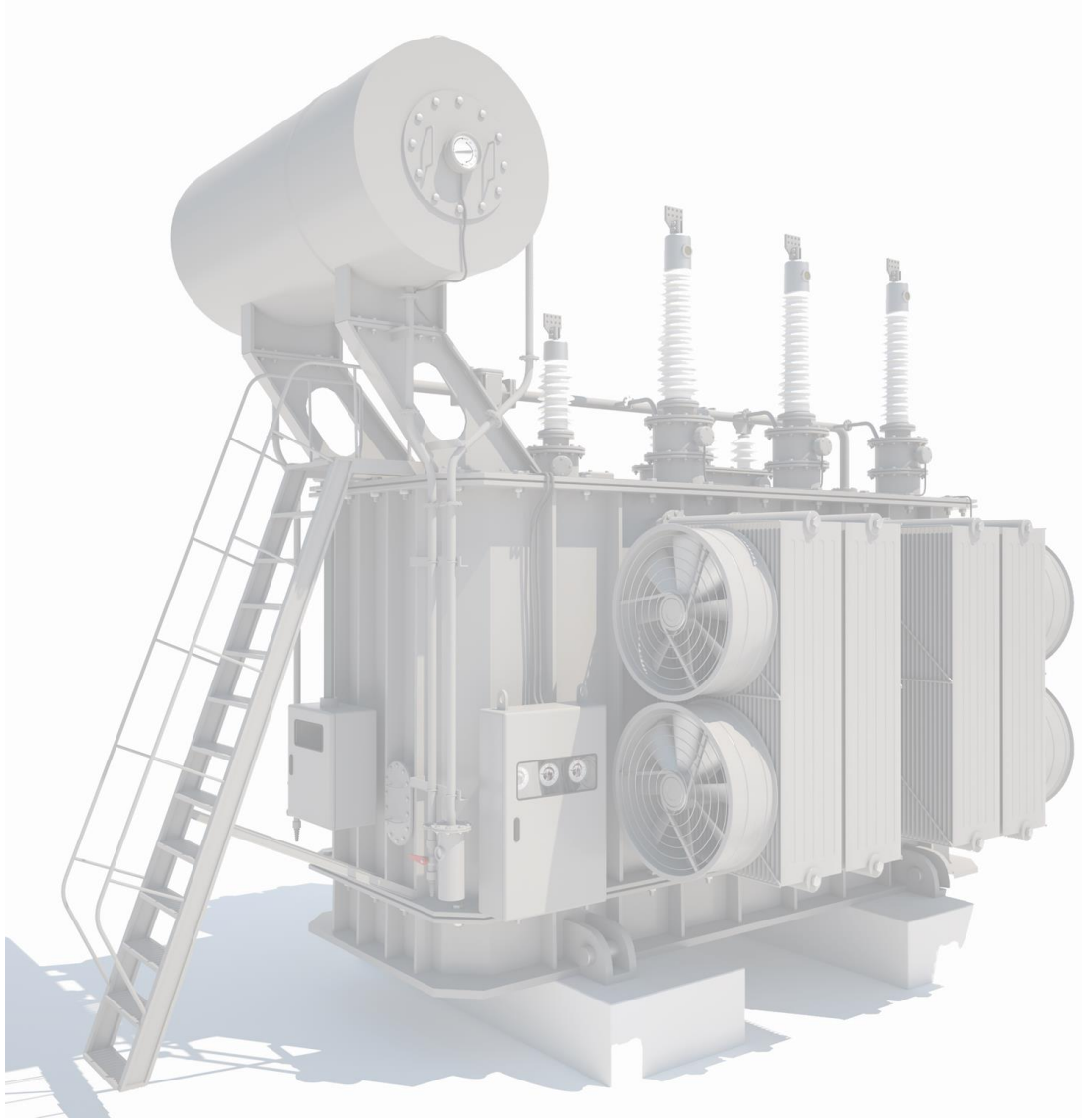
- De acuerdo a los puntos estresantes asociados con la vida útil del transformador
  - Transporte
  - Instalación
  - Ambiente en servicio
  - Fallas (cercanas, transitorias)
- Para una rápida identificación de desviaciones de la condición original



©2022 Altanova Group. All Rights Reserved

Consideraciones (cont.)

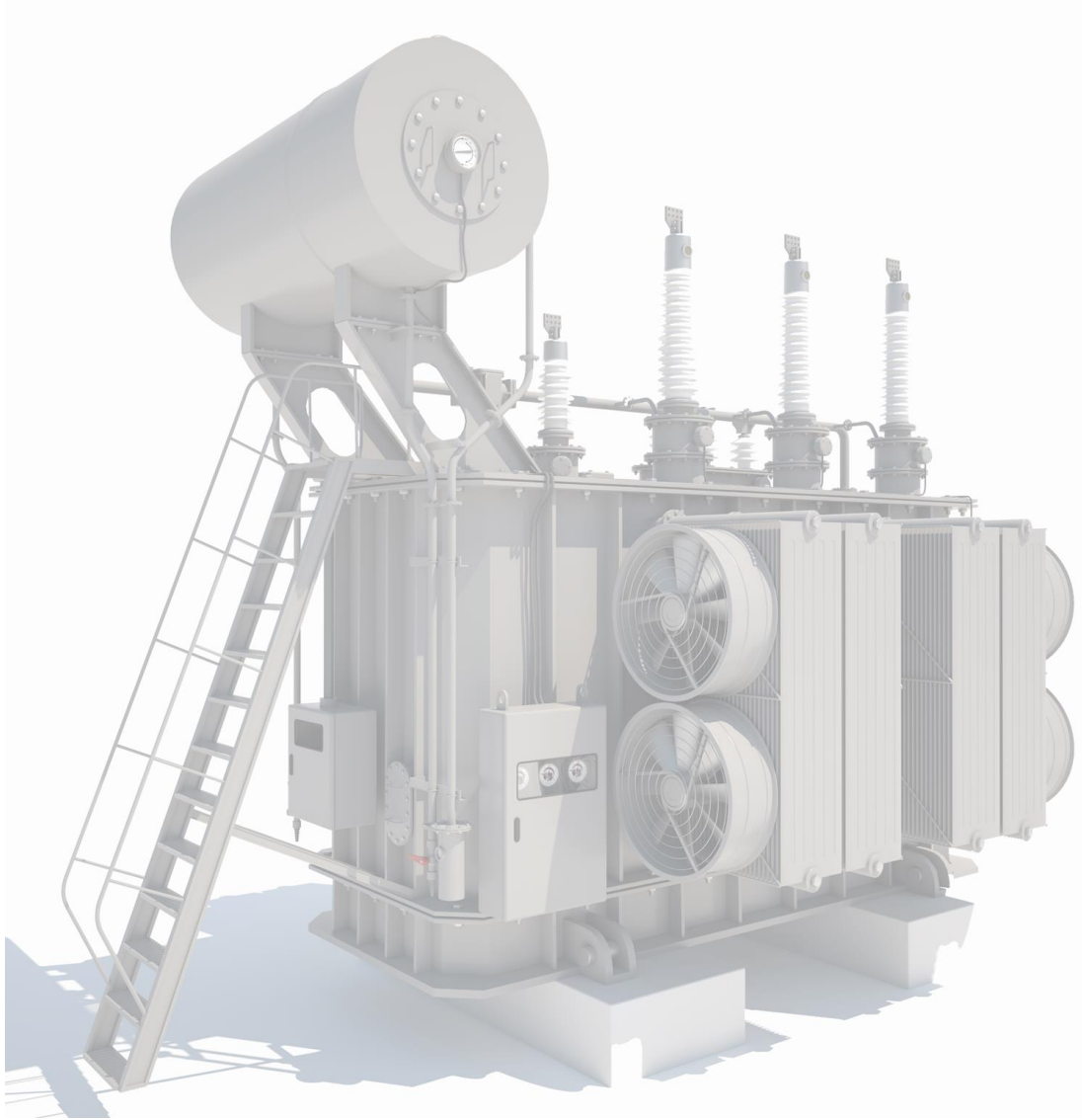
- De acuerdo al propósito
  - Puesta en marcha
  - Rutina
  - Investigación por disparo de sistema de protección interno
  - Investigación por disparo de sistema de protección externo
  - Re energización
  - Relocalización
  - Retiro o remplazo
  - Forense



©2022 Altanova Group. All Rights Reserved

Consideraciones (cont.)

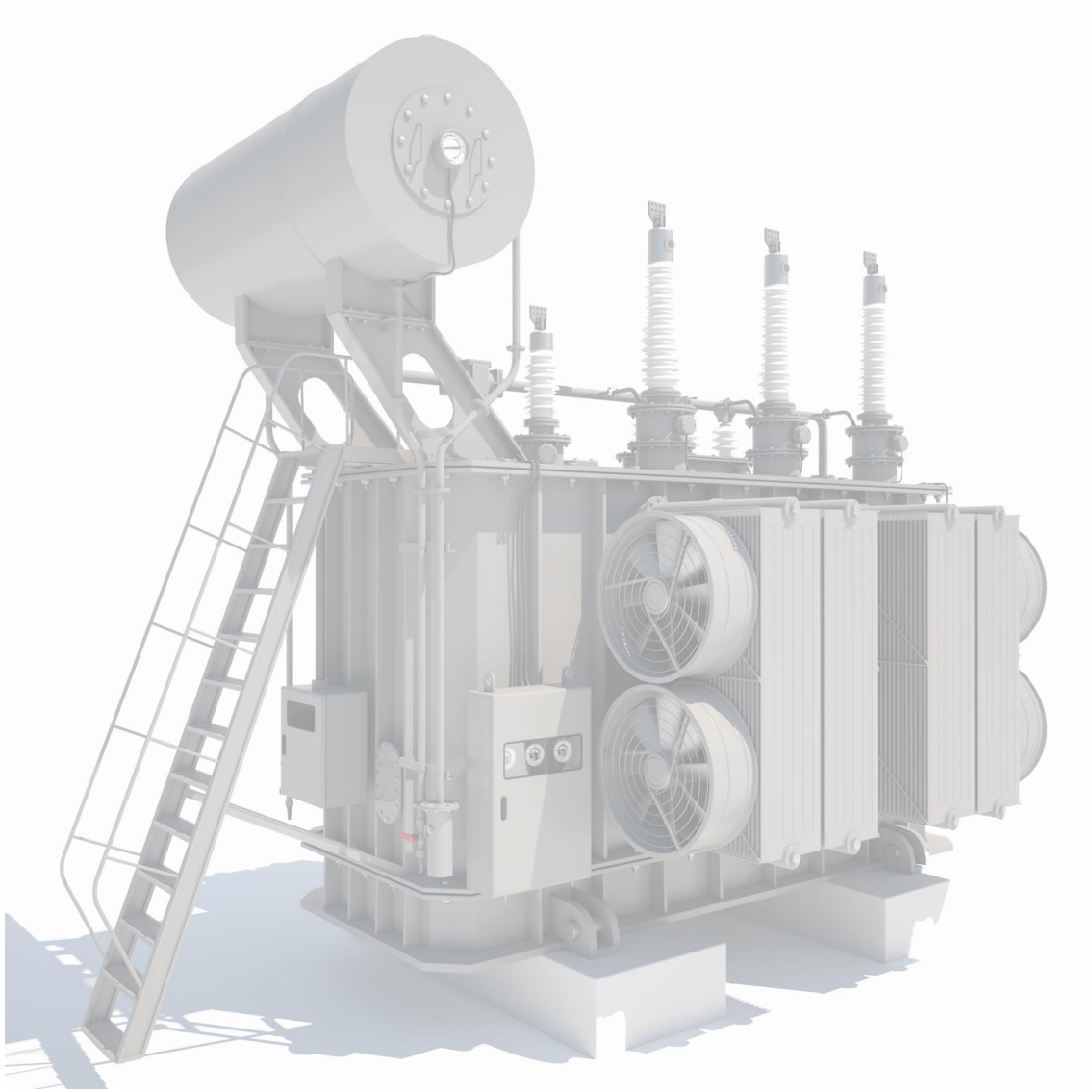
- Análisis de Fluidos Aislantes
- Referencia a tierra del núcleo
- Resistencia de Aislamiento
- Resistencia de Devanados
- Relación de Transformación
- Corrientes y perdidas de Excitación
- Reactancia de dispersión
- Factor de Potencia/Disipación
- Análisis de Respuesta a la Frecuencia
- Descargas Parciales*



©2022 Altanova Group. All Rights Reserved

Consideraciones (cont.)

- Con propósito de investigación
  - Respuesta dieléctrica a la frecuencia
  - Escaneo infrarrojo
  - Resistencia de contactos (cambiadores de carga)
  - Continuidad de contactos
  - Calibración de medidores y relés
  - Controles (bombas, ventiladores y bombas)
  - Pruebas de Furanos
  - Integridad de presión en tanque



©2022 Altanova Group. All Rights Reserved

Temas

- Transformador
- Normas
- Pruebas de fabrica vs. Pruebas de campo
- Teoría básica y modelo dieléctrico
- Gestión de Activos y Mantenimiento
- Pruebas recomendadas
- Casos de estudio

©2022 Altanova Group. All Rights Reserved

Aspectos de seguridad

Medidas de seguridad

- Personal calificado (de acuerdo a las normas aplicables)
- Junta inicial informacional
  - Procedimientos de emergencia
  - Fenómenos eléctricos presentes y su significado (tensión inducida, electrostática)
- Verificación de referencias a tierra
- Preparación del montaje de prueba
  - Espécimen
  - Instrumentación de medición
- Desconexión de espécimen del sistema
- Verificación de des energización

©2022 Altanova Group. All Rights Reserved

Aspectos de seguridad

Medidas de seguridad (cont.)

- Buena comunicación
  - Protocolo de comunicación claro y conciso (repetir comandos de ejecución)
- Establecimiento de zona de trabajo
  - Operador y el responsable de seguridad
- Aislamiento del espécimen
  - Durante la prueba
- Administración y manejo de cables de prueba
  - Conexión y desconexión de cables

©2022 Altanova Group. All Rights Reserved

Razones para Pruebas

De acuerdo a la circunstancia:

- Aceptación
- Puesta en Marcha
- En Servicio (Rutina)
- Por Disparo de protección
  - Investigación por disparo de sistema de protección interno
  - Investigación por disparo de sistema de protección externo
- Re energización
  - Reparaciones
  - Relocalizaciones o transporte

El protocolo de pruebas aplicable necesitara cubrir las necesidades informativas de condición bajo el tiempo asignado (otorgado para mantenimiento).

©2022 Altanova Group. All Rights Reserved

Recomendaciones para pruebas de campo en transformadores

©2022 Altanova Group. All Rights Reserved

Pruebas de campo en transformadores

- Fluidos Aislantes (Calidad y Gases Disueltos)
- Resistencia de Aislamiento
- Resistencia en Devanados
- TTR (BT y AT)
- Factor de Potencia/Disipación y Capacitancia
- Medición de Corrientes y perdidas de Excitación
- Reactancia de Dispersión
- Análisis de Respuesta a Frecuencia (SFRA)
- Respuesta Dieléctrica a Frecuencia (rango limitado a VFPF 15 – 400 Hz)*

©2022 Altanova Group. All Rights Reserved

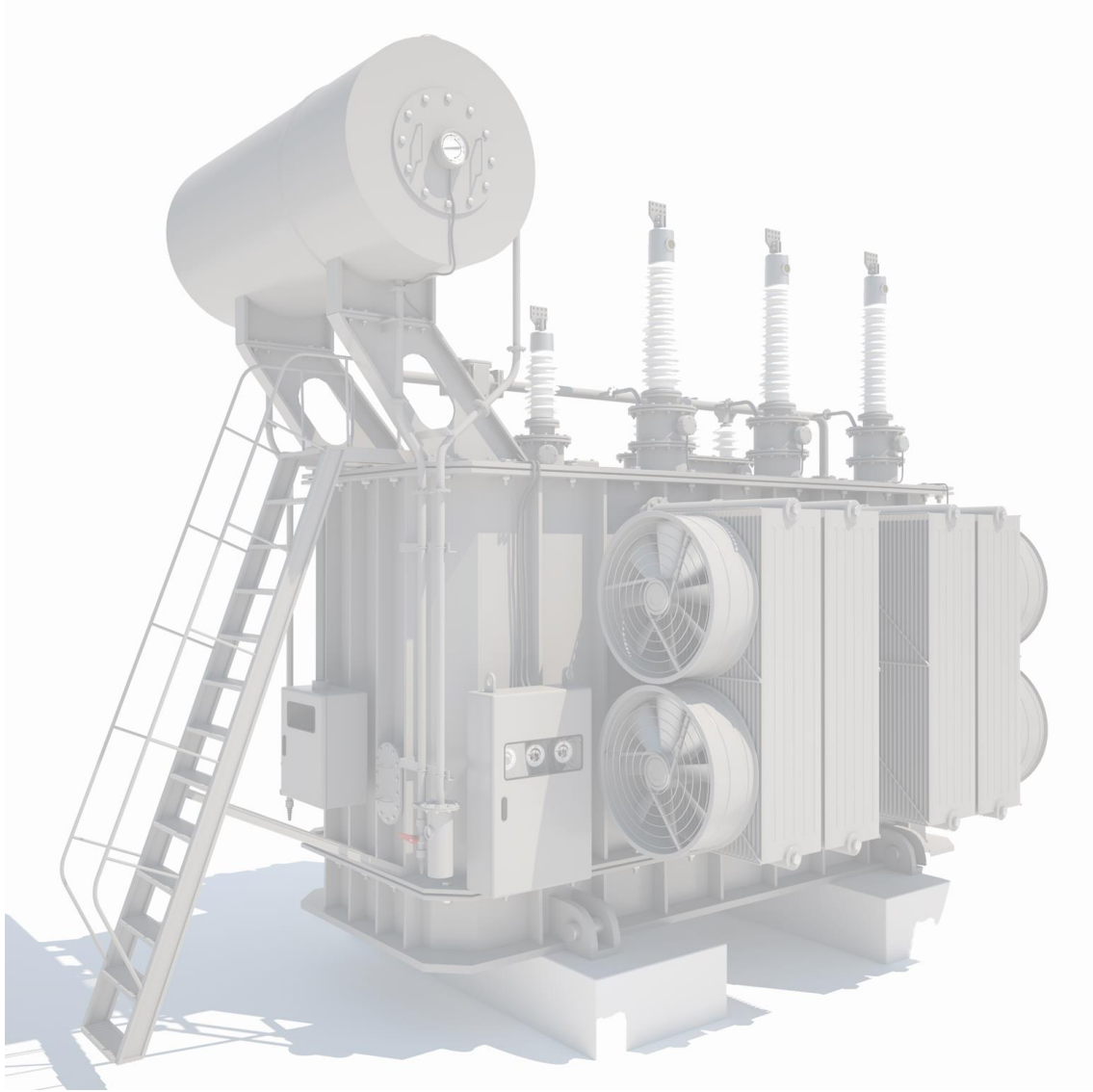
Pruebas de campo en transformadores

- Dispositivos auxiliares o subsistemas
  - Bushings
    - Factor de Potencia/Disipación y Capacitancia
  - Cambiadores de Carga*
    - Fluidos Aislantes (Calidad y Gases Disueltos)
    - Resistencia Dinámica de contactos
  - Apartarrayos o Pararrayos
    - Medición de corriente de carga y perdidas
  - Otros dispositivos*
    - Calibración de relés
    - Calibración de indicadores
    - Calibración de controles

** De acuerdo al programa de Gestión de Activos, ya sea en inspecciones o mantenimientos programados o basado en criticalidad del espécimen en el sistema.*

©2022 Altanova Group. All Rights Reserved

Fluidos Aislantes



©2022 Altanova Group. All Rights Reserved

Fluidos Aislantes

- Pruebas por Especificación
  - Doble TOPS (aceites minerales)
    - ASTM D 3487
    - Además: Compuestos Furánicos (D 5837), PFVO (Doble), SFL (Doble), Tipo de Carbono (D 2140), Prueba CCD (Doble), Dibenzyl Disulfide (Doble), Benzotriazole (Doble), Irgamet 39 (Doble)
  - ASTM D 3787 (aceites minerales)
  - IEC 60296 (aceites minerales)
- Pruebas Especializadas
  - Grupo de Fluidos Clorados (Askarel, Wecosol, tri/tetra-Clorobenzinas)
  - Aceites Silicones
  - Esteres Naturales
  - Relacionadas con Azufre corrosivo

©2022 Altanova Group. All Rights Reserved

Fluidos Aislantes

- Pruebas solicitadas regularmente:

TESTS Commonly Requested, Liquid Dielectrics

Individual Tests for Mineral Oil

TEST	ASTM Number	Volume of* Liquid, mL
Dissolved Gas-in-oil analysis (DGA)	D 3612A or C	35
Color	D 1500	50
Dielectric Breakdown	D 877A or B	80
Dielectric Breakdown	D 1816	450
Furanic Compounds in Oil	D 5837	20
Inhibitor Content	D 2668	1
Interfacial Tension	D 971	25
Neutralization Number	D 974	20
Polychlorinated Biphenyls (PCBs) in Oil	D 4059	5
Power Factor @ 25°C	D 924	250 (1 liter**)
Power Factor @ 100°C	D 924	250 (1 liter**)
Power Factor @ 25°C & 100°C	D 924	250 (1 liter**)
Specific Gravity	D 1298	500
Viscosity @ 40°C	D 445	25
Visual Examination	D 1524	300
Water Content – Oil	D 1533	10

©2022 Altanova Group. All Rights Reserved

Calidad de Fluidos Aislantes

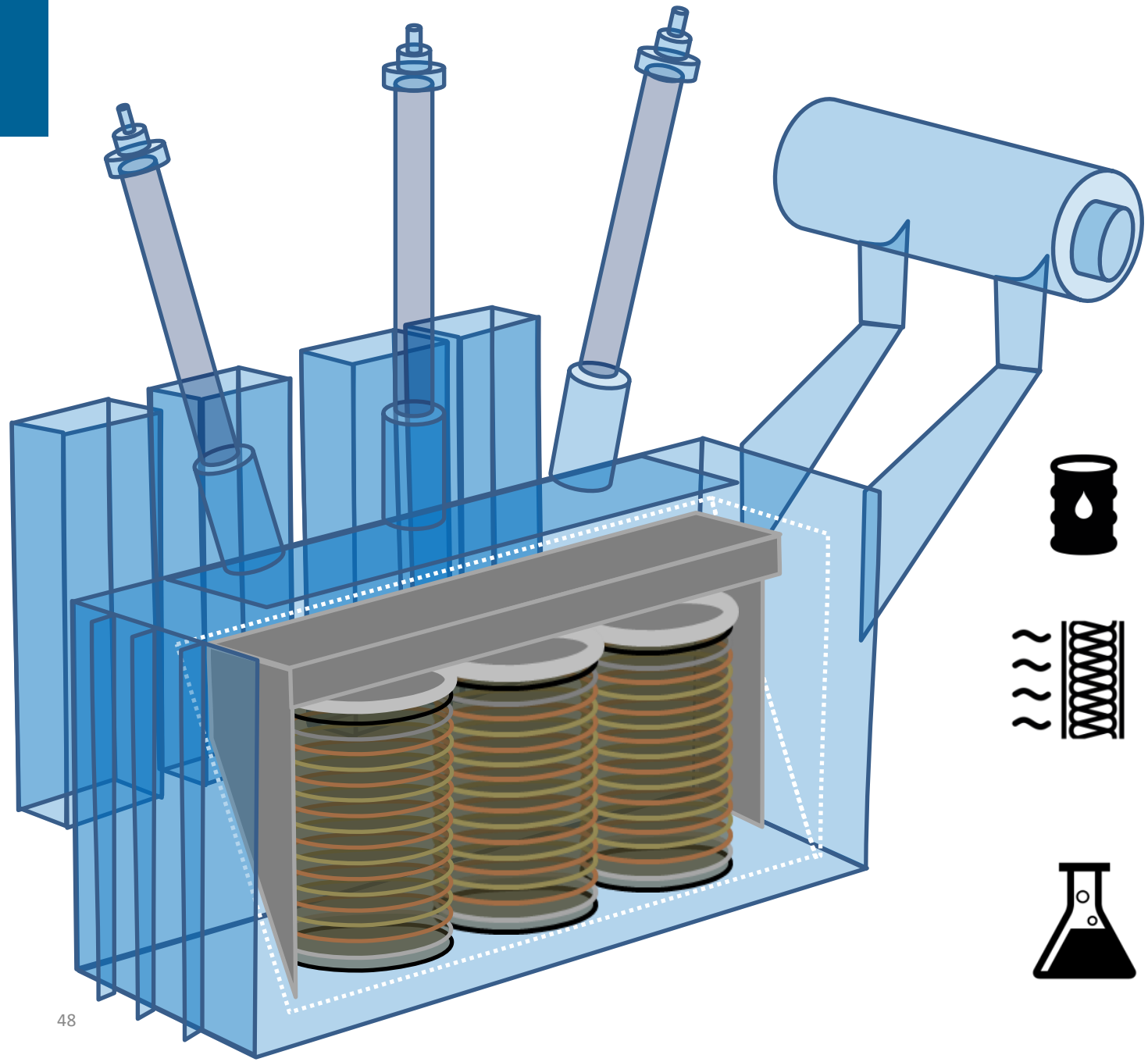
- Humedecimiento
- Viscosidad
- Color
- Visual
- Punto de Anilina
- Punto de Inflamabilidad
- Dieléctrico
- Tendencia a los Gases
- Factor de Potencia
- Estabilidad a la Oxidación
- Tensión Interfacial
- Gravedad Especifica
- Impulso de Ruptura
- Azufre Corrosivo
- Saturación Relativa
- Numero Neutral
- Inhibidores
- Acidez
- Contenido de PCB

©2022 Altanova Group. All Rights Reserved

Análisis de Gases Disueltos (DGA)

- Huellas de Fallas (subproductos en el líquido)
- Programa periódico de toma de muestras recomendado
- DGA Primer indicio de problemas
  - Deterioro en aislamiento
  - Sobrecalentamiento
  - Puntos Calientes
  - Descargas Parciales
  - Arqueo
- La “Salud” del Fluido Aislante representa la “Salud” del Transformador

©2022 Altanova Group. All Rights Reserved



Fluido Aislante (Aceite)

=

“La Sangre” del Transformador

Los Transformadores contienen Fluido Aislante (Aceite) cuya función es proveer enfriamiento y aislamiento al transformador.

Este Aceite está en contacto con los componentes internos. Eventos normales y anormales afectan la condición de este produciendo “subproductos gaseosos” que se disuelven en el Aceite.

El análisis de estos subproductos gaseosos proveerá información relacionada a la condición (salud) del transformador.

©2022 Altanova Group. All Rights Reserved

Análisis de Gases Disueltos (DGA)

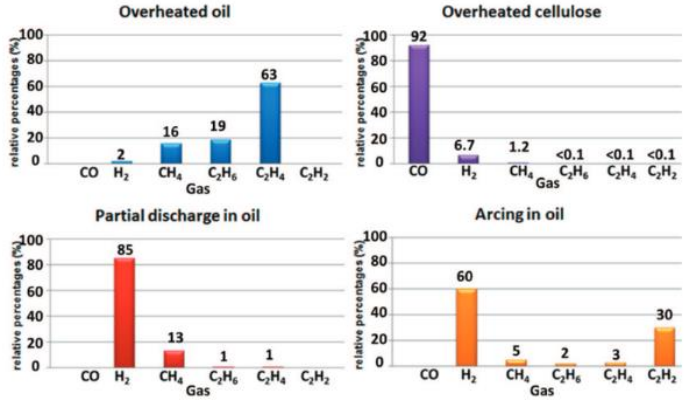
- Formación de diferentes gases representan diferentes procesos de deterioro
- Diferentes Gases “claves”
  - Hidrogeno (H_2)
  - Metano (CH_4)
  - Etano (C_2H_6)
  - Etileno (C_2H_4)
  - Acetileno (C_2H_2)
  - Monóxido de Carbono (CO)
  - Bióxido de Carbono (CO_2)
  - Oxigeno (O_2)
- La cantidad y tipo de subproductos gaseosos determinara la severidad de la falla y la energía involucrada en el evento

©2022 Altanova Group. All Rights Reserved

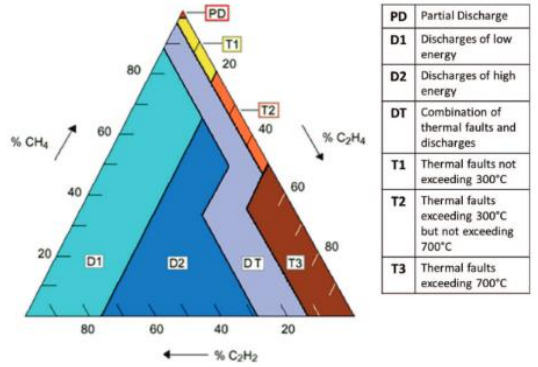
Herramientas para DGA

Métodos de precisión para identificación de fallas con múltiples gases.

KEY Gas Method

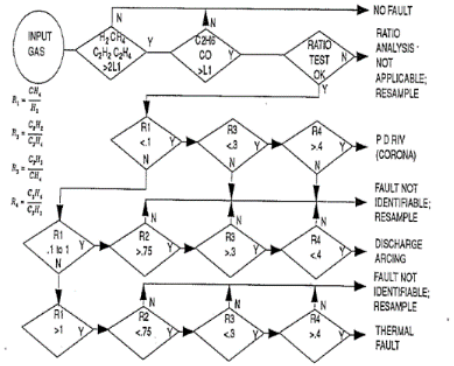


Duval's Triangle



PD	Partial Discharge
D1	Discharges of low energy
D2	Discharges of high energy
DT	Combination of thermal faults and discharges
T1	Thermal faults not exceeding 300°C
T2	Thermal faults exceeding 300°C but not exceeding 700°C
T3	Thermal faults exceeding 700°C

Doernenburg Method



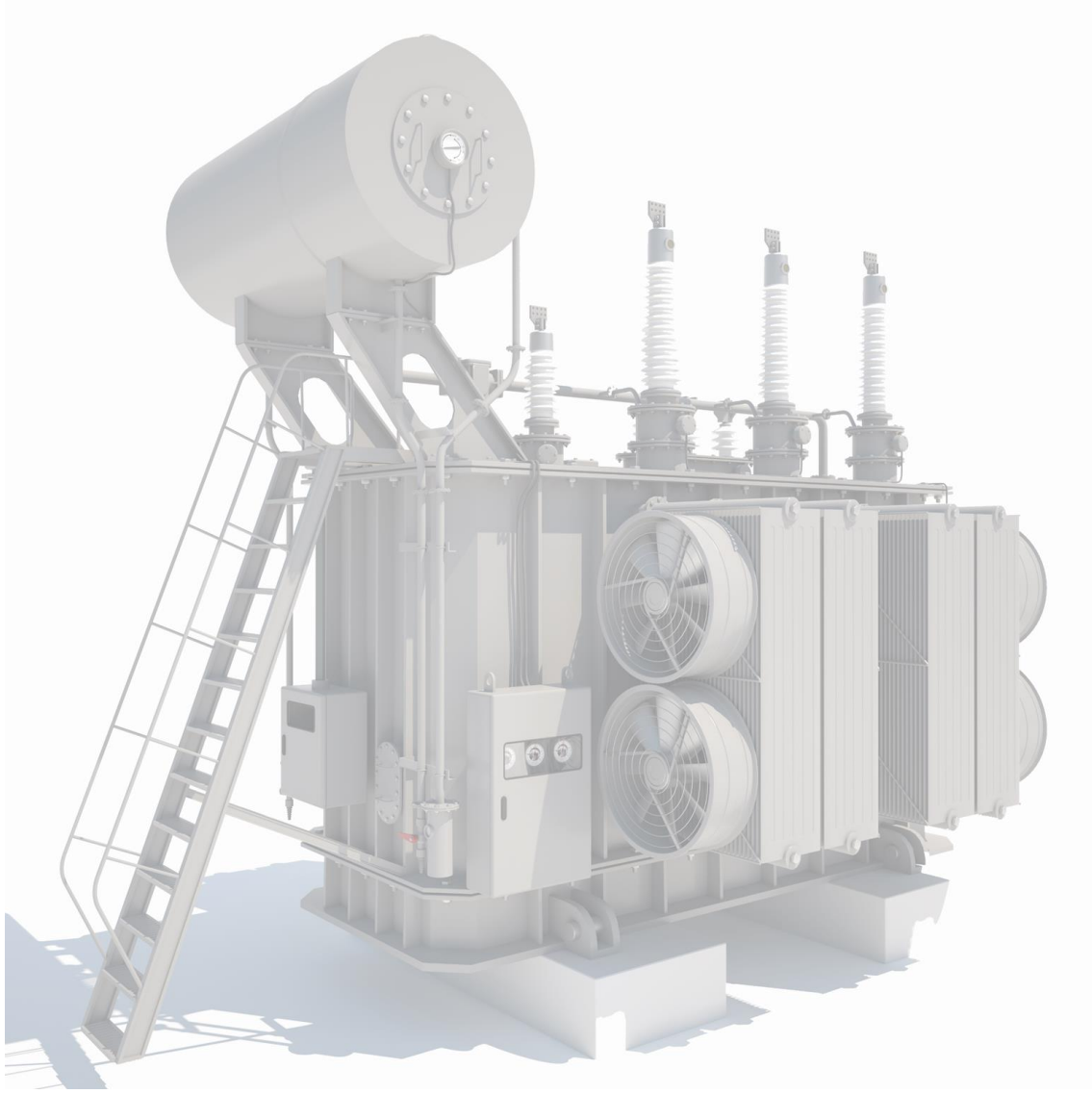
Roger Ratios

Table 6
Rogers Ratios for Key Gases

Case	R2 C_2H_2/C_2H_4	R1 CH_4/H_2	R5 C_2H_4/C_2H_6	Suggested Fault Diagnosis
0	<0.1	>0.1 <1.0	<1.0	Unit normal
1	<0.1	<0.1	<1.0	Low-energy density arcing—PD (See NOTE)
2	0.1–3.0	0.1–1.0	>3.0	Arcing—High-energy discharge
3	<0.1	>0.1 <1.0	1.0 3.0	Low temperature thermal
4	<0.1	>1.0	1.0–3.0	Thermal <700 °C
5	<0.1	>1.0	>3.0	Thermal >700 °C

©2022 Altanova Group. All Rights Reserved

Resistencias de Devanados



©2022 Altanova Group. All Rights Reserved

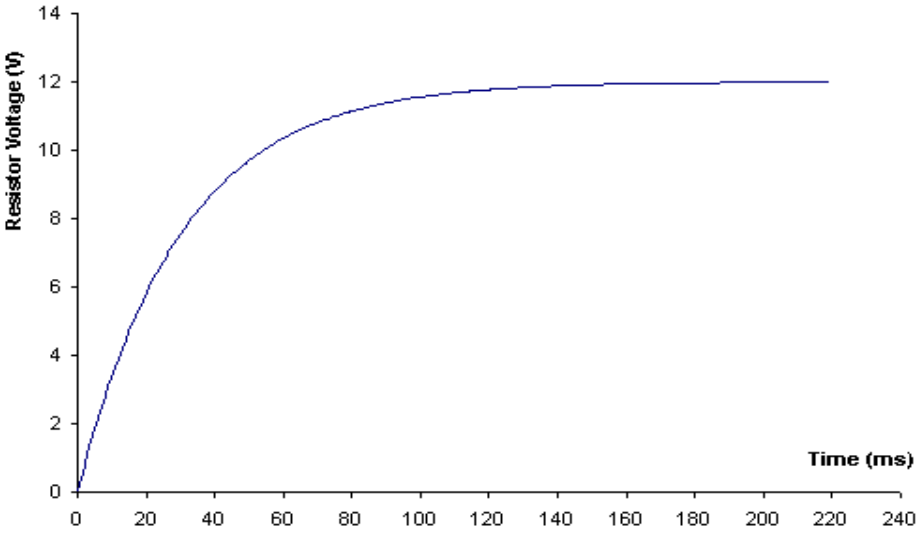
Resistencia de Devanados

- Prueba de fundamental importancia
- Cálculo de perdidas en el conductor (componente I^2R)
- Objetivos
  - Detección de daños en el conductor (hebras rotas)
  - Alta resistencia en los contactos de cambiadores de carga
  - Detección de anormalidades en Bushings y conexiones de cables
  - Conexiones sueltas
- Prueba en DC (típicamente ejecutada después de las pruebas AC)

©2022 Altanova Group. All Rights Reserved

Resistencia de Devanados

- Necesita estabilidad en núcleo (saturación y estable)
- Requiere de tiempo de saturación y estabilización del Núcleo
- Los devanados contienen Resistencia e Inductancia
- Prueba en DC que mide Resistencia (no Impedancia)
- Cuando hay cambiadores de carga en la configuración de prueba
  - DETC: medición en cada “tap”, des energizando entre mediciones
  - OLTC: medición continua en cada “tap”, evitando des energizar durante el procedimiento
- Requiere descargar después de cada medición



©2022 Altanova Group. All Rights Reserved

Resistencia de Devanados

Procedimiento de prueba

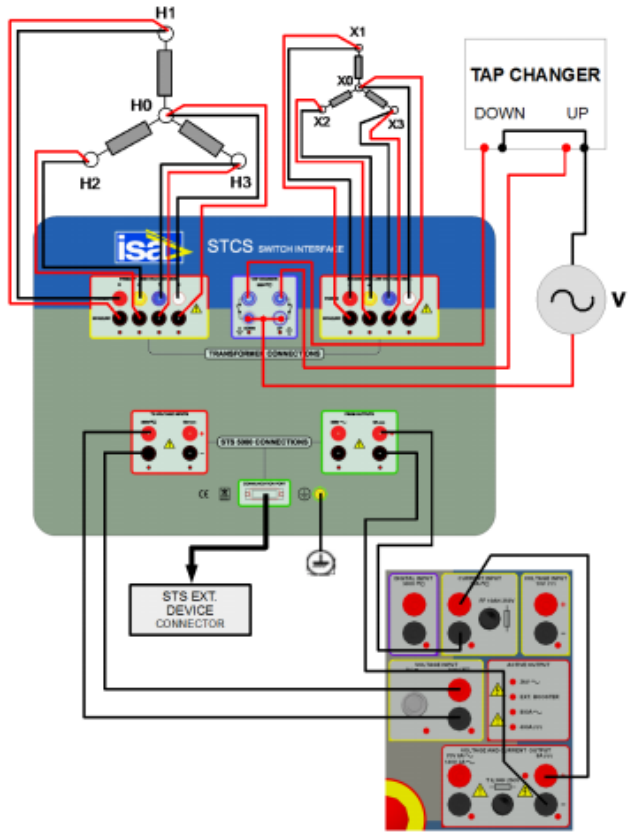
- Ejecución en cada devanado (AT, BT, TT, Auto)
- De acuerdo a la configuración del transformador
  - Monofásico (comparación entre unidades del banco)
  - Delta: de acuerdo a conexiones por fase
  - Estrella: de acuerdo a conexiones por fase
  - Auto: por sección de devanado (Serie y Común)
- Análisis
  - Comparación entre fases (≤ 2%)
  - Cuando disponibles, comparación a mediciones de fabrica (≤ 5%)

©2022 Altanova Group. All Rights Reserved

Resistencia de Devanados

Ejemplos de Instrumentación para pruebas:

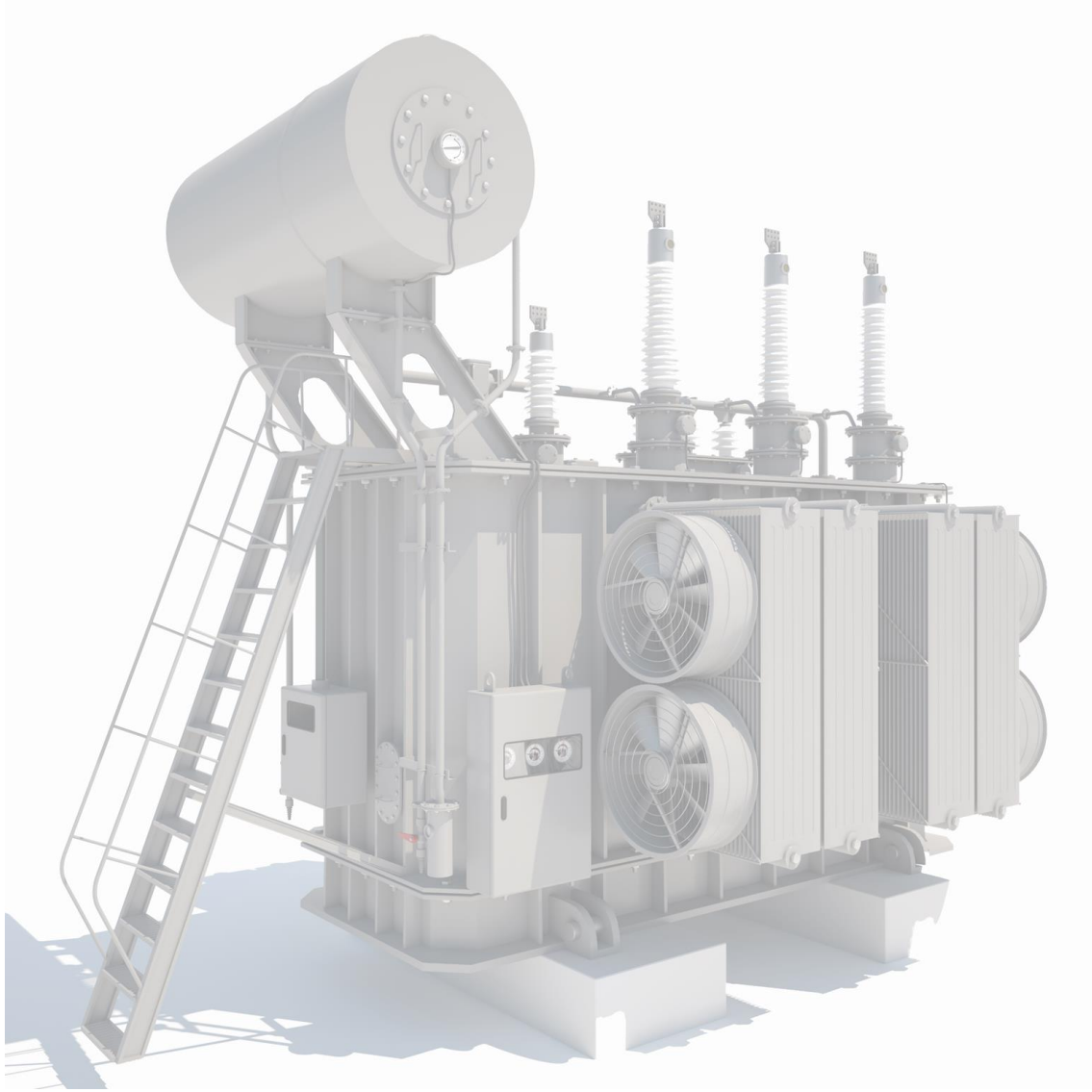
- Preferentemente instrumentación automatizada (ahorra tiempo de ejecución)
- Mediciones realizadas en cada devanado
- Control automatizado para cambiar “taps” en cambiadores de carga (ahorra tiempo de ejecución)
- Tiempo de ejecución potencialmente se reduce en 60 – 70% (saturación y estabilización del núcleo permanece durante las mediciones)



Solution with Integrated Switchbox

©2022 Altanova Group. All Rights Reserved

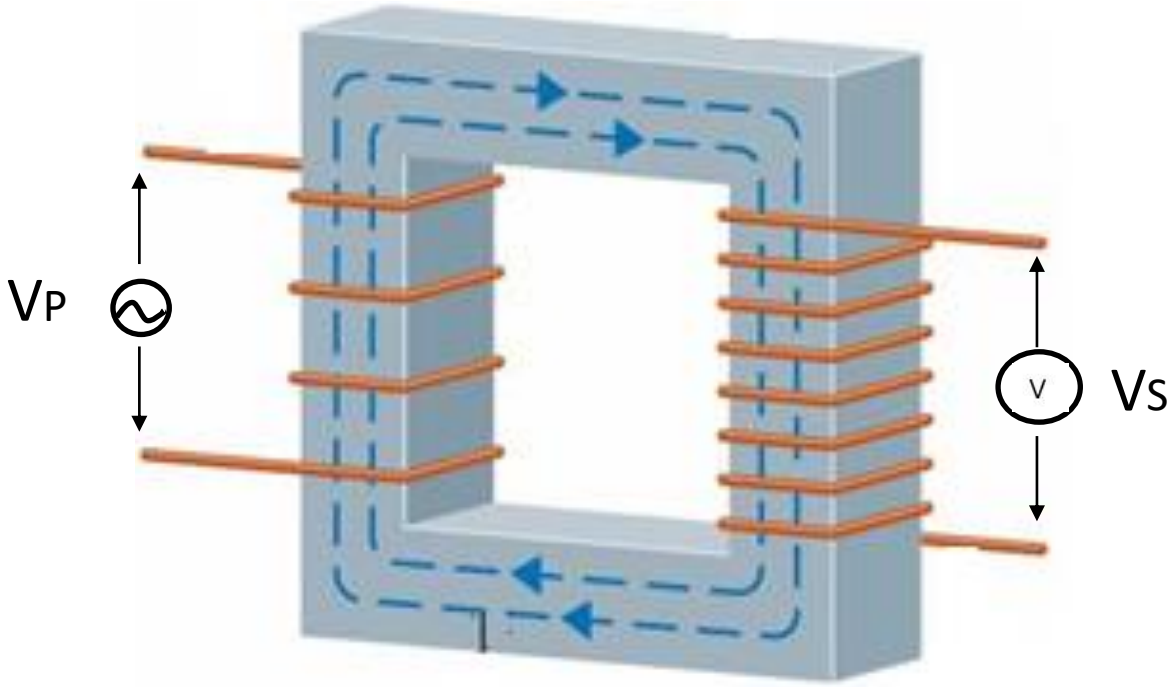
Relación de Transformación



©2022 Altanova Group. All Rights Reserved

Relación de Transformación (TTR)

- Relación de transformación (TTR) se define como la relación del número de espiras (vueltas) en el devanado de alta tensión contra el número de espiras (vueltas) en el devanado de baja tensión
- La prueba de relación de transformación es una prueba de fundamental importancia
- Dos metodologías disponibles:
  - Método de medición de Voltaje (considerado como la prueba a bajo voltaje)
  - Método de Capacitancia y Factor de Potencia (considerado como la prueba de alto voltaje 10–12 KV)
- Considerar ambos métodos pues identifican diferentes modos de falla
- Cuando hay cambiadores de carga, incluir todas las posiciones del cambiador



$$N = V_P / V_S$$

©2022 Altanova Group. All Rights Reserved

Relación de Transformación (TTR)

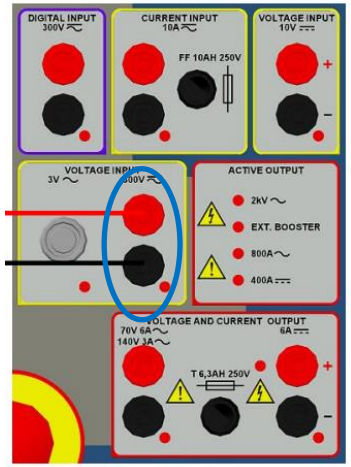
Propósito de la prueba:

- Identificar la presencia de:
  - Cortos entre espiras
  - Circuitos abiertos
- Provee información de la condición del aislamiento entre espiras
- Ayuda en la identificación de:
  - Relación entre faces
  - Polaridad

©2022 Altanova Group. All Rights Reserved

Relación de Transformación (TTR)

Ejemplos de Instrumentos para la medición de TTR



©2022 Altanova Group. All Rights Reserved

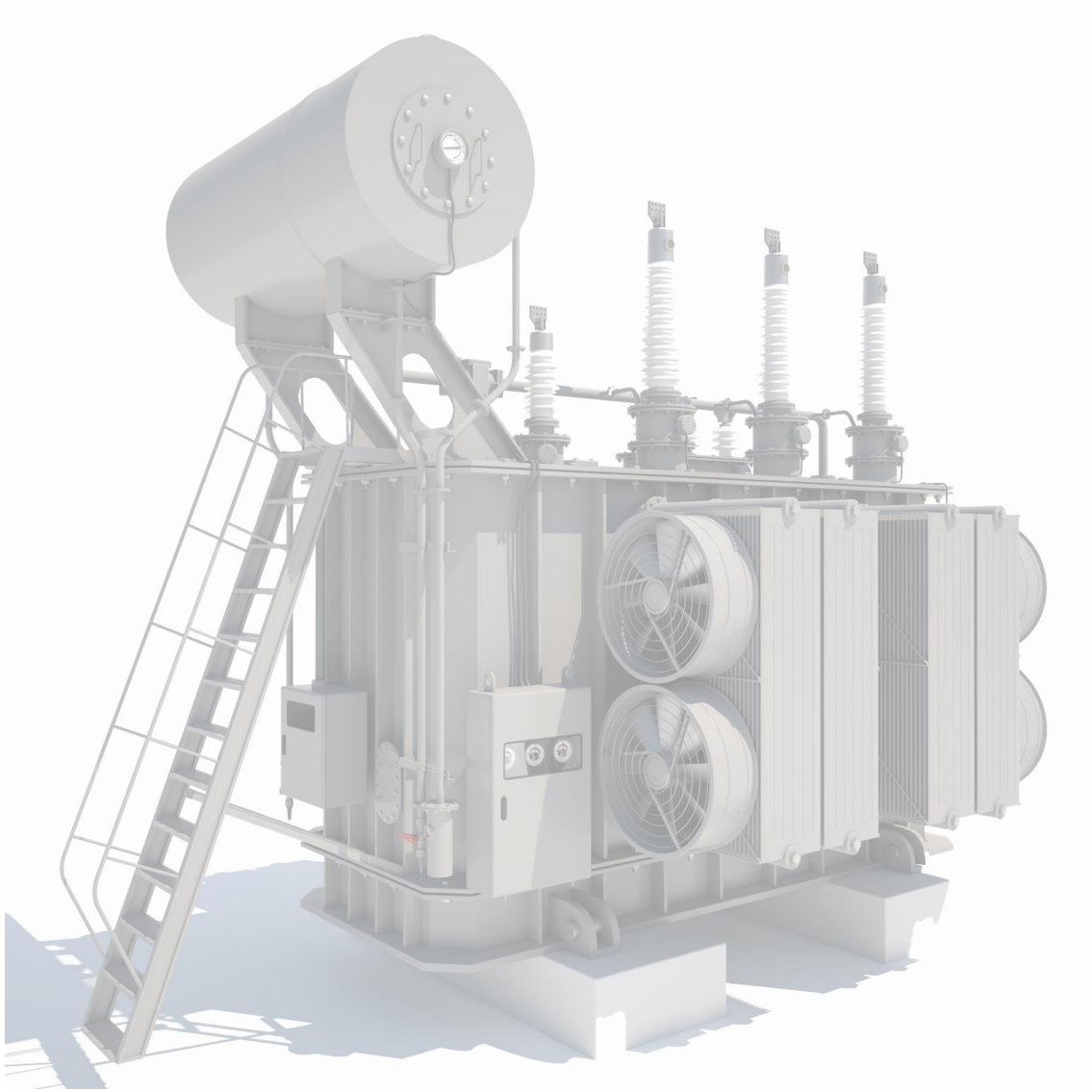
Relación de Transformación (TTR)

Análisis de resultados

- Criterios de aceptación
  - La medición de relación no podrá exceder el ± 0.5% del calculo
- Cuando hay cambiadores de carga, incluir todas las posiciones del cambiador
- Comparar resultados con valores de datos base (benchmarks)
- Cuando hay cambiadores de carga, comparar resultados entre fases
  - No se esperan variaciones significativas

©2022 Altanova Group. All Rights Reserved

Factor de Potencia/Disipación y Capacitancia



©2022 Altanova Group. All Rights Reserved

Factor de Potencia/Disipación y Capacitancia

- Prueba más comúnmente usada para la evaluación de la eficiencia de los sistemas de aislamiento
- Entrega información relacionada a la condición dieléctrica y física del sistema de aislamiento del espécimen bajo prueba
- Prueba en Corriente Alterna (AC)
- Metodologías definidas por normas
  - Método de medición a Tierra
  - Método de medición con Guarda
- Objetivo: medir las características eléctricas fundamentales en Corriente Alterna (AC) del sistema de aislamiento

©2022 Altanova Group. All Rights Reserved

Factor de Potencia/Disipación y Capacitancia

- La medición identifica componentes reactivos y real
- Permite la identificación temprana de problemas incipientes relacionados con el sistema de aislamiento y sus componentes
  - Cambios en las dimensiones físicas (contracción/expansión)
  - Presencia o ausencia de componentes en el sistema de aislamiento
  - Desplazamiento de los componentes del sistema de aislamiento (deformaciones o cambios)
  - Presencia de contaminantes (considerados agentes destructivos) que afectan las características dieléctricas del sistema de aislamiento
- No se considera como una prueba destructiva

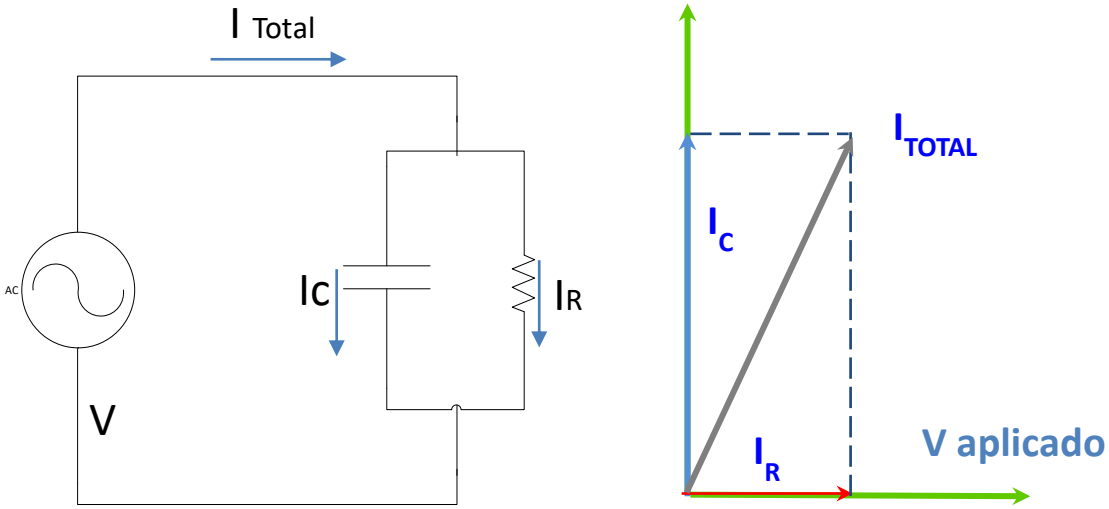
©2022 Altanova Group. All Rights Reserved

Factor de Potencia/Disipación y Capacitancia

- Sistemas de Aislamiento
  - Perfecto: sin perdidas (Ideal)
  - Imperfecto: preferentemente con bajas perdidas (realidad)

Un sistema de aislamiento real de buena calidad contiene perdidas mínimas, representadas por Watts que estarán en fase con el voltaje de referencia aplicado.

$$I_{Total} = I_C + I_R$$



©2022 Altanova Group. All Rights Reserved

Factor de Potencia/Disipación y Capacitancia

Ejemplos de Instrumentación

©2022 Altanova Group. All Rights Reserved

Factor de Potencia/Disipación y Capacitancia

- Análisis:
  - Sujeto a características del transformador
  - Para Aislamiento mojado (aceite)
    - ≤ 500 kVA (Distribución): ≤ 1% Aceptable, entre 1% y 2% Deteriorado, > 2% Investigar, > a 3% No Aceptable
    - > 500 kVA y < 230 kV (Potencia): hasta 0.5% Aceptable, entre 0.5% y 0.7% Deteriorado, > 0.7% Investigar, > 1.5% No Aceptable
    - > 500 kVA y ≥ 230 kV (Potencia): hasta 0.4% Aceptable, entre 0.4% y 0.6% Deteriorado, > 0.6% Investigar, > 1.2% No Aceptable
  - Capacitancia (comparativa a resultados de datos base)
    - Cambios hasta el 5% Aceptables
    - Cambios entre 5% y 10 % Investigar
    - Cambios > 10% no Aceptables

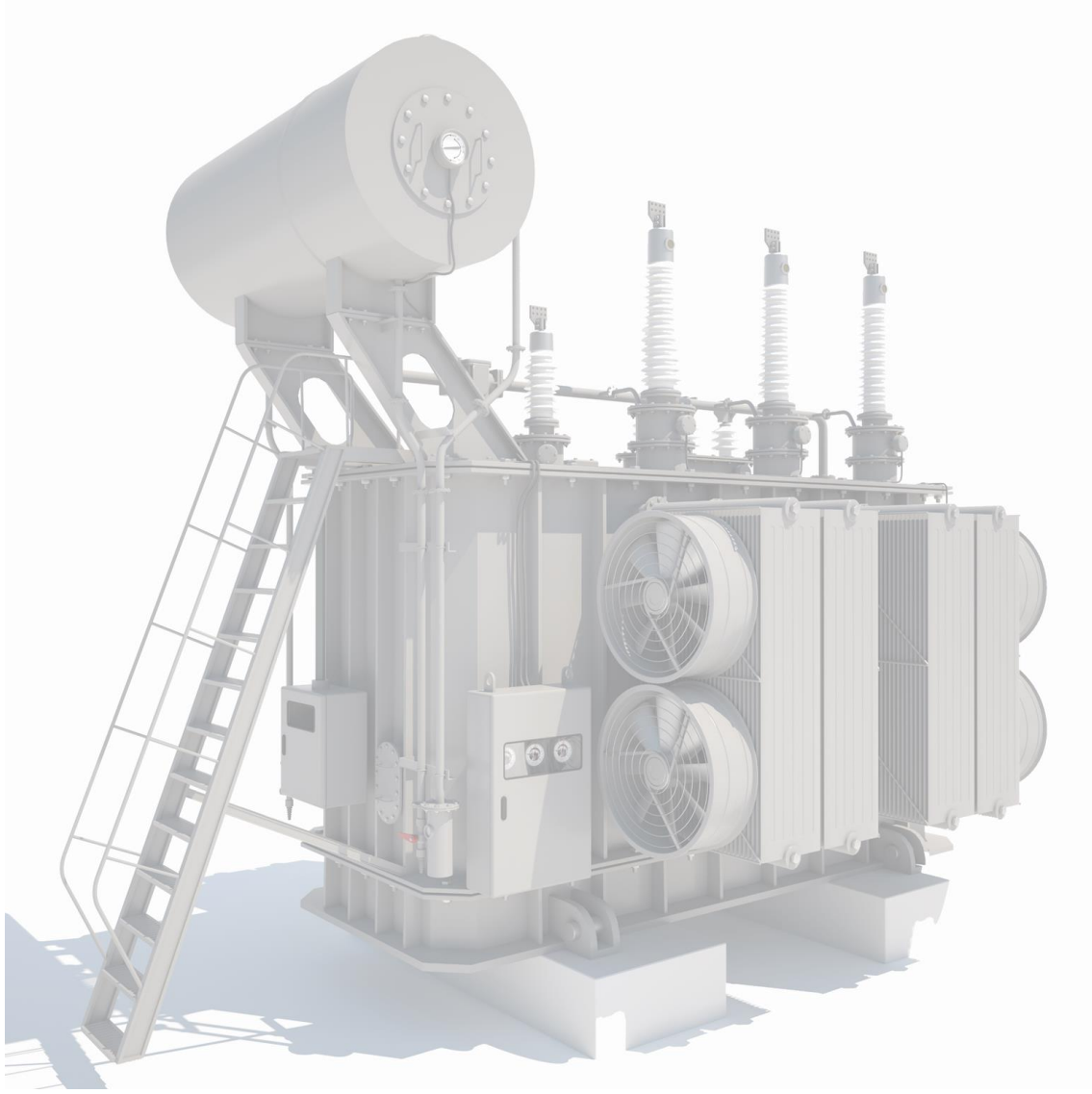
©2022 Altanova Group. All Rights Reserved

Factor de Potencia/Disipación y Capacitancia

- Propiedades
  - Mediciones de Capacitancia nos entregan información de la condición física (mecánica) del sistema de aislamiento
  - Mediciones de Factor de Potencia/Disipación nos entregan información de la eficiencia del sistema de aislamiento
- Respuesta del Dieléctrico en la Frecuencia
  - Entrega información de la condición de la relación papel/aceite (liquido aislante) en relación a el contenido de contaminantes (principalmente humedad) en un rango determinado de frecuencia
  - Puede llevarse mucho tiempo en ejecución (depende del rango de frecuencia a considerar), por lo que puede considerarse como una prueba de investigación
  - Un rango limitado de frecuencia (15 – 400 Hz), define la prueba de VFPF que se considera como una prueba de rutina practica

©2022 Altanova Group. All Rights Reserved

Mediciones de Corrientes y Perdidas de Excitación



©2022 Altanova Group. All Rights Reserved

Medición de Corrientes y Perdidas de Excitación

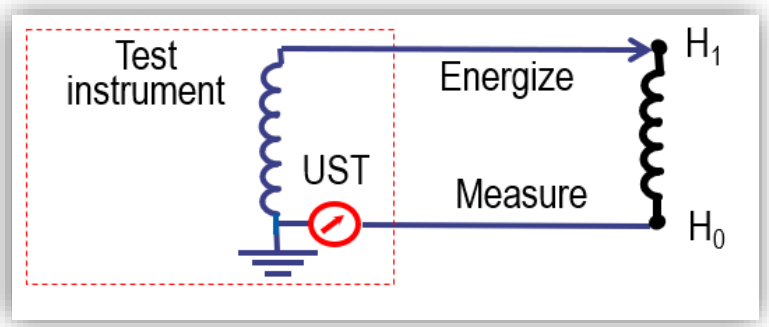
- Definición: Medición en circuito-abierto (es decir sin-carga en el secundario) de corriente y pérdidas, generalmente hecha en el lado de alta-tensión del transformador, utilizando una excitación de baja-tensión (hasta 10 kV), monofásica, con frecuencia de potencia de 50/60 Hz.
- Objetivo: utilizada para evaluar el Circuito Electromagnético del transformador
  - Detecta defectos en el Núcleo (cambios en reluctancia)
  - Defectos entre espiras de los devanados (circuitos abiertos o en corto)
  - Problemas con cambiadores de Carga (DETC/OLTC)

©2022 Altanova Group. All Rights Reserved

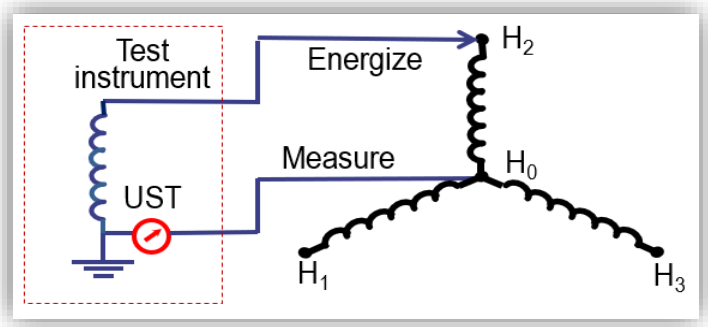
Medición de Corrientes y Perdidas de Excitación

- Montaje de Prueba (para todas las configuraciones de Transformadores)
  - Por seguridad se ejecuta por el lado de voltaje más alto
  - Mediciones por Fase al mismo Voltaje de prueba
  - Considerar todas las posiciones de los Cambiadores de Carga (DETC/OLTC)

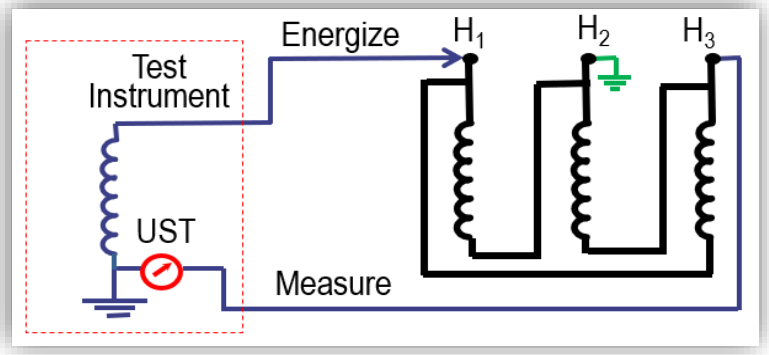
Monofásico



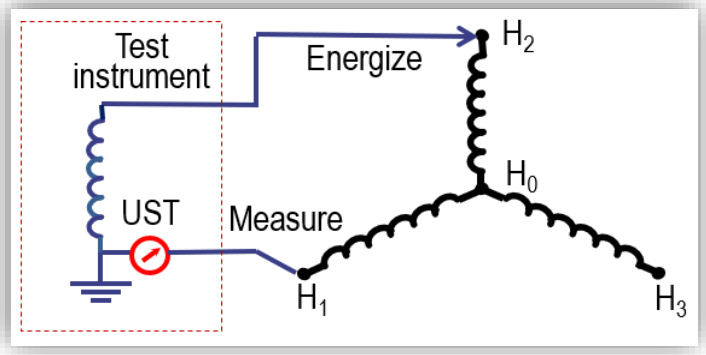
Devanado Estrella (con Neutro acc.)



Devanado Delta



Devanado Estrella (sin Neutro acc.)



©2022 Altanova Group. All Rights Reserved

Medición de Corrientes y Perdidas de Excitación

- Análisis de datos: se basa principalmente en examinar la matriz de resultados y verificación de patrones esperados
- Factores a considerar
  - Configuración del Núcleo
  - Capacitancia de Aislamiento
  - Voltaje de prueba
  - Magnetismo Residual
  - Influencia de los Cambiadores de Carga (DETC/OLTC)

Position		Measured mA		
		H3-H1	H1-H2	H2-H3
DETC with LTC in N	1	23.1	11.7	23.9
	2	24.1	12.2	24.9
	3	25.2	12.8	26.0
	4	26.4	13.4	27.2
	5	27.6	14.1	28.5
LTC with DETC in Position 3	1L	67.6	56.5	68.3
	N	25.2	12.8	26.0
	1R	67.5	56.5	68.3
	2R	25.2	12.8	26.0
	3R	202.8	191.6	203.1
	4R	25.2	12.8	26.1
	5R	67.5	56.5	68.3
	6R	25.2	12.8	26.1
	7R	67.5	56.5	68.3
	8R	25.2	12.8	26.0
	9R	203.0	192.0	203.4
	10R	25.2	12.8	26.1
	11R	67.5	56.5	68.3
	12R	25.2	12.8	26.1
	13R	67.5	56.5	68.3
	14R	25.2	12.8	26.1
	15R	202.9	191.9	203.3
	16R	25.2	12.8	26.1

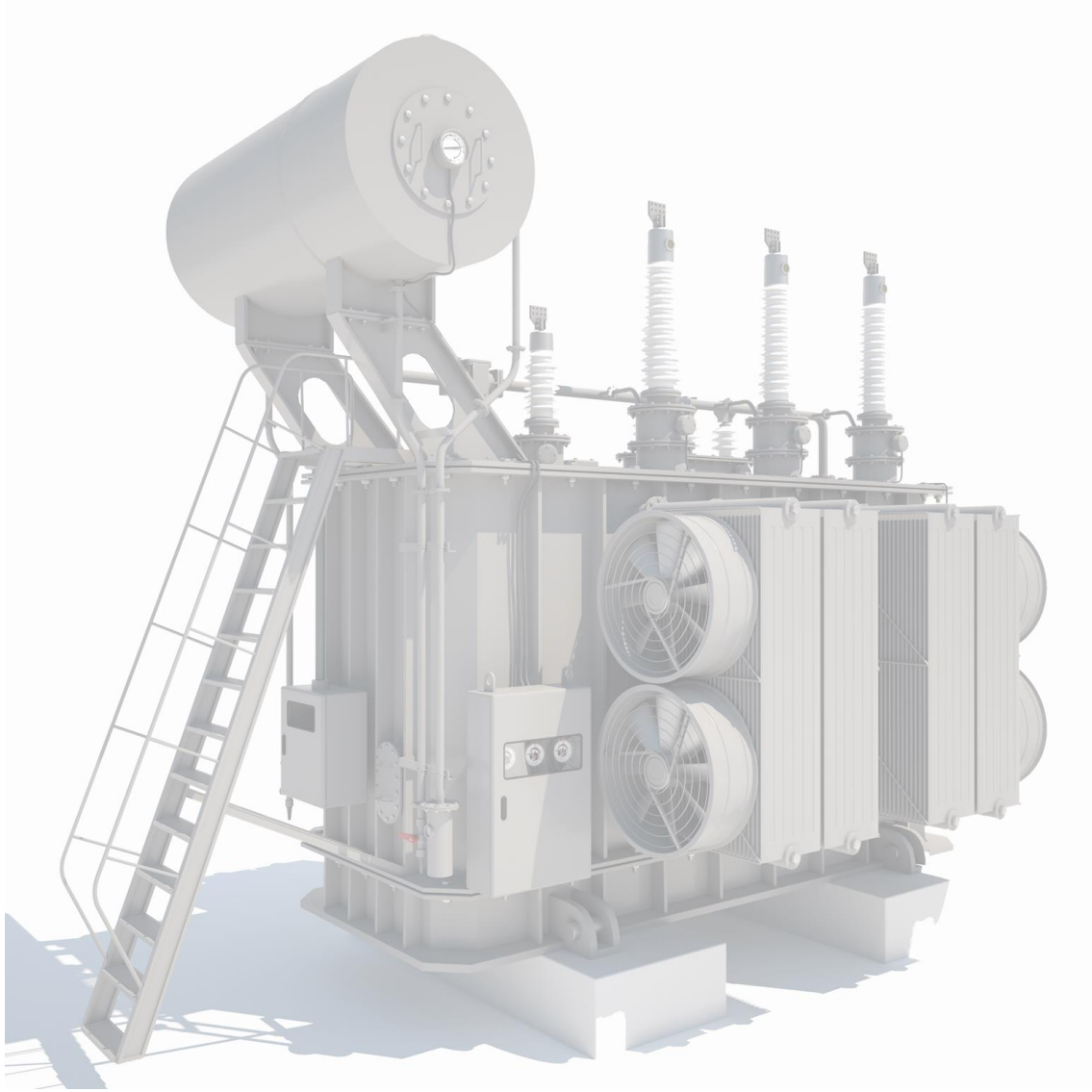
©2022 Altanova Group. All Rights Reserved

Medición de Corrientes y Perdidas de Excitación

- Criterios de Aceptación (Unidades Trifásicas)
  - Núcleo Inductivo: dos lecturas altas similares y una baja (mismo patrón observado en corrientes y perdidas)
  - Núcleo Capacitivo: dos lecturas bajas y una alta (perdidas seguirán el patrón de dos lecturas altas y una baja)
  - Núcleo mixto: lecturas de corriente pueden resultar en cualquier patrón (perdidas seguirán el patrón de dos lecturas altas y una baja)
- Criterios de Aceptación (Unidades Monofásicas)
  - Tres lecturas similares serán obtenidas para cada unidad en el banco
- Cuando hay Cambiadores de Carga (DETC/OLTC)
  - Se identificara y comparará el patrón por Fase y posición del cambiador

©2022 Altanova Group. All Rights Reserved

Reactancia de Dispersión y Perdidas



©2022 Altanova Group. All Rights Reserved

Reactancia de Dispersión y Perdidas

- Definición: Es el flujo que no está confinado en el núcleo. Este flujo se encuentra presente en el Espacio de Permeabilidad o Canal de Dispersión
  - Con el secundario cortocircuitado, la corriente en el devanado primario es requerida únicamente para apoyar la creación de flujo de dispersión
- Objetivo: Usada para evaluar la condición física de los devanados del transformador
- Espacio de permeabilidad
  - Formado en su mayoría por “espacios” entre los devanados
  - Exhibe un comportamiento lineal entre corriente y flujo de dispersión
- Utiliza datos de Impedancia de placa para cálculos asociados con la medición

©2022 Altanova Group. All Rights Reserved

Reactancia de Dispersión y Perdidas

Métodos de Prueba

- Equivalente Monofásico
  - Método de Prueba Recomendado
  - Tres mediciones (una por fase)
  - Análisis basado en la diferencia de cada fase respecto al promedio de las tres mediciones individuales (Prueba Dato Base)
  - Análisis basado en la diferencia entre cada una de las fases respecto a datos previos (Prueba Subsecuente)
- Equivalente Trifásico
  - La recomendación previa de Doble era ejecutarla como parte de las pruebas iniciales de aceptación
  - La recomendación actual de Doble es ejecutarla:
    - Si una investigación la justifica
    - Unidad con neutro inaccesible (prueba por fase no es posible)

©2022 Altanova Group. All Rights Reserved

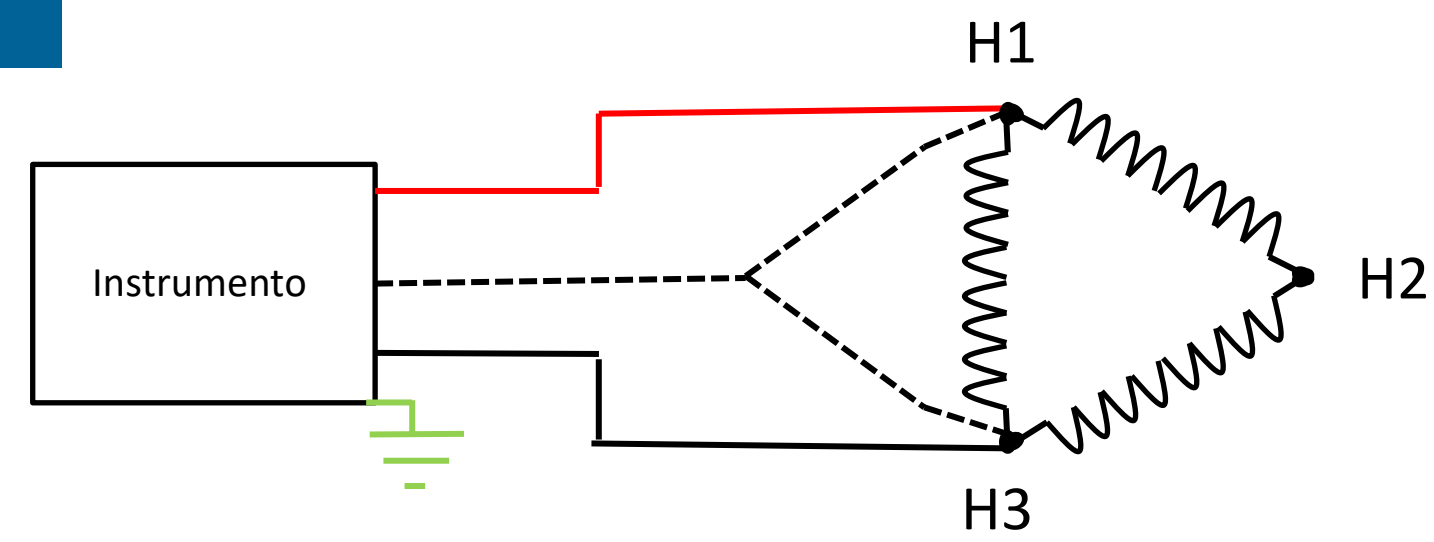
Reactancia de Dispersión y Perdidas

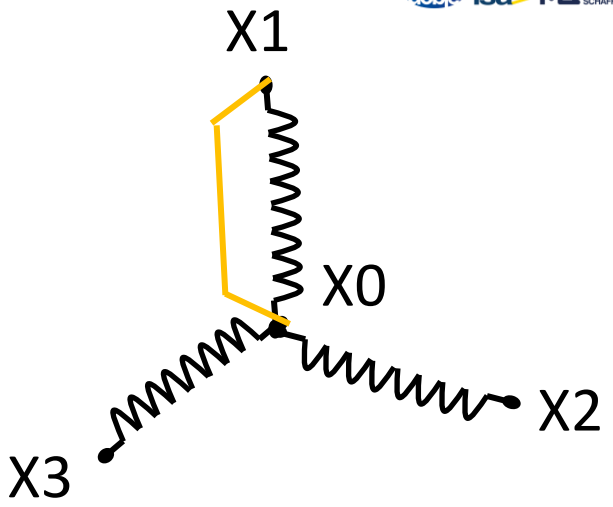
Montaje de prueba

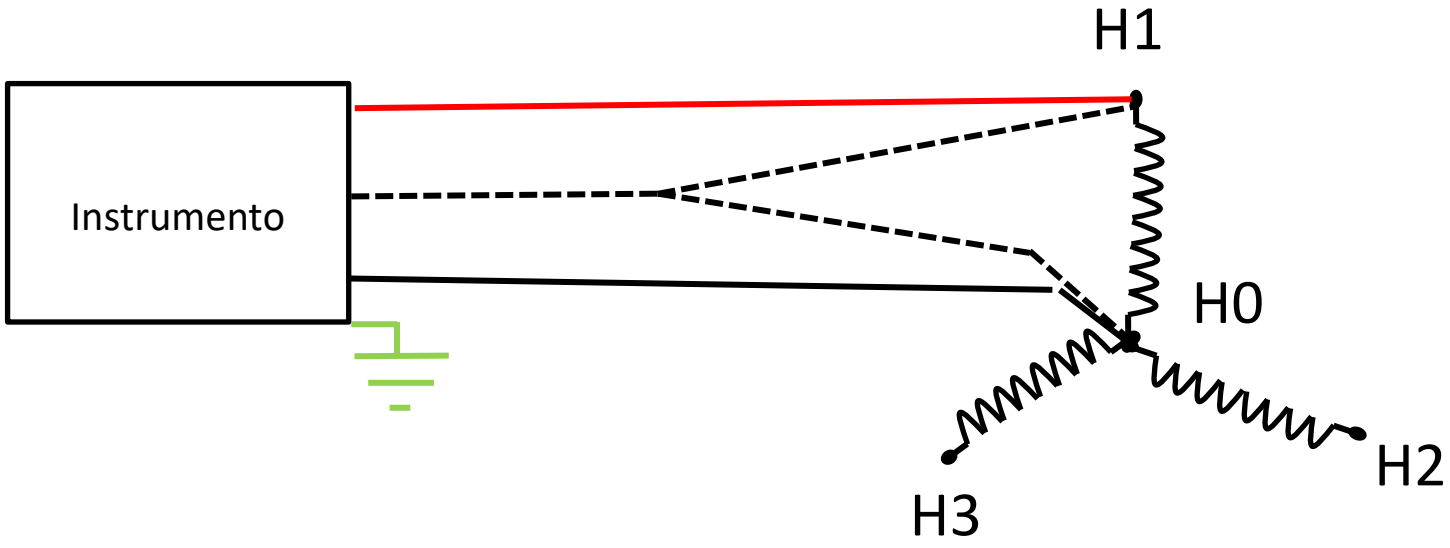
- La prueba se ejecuta a través de dos devanados a la vez (AT-BT, AT-Terciario, BT-Terciario)
  - Otro(s) devanado(s) flotando
- Al cortocircuitar asegurarse de que haya una conexión directa entre los Bushings más alejados (requiere cables de conducción para alta corriente)
  - El objetivo es minimizar la resistencia total (buen contacto para evitar perdidas por calentamiento)
  - Minimizar longitud del cable (mitigar efectos de acoplamiento magnético)
- Transformador con devanado terciario enterrado (estabilizador)
  - Aterrizar Bushing externo (asumiendo que no está aterrizado internamente) y probar como transformador de dos devanados o autotransformador dependiendo del número de devanados

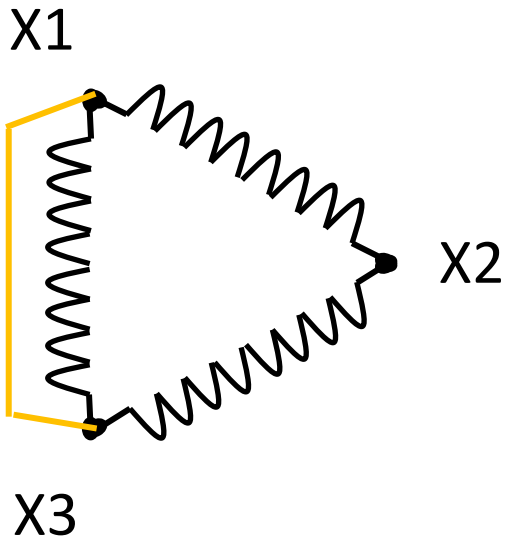
©2022 Altanova Group. All Rights Reserved

Equivalente Monofásico – Montaje de Prueba



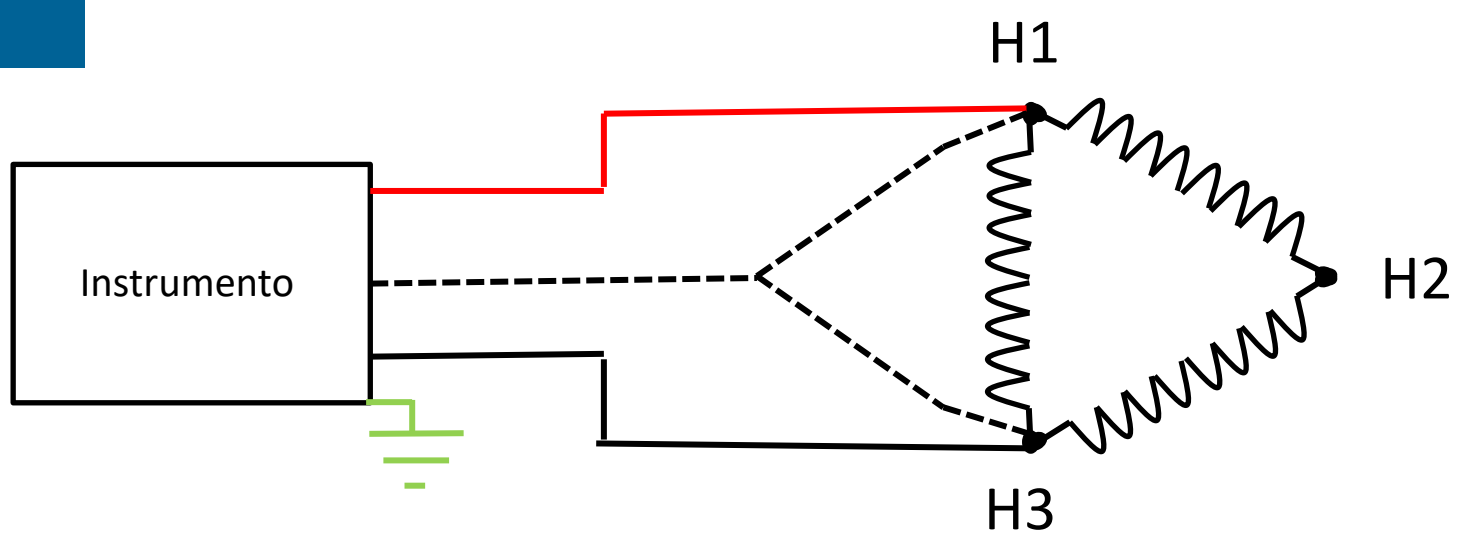


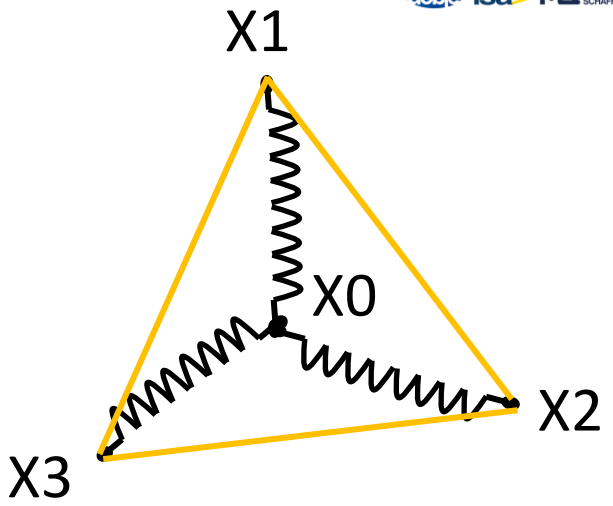


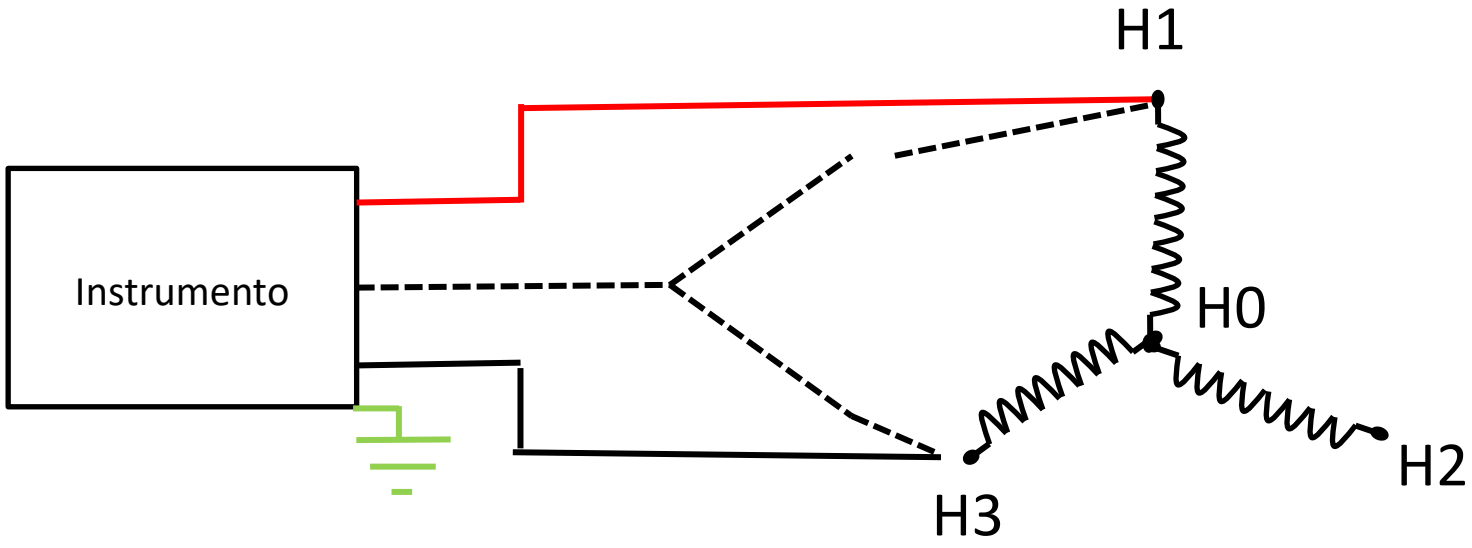


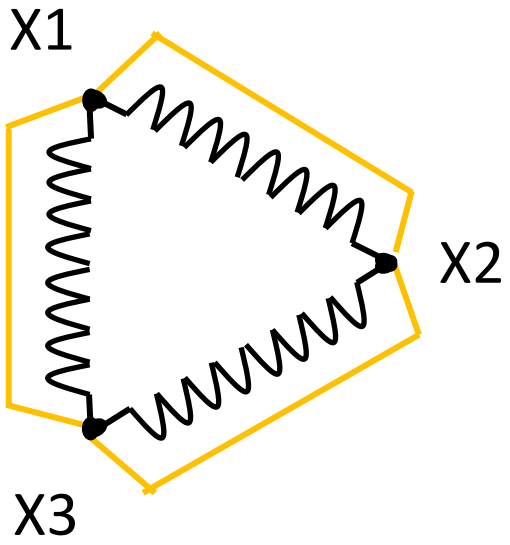
©2022 Altanova Group. All Rights Reserved

Equivalente Trifásico – Montaje de Prueba









©2022 Altanova Group. All Rights Reserved

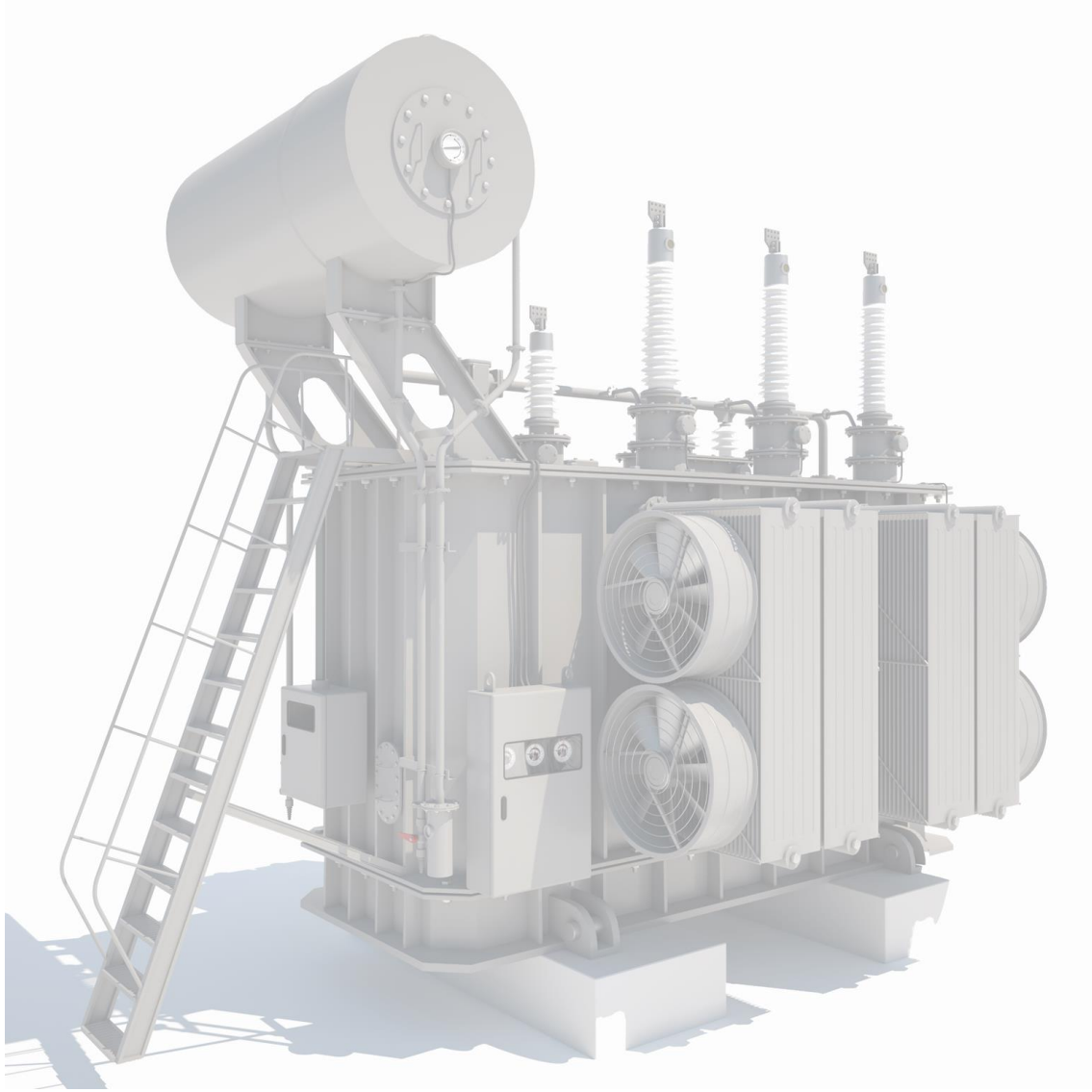
Reactancia de Dispersión y Perdidas

Análisis de datos

- Equivalente Monofásico
  - Comparar cada Fase a el promedio de las 3 Fases
  - Límite para la medición inicial ± 3% del promedio de las 3 lecturas
  - Límite para mediciones subsiguientes ± 2% del dato base establecido
- Equivalente Trifásico
  - Se considera como prueba de Investigación con la excepción de:
    - Configuración Estrella con neutro inaccesible (no se pueden separar las Fases)
  - Comparación a la impedancia de placa no mayor al ± 5% - 7% de diferencia
  - Límites para pruebas subsecuentes ± 2% del dato base establecido
- Correlación directa con la prueba de Corto-Circuito de SFRA

©2022 Altanova Group. All Rights Reserved

Análisis de Respuesta a la Frecuencia (SFRA)

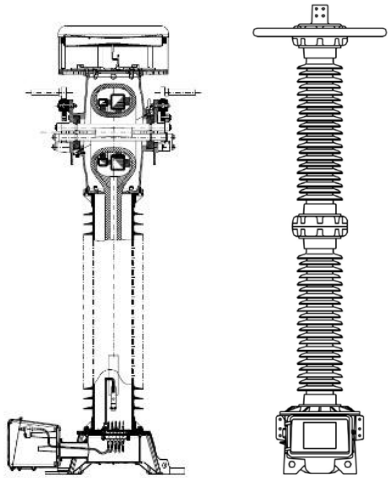


©2022 Altanova Group. All Rights Reserved

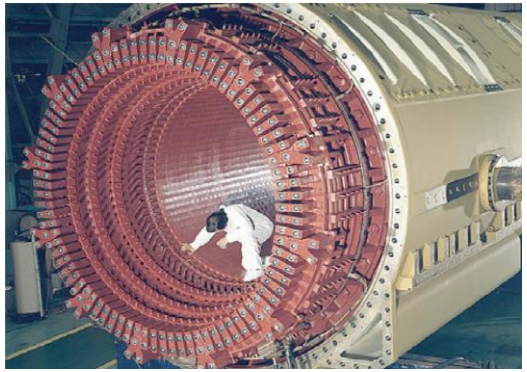
SFRA

Transformadores

Filtros o Trampas de Onda



Transformadores de Instrumentación

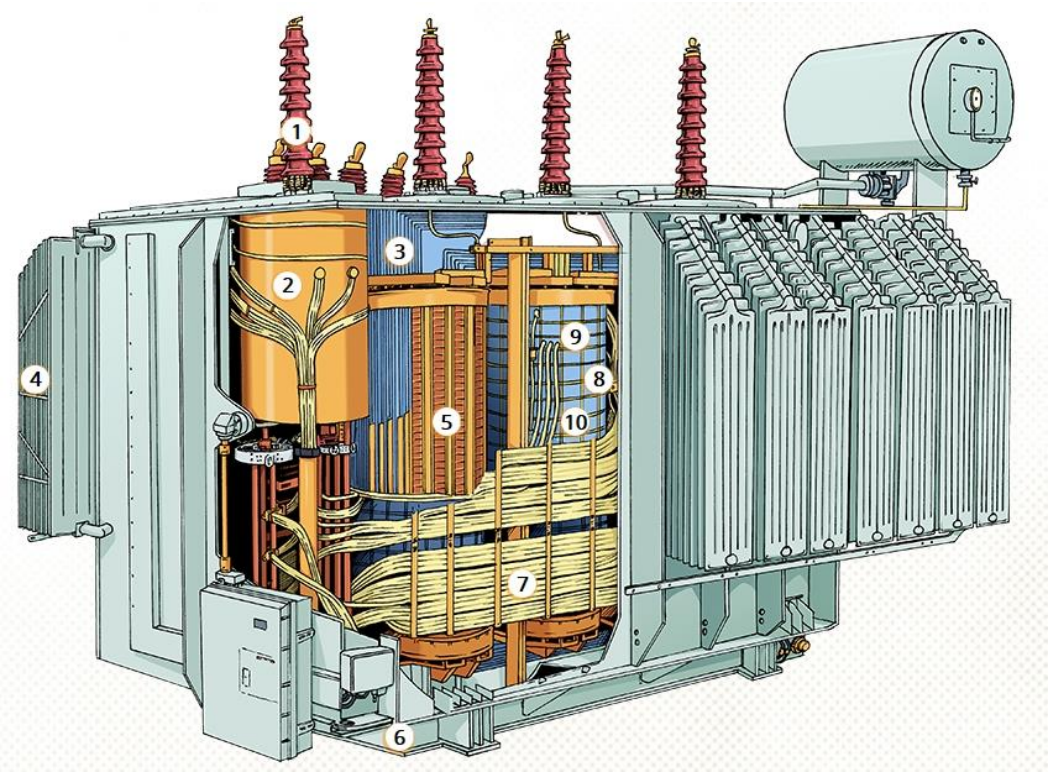


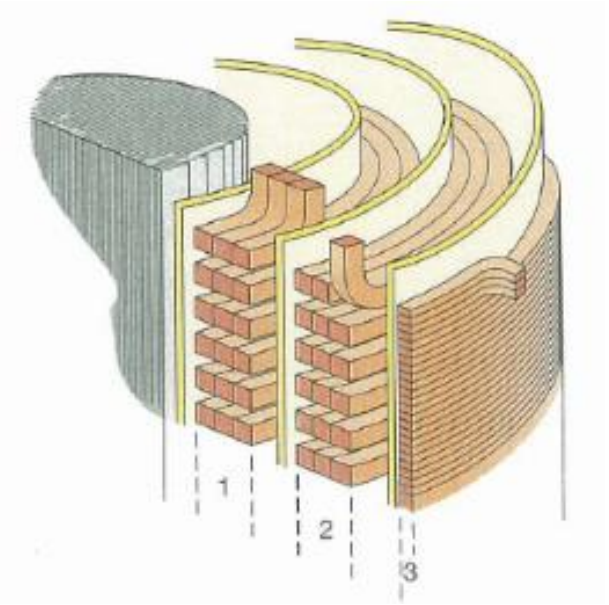
Maquinas Rotativas

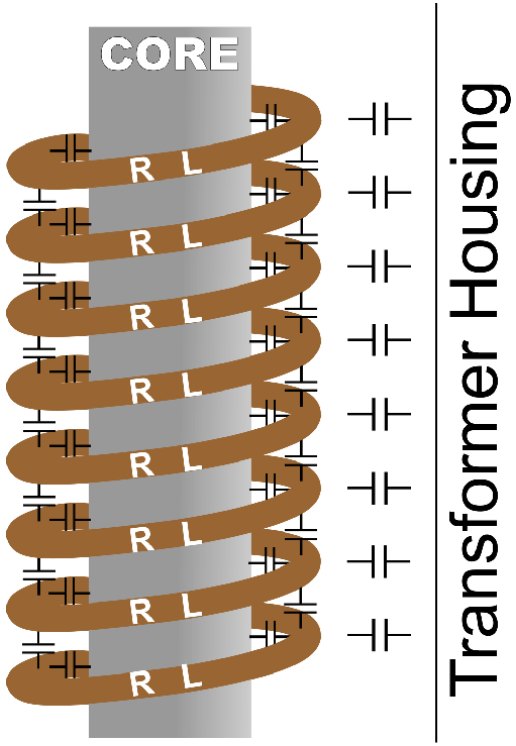
©2022 Altanova Group. All Rights Reserved

SFRA

Los Transformadores son una combinación de R, L and C



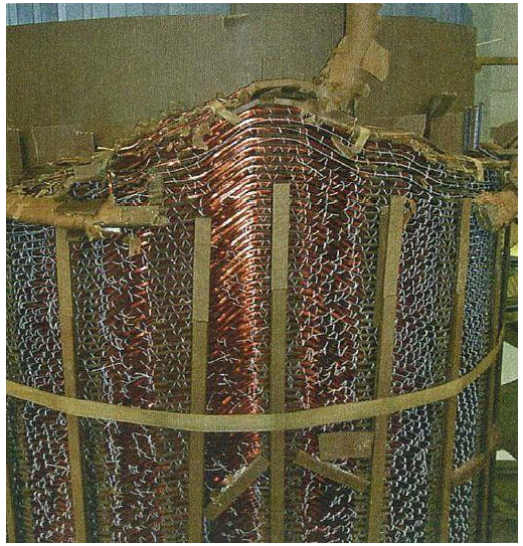




©2022 Altanova Group. All Rights Reserved

SFRA

- Objetivo: detectar defectos relacionados con la geometría del espécimen
  - Problemas en el circuito magnético (Núcleo)
  - Deformaciones en devanados
    - Axiales
    - Radiales
    - Parciales
    - Cortos entre espiras
  - Problemas en conexiones (resistencias, aterramientos)



©2022 Altanova Group. All Rights Reserved

SFRA

¿Cuándo se realiza?

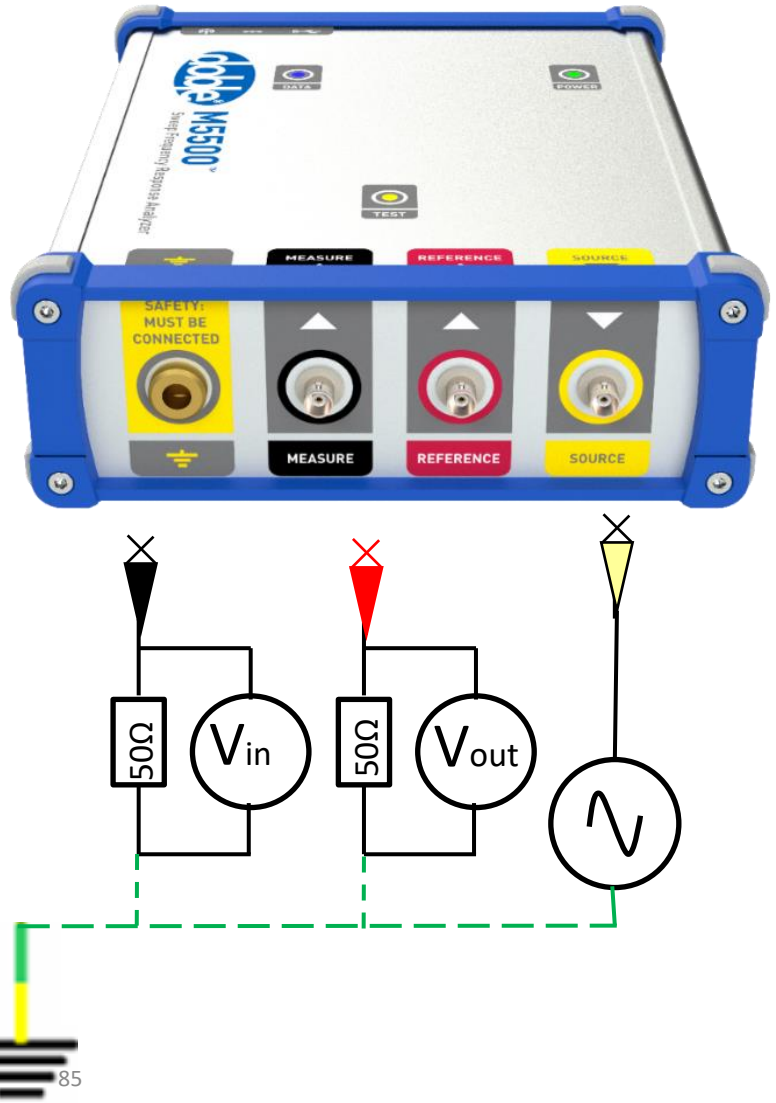
- En fábrica como control de calidad general y para establecer un dato base de referencia

- Luego de un evento en el sistema: falla franca a tierra, falla entre fases, descargas atmosféricas, eventos sísmicos, etc.

- Movimiento y Transporte: establecer firmas de referencia en el punto nuevo para futuras comparaciones

©2022 Altanova Group. All Rights Reserved

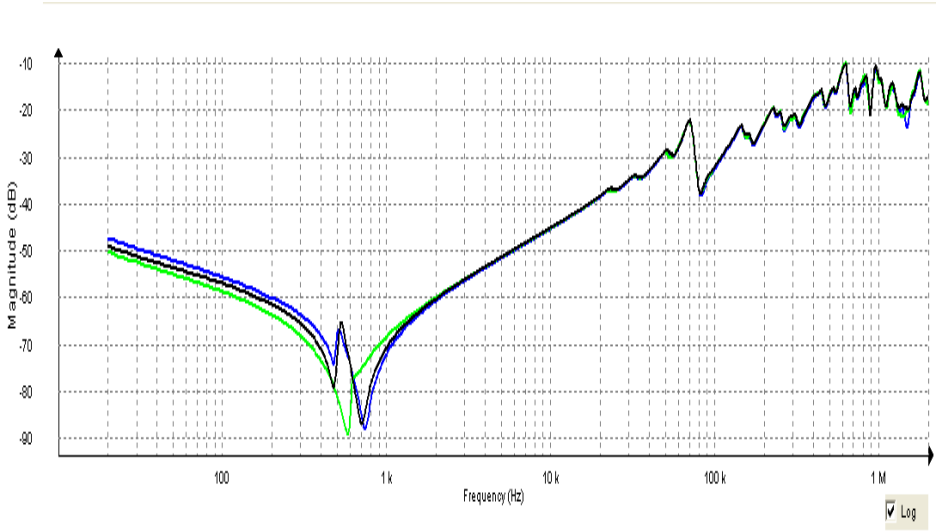
SFRA

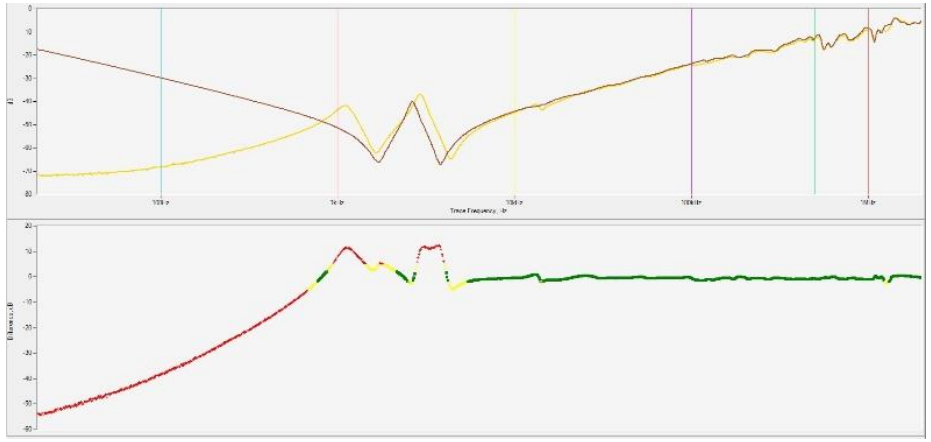


Generando una señal a bajo voltaje (20 V_{pp}) medimos de un lado al otro de la Fase del Transformador.

El proceso genera una respuesta en la frecuencia que incluye un rango de 20 Hz – 2 MHz obteniendo una función de transferencia.

$$G(dB) = 20\log_{10}\left(\frac{V_{out}}{V_{in}}\right)$$

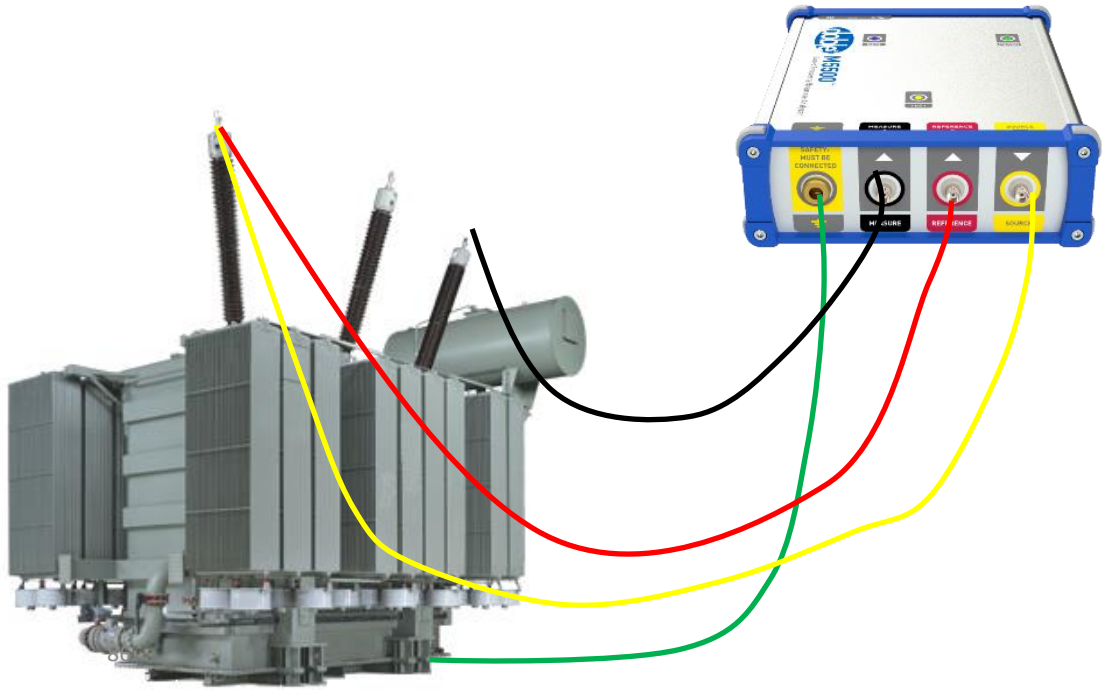




©2022 Altanova Group. All Rights Reserved

SFRA

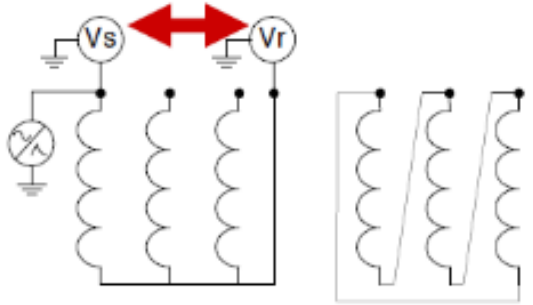
- IEC 60076-18
- IEEE PC57.149/D8
- DLT911 / 2004
- CIGRE WGA2.26 & 342



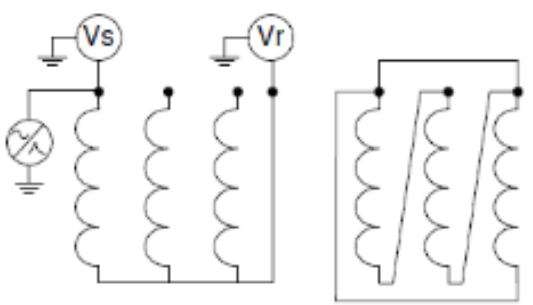
CIGRE
1) End-to-End Open
2) End-to-End Short-Circuit
3) Capacitive Inter-Winding (CIW)
4) Inductive Inter-Winding (IIW)

IEEE
Open Circuit Self Admittance (OC)
Short Circuit Self Admittance (SC)
Inter-Winding (IW)
Transfer Admittance (TA)

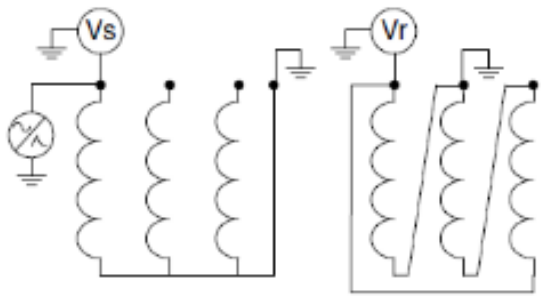
End-to-end



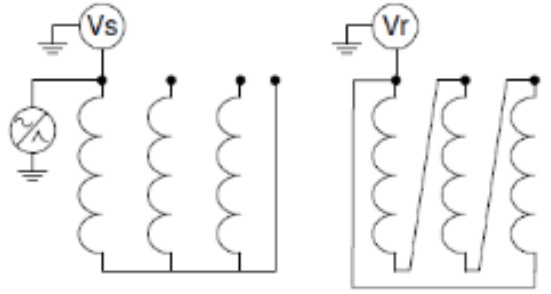
Short-circuit



Inductive inter-winding



Capacitive inter-winding



©2022 Altanova Group. All Rights Reserved

Análisis de datos

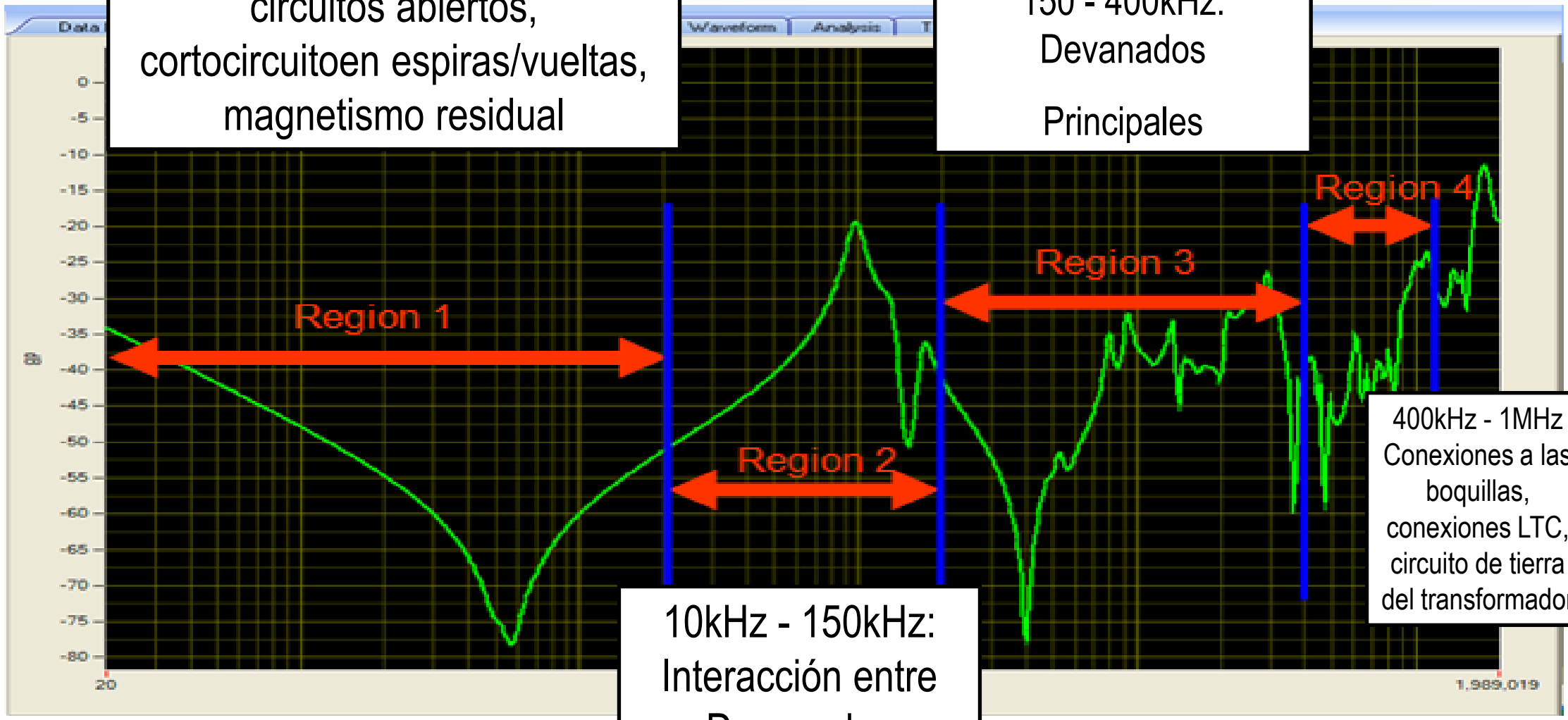
La experiencia nos dice que ciertas bandas de frecuencia están asociadas a componentes específicos del transformador y a ciertos mecanismos de falla

Región	Banda de Frecuencia	Componente
1	0 – 10 kHz	Núcleo Magnético
2	10 kHz to 150 kHz	Interacción entre Devanados
3	150 kHz to 400 kHz	Devanado Principal
4	>400 kHz	Conexiones a las boquillas, conexiones LTC, circuito de tierra del transformador

Cada transformador es diferente, estas son sugerencias generales

©2022 Altanova Group. All Rights Reserved

SFRA - Análisis de Resultados



©2022 Altanova Group. All Rights Reserved

¿Preguntas?

- Arturo H. Oropeza
- Principal Engineer
- Doble Engineering Company
- aoropeza@doble.com

©2022 Altanova Group. All Rights Reserved

¡Regístrate!

XX Conferencia Doble Latinoamericana el 20, 21 y 22 de Septiembre, 2022

©2022 Altanova Group. All Rights Reserved

¡Gracias por su atención!

Arturo H. Oropeza
Principal Engineer
Doble Engineering Company
aoropeza@doble.com

©2022 Altanova Group. All Rights Reserved.