

Capítulo 5 Métodos de prueba para Transformadores

Chapter 5 Standard Test Methods for Transformer

LÓPEZ-RAMOS, Octaviano* & GONZÁLEZ-MIRANDA, Elias

Tecnológico de Estudios Superiores de Jocotitlán, Carretera Toluca Atlacomulco km 44.8, Ejido de San Juan y San Agustín, Jocotitlán, México.

ID 1^{er} Autor: *Octaviano, López-Ramos* / **ORC ID:** 0000-0002-1958-4005, **CVU CONACYT ID:** 99195

ID 1^{er} Coautor: *Elias, González-Miranda* / **ORC ID:** 0000-0002-7281-6303

DOI: 10.35429/H.2021.11.73.104

O. López, E. González

*octaviano.lopez@tesjo.edu.mx

A. Ledesma (Coord.) Ciencias de la Ingeniería y Tecnología. Handbooks-TX-©ECORFAN-México, 2021.

Abstract

The increase in the population demands an increase in the distribution of electrical energy to obtain this, it is important to install new electrical substations with which the new requirements can be satisfied, for this reason, is important to know the manufacturing and operating characteristics of a transformer due to is an important element in an electrical substation, knowing the manufacturing requirements of a transformer so that it can obtain the expected results when applying the tests it requires and thus be able to ensure its useful life, to achieve this it is important to apply the routine test methods established in Standard NMX-J-169-ANCE-2015 “Distribution and Power Transformers and Autotransformers - Test Methods”. There are different types of distribution transformers, such as the substation type, the pedestal type, and the pole type, the latter being the most widely used, although it is worth mentioning that their construction is essentially the same and they only differ from each other due to their presentation and additional accessories.

Test Methods, Standard, Types of Transformer, Transformers, and Autotransformers

1. Introducción

La importancia de las pruebas de rutina a transformadores es muy trascendental para así poder proporcionar una distribución de energía eléctrica de calidad y garantizar el cumplimiento del transformador. Por eso el saber las características y el cómo se realizan las pruebas, es importante, porque la mensura que se obtenga se puede comparar con los valores mínimos que se deben de cumplir establecidos en la norma “Transformadores y Autotransformadores de Distribución y Potencia – Métodos de Prueba” para darle cumplimiento o no, ya que esta información ayudaría a mejorar el producto desde su fabricación o ensamble.

Hay diferentes tipos de transformadores y cada uno de ellos se le aplican ya sea las pruebas de rutina o en unos casos pruebas prototipo u opcionales, por eso el tener un manual de métodos donde ya vengan descritas las pruebas y el cómo aplicarlas es de gran ayuda porque disminuye el tiempo de realización. Para los laboratorios que realizan las pruebas de conformidad contar con un manual de métodos de prueba ayudará a que las pruebas sean estandarizadas y siempre se ejecuten de la misma manera sin importar el personal que las efectúe.

Los métodos describen el procedimiento de cada prueba de rutina, las medidas de seguridad que se deben de tener en cuenta, las condiciones ambientales (si es el caso de la prueba) y las condiciones en las que se debe de encontrar el ítem para poder realizar la prueba. Se da una breve descripción del equipamiento con el que se realizan las pruebas de rutina y su periodo de calibración. Se describe el procedimiento para la ejecución de cada prueba y comparando en algunas pruebas los datos teóricos con los datos obtenidos durante la prueba.

El transformador es un equipo eléctrico que por inducción electromagnética transfiere energía eléctrica, usualmente aumentando o disminuyendo los valores de tensión y de corriente eléctrica a la misma frecuencia del sistema. Un transformador que al recibir energía y al devolverla lo hace a una tensión más elevada, se le denomina transformador elevador, o puede devolverla a una tensión más baja, a este transformador se le denomina transformador reductor. En el caso de que el transformador no eleve o reduzca los niveles de tensión, se tiene entonces una relación de transformación igual a la unidad (Acevedo et al., 2007).

2. Clasificación de los transformadores

Los transformadores se pueden clasificar por:

La forma de su núcleo en:

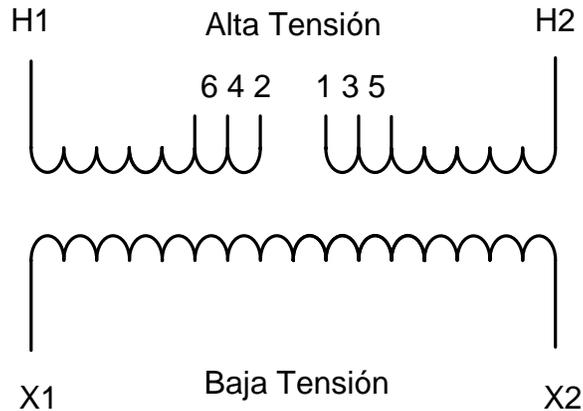
Tipo acorazado: La característica de este tipo de transformador es la de reducir la dispersión magnética, su uso es más común en los transformadores monofásicos y que devanados se localizan sobre la columna central. Las formas de construcción pueden ser distintas y varían de acuerdo con la potencia de diseño.

Tipo columnas: La característica de estos es que los devanados se localizan en las columnas que forman el núcleo.

Por el número de fases en:

Monofásicos: Este tipo solo maneja una fase, cuentan con un solo devanado de alta tensión y uno de baja tensión, como se muestra en la figura 1

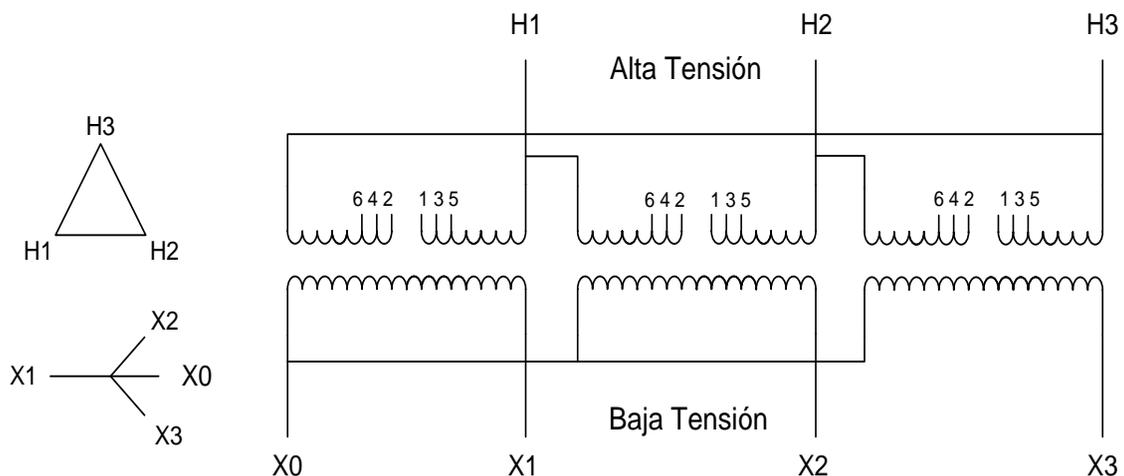
Figura 4 Diagrama eléctrico de un transformador monofásico



Fuente de Consulta: (NMX-J-116-ANCE-2014)

Trifásicos: Se conectan a tres líneas o fases y pueden estar conectados a un neutro o tierra. Tienen tres devanados de alta tensión y tres de baja tensión, como se muestra en la figura 2.

Figura 5 Diagrama eléctrico de un transformador trifásico



Fuente de Consulta: (NMX-J-116-ANCE-2014)

Por el tipo de enfriamiento:

Tipo AA: Transformador tipo seco con enfriamiento propio.

Tipo AFA: Transformador tipo seco con enfriamiento por aire forzado.

Tipo AA/FA: Transformador tipo seco con enfriamiento natural y con enfriamiento por aire forzado.

Tipo OA: Transformador sumergido en aceite con enfriamiento natural.

Tipo OA/FA: Transformador sumergido en líquido aislante con enfriamiento propio y con enfriamiento por aire forzado.

Tipo OA/FOA/FOA: Transformador sumergido en líquido aislante con enfriamiento propio/con aceite forzado – aire forzado/con aceite forzado/aire forzado.

Tipo FOA: Transformador sumergido en líquido aislante con enfriamiento por aceite forzado y de aire forzado.

Tipo OW: Transformador sumergido en líquido aislante con enfriamiento por agua.

Tipo FOW: Transformador sumergido en líquido aislante con enfriamiento de aceite forzado y con enfriadores de agua forzada.

En los transformadores de potencia, una disipación de tan sólo 0,5% de la potencia de un gran transformador genera enormes cantidades de calor y es importante considerarlo, ya que éste es un factor clave en el envejecimiento de los materiales aislantes cuando la temperatura pasa de ciertos límites, por lo que se hace necesario el uso de dispositivos de refrigeración (Coria, 2021).

En función al lugar de instalación

Tipo poste

Monofásico desde 10kVA a 167kVA.

Trifásico desde 15 KVA a 150KVA (NMX-J-116-ANCE-2014).

Tipo pedestal

Monofásico desde 10KVA.

Trifásico desde 30 KVA a 2500KVA (NMX-J-285-ANCE-2016).

Tipo subestación

Monofásicos mayores que 167KVA, capacidades preferentes:250KVA, 333KVA y 500KVA.

Trifásicos mayores a 150KVA, capacidades preferentes: 225KVA, 300KVA y 500KVA (NMX-J-116-ANCE-2014).

Tipo sumergible

Monofásico desde 25 KVA a 167KVA.

Trifásico desde 75KVA a 2500KVA (NMX-J-287-ANCE-1998).

3. Tipos de prueba

Pruebas de prototipo

Son las que se aplican a un transformador con nuevo diseño, con el propósito de comprobar si este cumple con lo especificado en las normas de producto correspondientes.

Pruebas de rutina

Son pruebas que el fabricante aplica a todos los transformadores de acuerdo con los métodos indicados en la Norma Mexicana NMX-J-169-ANCE, para comprobar si la calidad del producto se mantiene dentro de lo especificado en las normas de producto correspondientes.

Las pruebas de rutina son las siguientes:

- Relación de transformación.
- Polaridad.
- Resistencia óhmica de los devanados.
- Resistencia del aislamiento de los devanados.
- Tensión aplicada.
- Prueba de potencial inducido.
- Pérdidas en vacío y corriente de excitación.
- Perdidas de vida a la carga y tensión de impedancia.
- Prueba de hermeticidad.
- Determinación de la tensión de ruptura dieléctrica.

3.1 Relación de transformación

La relación de vueltas debe determinarse para todas las derivaciones, así como para todas las posibles conexiones de los devanados del transformador. La prueba de relación de transformación debe hacerse a tensión nominal o menor y a frecuencia nominal o mayor y sin carga. En caso de transformadores trifásicos, en los cuales cada fase sea independiente y accesible, se recomienda usar de preferencia alimentación monofásica, sin embargo, cuando así convenga, puede usarse alimentación trifásica.

Si se presenta el caso en el cual los devanados de alta tensión estén conectados en estrella y el neutro es inaccesible, se recomienda usar de preferencia alimentación trifásica; sin embargo, cuando así convenga puede usarse alimentación monofásica.

El transformador con conexión estrella y diametral hexafásica, que no tienen el neutro accesible, pueden probarse con alimentación trifásica. Cualquier diferencia en las características magnéticas de las tres fases, origina un desplazamiento del neutro lo cual causa un desequilibrio en las tensiones diametrales. Cuando dicho desequilibrio ocurre, la conexión diametral debe cambiarse, ya sea a una conexión delta o a una estrella. Si se encuentra que las tensiones de línea son iguales y del valor adecuado (1,73 veces la tensión diametral si está conectada en estrella), la relación es correcta.

3.1.1 Métodos de prueba de relación de transformación

- Método de los dos voltímetros.
- Método del transformador patrón.
- Método del puente de relación.

Relación de transformación por el método de los dos voltímetros

Deben usarse dos voltímetros, (con transformadores de potencial si es necesario), uno para medir la tensión del devanado primario y el otro para el devanado secundario.

Leer los dos voltímetros simultáneamente. Para compensar los errores de los instrumentos, tomar lecturas de un segundo grupo, pero con los voltímetros intercambiados. La relación de transformación se determina con el promedio de las lecturas.

Deben hacerse cuando menos cuatro series de pruebas con tensiones distintas que difieran aproximadamente 10 %. Si las relaciones calculadas con los valores anteriores no difieren en más de $\pm 1\%$ el promedio de ellas es la relación de transformación; en caso contrario las pruebas deben repetirse con otros instrumentos.

Relación de transformación por el método del transformador patrón

El método del transformador patrón es el más conveniente para medir con exactitud la relación de un transformador.

El transformador que se va a evaluar se excita en paralelo con un transformador patrón de la misma relación nominal mientras que los otros dos devanados (de baja tensión) se conectan en paralelo, intercalándose un voltímetro o un detector entre dos terminales de igual polaridad. El transformador patrón puede ser un transformador de relación variable, por ejemplo, el Transformer Turn Ratio (TTR), en cuyo caso puede obtenerse directamente la relación de transformación, en la siguiente figura 3 se muestra el esquema de conexión de un "TTR" y en la figura 4 se muestra la conexión de un transformador bajo prueba.

Figura 6 Esquema para la relación de transformación

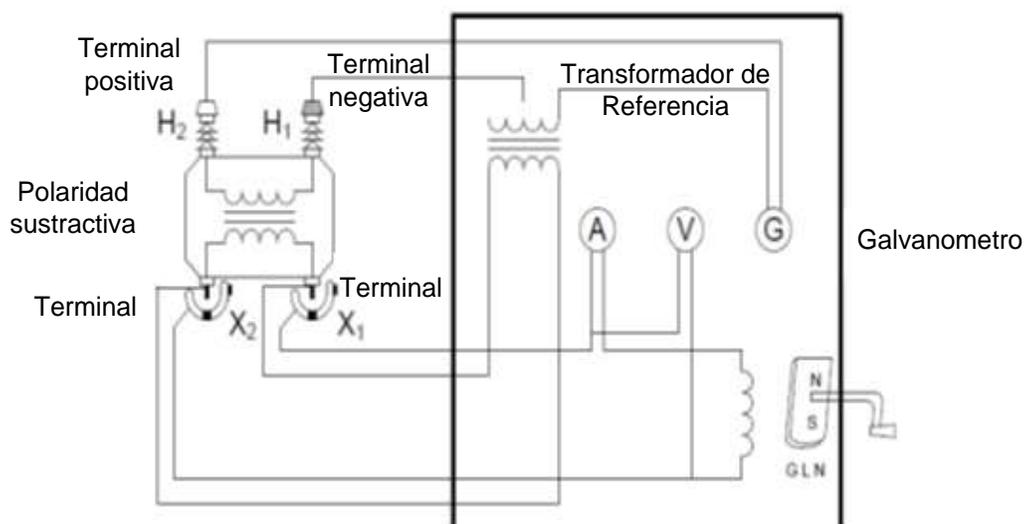
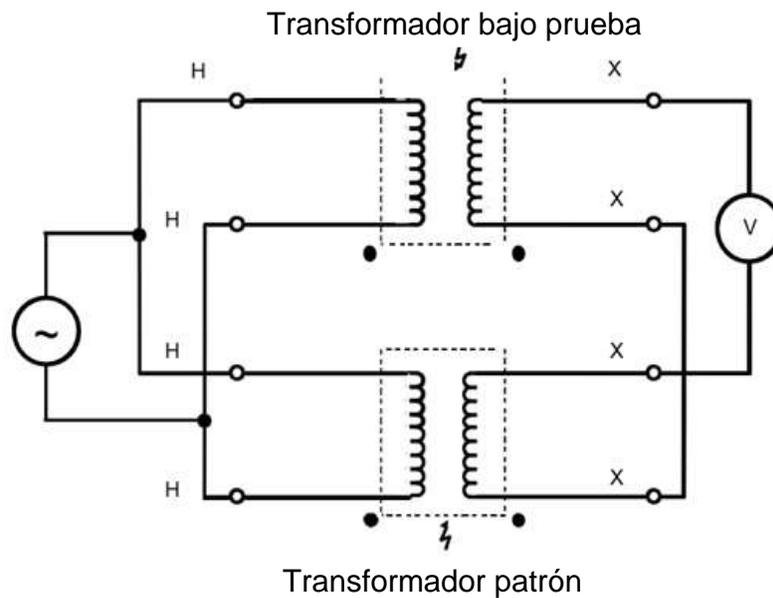


Figura 7 Conexiones para la medición de la relación de transformación por el método del transformador patrón

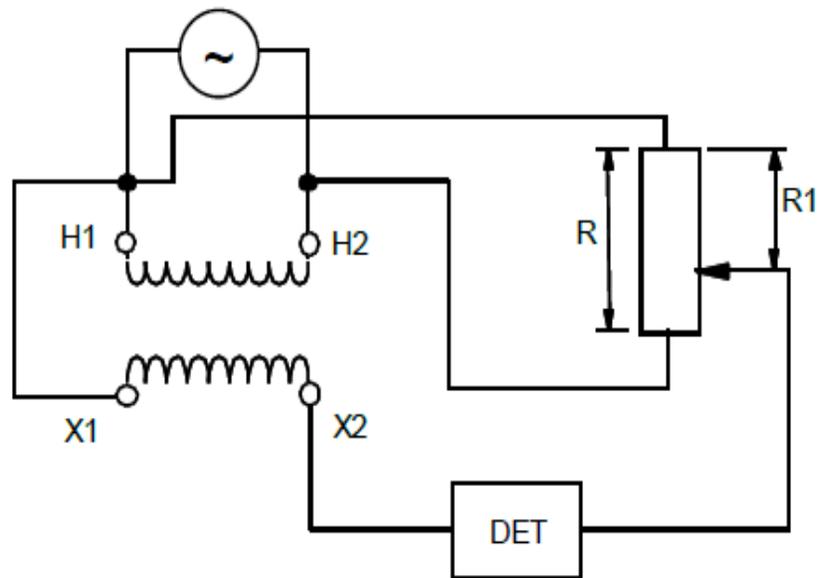


Fuente de Consulta: (NMX-J-169-ANCE-2015)

Relación de transformación por el método del puente de relación

Para determinar la relación del transformador, puede usarse un potenciómetro apropiado, preferentemente graduado para dar la lectura de relación de transformación, como se muestra en la figura 5. Para efectuar la prueba, se varía la resistencia del potenciómetro hasta que el detector indique cero. Entonces la relación de las resistencias del potenciómetro R/R_1 es igual que la relación del transformador (NMX-J-169-ANCE-2015).

Figura 8 Circuito con potenciómetro de resistencia para la prueba de relación de transformación por el método del puente de relación



Fuente de Consulta: (NMX-J-169-ANCE-2015)

3.2 Método de Polaridad

Objetivo:

Determinar si la conexión realizada en el ítem es la correcta y por medio del ensayo de polaridad, determinar la existencia de alguna anomalía en la conexión del ítem.

Condiciones de ensayo:

Al iniciar el ensayo, el ítem debe estar totalmente sin energía.

No deberá existir conexión de ningún tipo de conductor a las terminales de baja tensión y de la alta tensión.

Si se cuenta con diferentes tensiones de operación se realizará este ensayo para las diferentes tensiones de conexión.

Equipamiento: Transformador tipo patrón (T.T.R.).

Análisis de ensayo

Todas las máquinas eléctricas deben de tener su respectiva marca de polaridad la cual pueden ser sustractiva o aditiva.

Se entiende por polaridad a la referencia que se toma de entrada de corriente en un devanado.

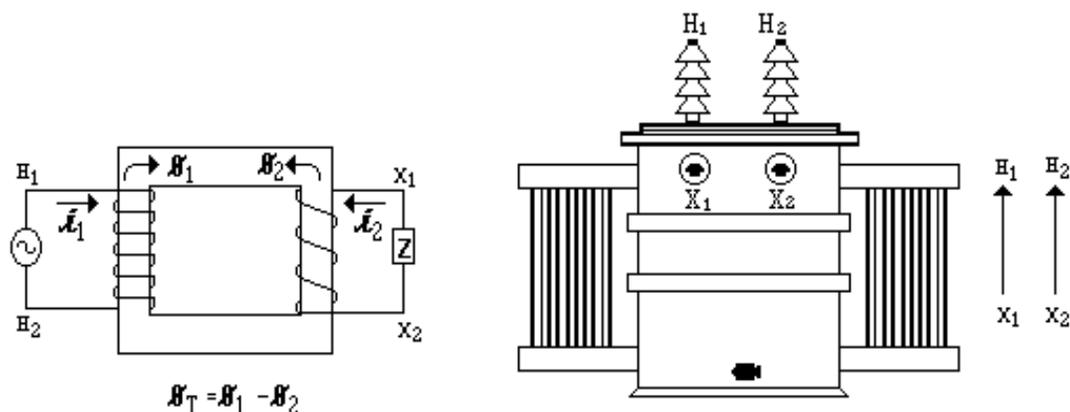
Las marcas de polaridad en ítems está normalizada usando la simbología de $H_0, H_1, H_2, H_3, \dots, H_n$ para la alta tensión y $X_0, X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ para la baja tensión.

Polaridad sustractiva

La figura 6 se representa el caso en el cual convencionalmente se toma la dirección de la corriente y aplicando la regla de la mano derecha, se puede observar que el flujo del devanado de la pierna de alta tensión será opuesto al flujo de la pierna de baja tensión.

En este caso, se considera que por estar opuestos los flujos la polaridad es sustractiva.

Figura 9 Condición de polaridad sustractiva

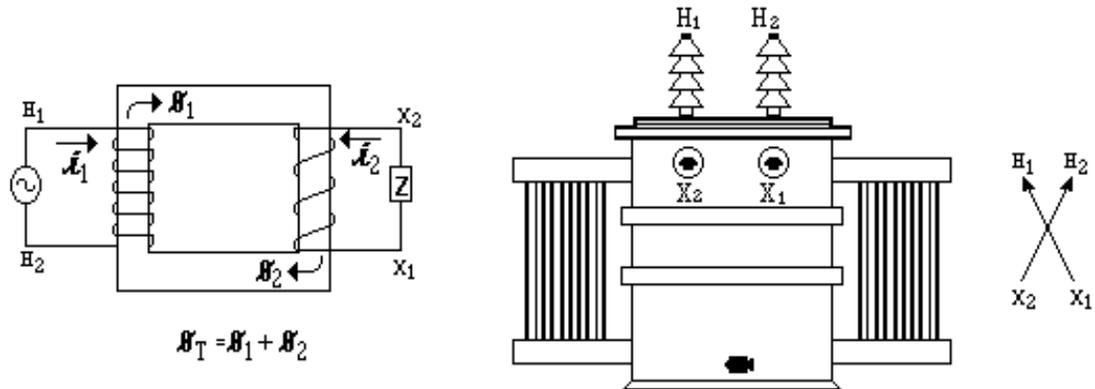


Esto se representa físicamente en el ítem cuando las terminales de alta tensión H_1 y H_2 están lineales con respecto a X_1 y X_2 .

Polaridad aditiva

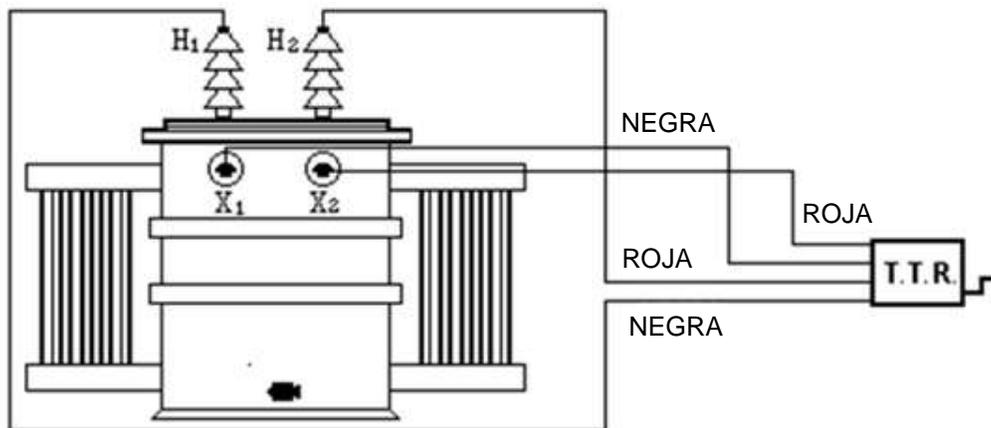
Tomando las mismas consideraciones que en el caso anterior, pero cambiando la disposición del arreglo de la bobina de baja tensión, se puede comprobar que los flujos se están sumando por lo que la polaridad se considera aditiva como se muestra en la figura 7.

Figura 10 Polaridad Aditiva



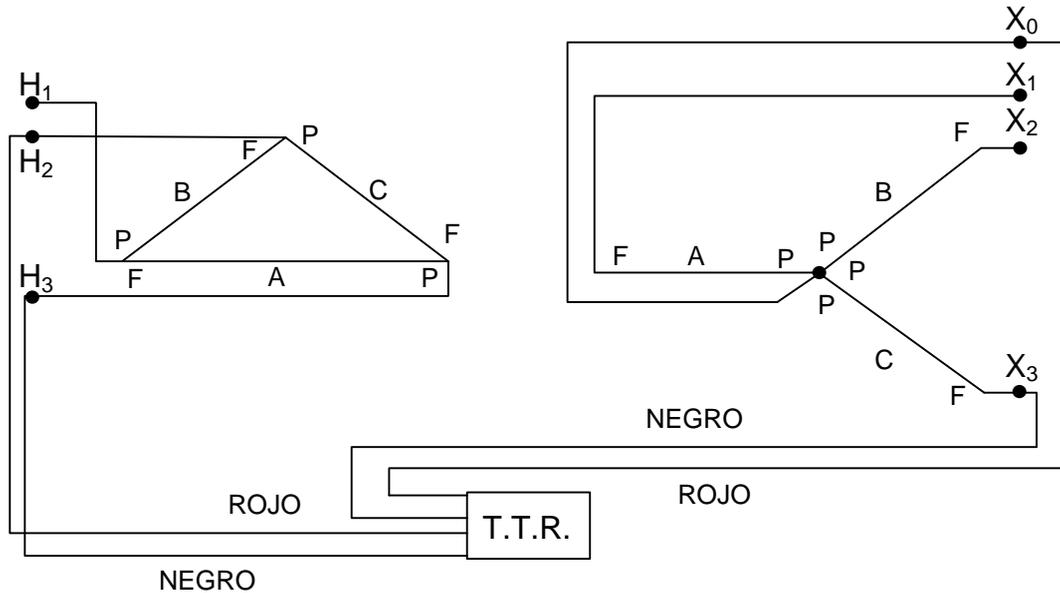
Físicamente en el ítem las terminales de alta tensión H₁ y H₂ estarán con respecto a las de baja tensión X₁ y X₂ en cruz como se muestra en la figura 8.

Figura 11 Diagrama de conexión para la medición de Polaridad y relación de transformación de un ítem monofásico



Para los transformadores trifásicos se verifica la polaridad fase por fase una vez identificada la secuencia de fases como se muestra en la figura 9.

Figura 12 Diagrama de conexión para la Polaridad y Relación de Transformación de un ítem trifásico



3.3 Método de Relación de transformación

Objetivo

Determinar si la conexión realizada en el ítem es la correcta y por medio del ensayo de polaridad y la relación de transformación, determinar la existencia de alguna anomalía en la conexión del ítem.

Procedimiento de ensayo

Estos ensayos en la práctica se realizan con el transformador tipo patrón, conocida normalmente como prueba de relación de transformación o T.T.R.

Para obtener la relación de transformación aplicamos las siguientes fórmulas:

$$a_n = \frac{V_P}{V_S} = \frac{I_S}{I_P} = \frac{N_P}{N_S} \quad (1)$$

$$a_{n_{max}} = 1.005 * a_n \quad (2)$$

$$a_{n_{min}} = 0.995 * a_n \quad (3)$$

Donde:

a_n Relación de transformación

I_S Corriente secundaria

V_P Tensión primaria

I_P Corriente primaria

$a_{n_{max}}$ Relación de transformación máxima

N_P Número de vueltas en el primario

$a_{n_{min}}$ Relación de transformación mínima

N_S Número de vueltas en el secundario

V_S Tensión secundaria

Para una conexión Delta-Estrella se aplica la siguiente fórmula:

$$a_n = \frac{V_P}{V_S/\sqrt{3}} \quad (4)$$

Para el caso de un monofásico o que la conexión de un transformador trifásico sea la misma ya sea Delta-Delta o Estrella-Estrella se aplica la fórmula:

$$a_n = \frac{V_P}{V_S} \quad (5)$$

Cálculo de los tap's o derivaciones

$$V_{Tap_1} = V_{nom} + (V_{nom}(2\omega\%)) \quad (1)$$

$$V_{Tap_2} = V_{nom} + (V_{nom}(\omega\%)) \quad (7)$$

$$V_{Tap_3} = V_{nom} \quad (8)$$

$$V_{Tap_4} = V_{nom} - (V_{nom}(\omega\%)) \quad (9)$$

$$V_{Tap_5} = V_{nom} - (V_{nom}(2\omega\%)) \quad (10)$$

El ítem deberá de estar en el área de Laboratorio de Pruebas.

El ítem estará en reposo antes del ensayo.

El ítem deberá de estar desconectado como se muestra en la figura 10.

Figura 13 Transformador tipo Pedestal



El ensayo se realizará en cada fase del ítem, así como en cada una de las derivaciones como se muestra en las figuras 11,12 y 13 para cada una de las diferentes fases del ítem en prueba.

Figura 14 Conexión para la prueba de relación de transformación en fase 1



Figura 15 Conexión para la prueba de relación de transformación en fase 2



Figura 16 Conexión para la prueba de relación de transformación en fase 3



Se registrarán las mensuras mostradas por el equipamiento en el formato correspondiente (tabla 1).

Tabla1 Relación de Transformación

Conexión	1	2	3	4	5
H1,H3-X0,X1					
H2,H1-X0,X2					
H3,H2-X0,X3					
REL. NOM.	190.32	185.605	181.078	176.551	172.024
REL. MAX.	191.083	186.533	181.983	177.434	172.884
REL. MIN.	189.181	184.677	180.173	175.668	171.164

Una vez realizadas todas las mensuras de relación de transformación en cada una y en sus derivaciones se procederá a desconectar el ítem y se dará por terminada el ensayo.

3.4 Resistencia óhmica de los devanados

Objetivo

Realizar la medición de la resistencia óhmica que presenta el conductor que forma la bobina del ítem, con el fin de determinar las pérdidas por efecto Joule, además la resistencia esperada para el ensayo de elevación temperatura de los devanados.

Condiciones del ensayo

Debe determinarse la temperatura de los devanados al hacer la medición de la resistencia en frío, para lo cual deben tomarse las precauciones siguientes:

- No realizar la medición de la resistencia en frío cuando el transformador se localice en un lugar donde existan corrientes de aire o en un local donde la temperatura ambiente cambie rápidamente.
- Que el transformador haya estado sin energizar sus devanados de 3 h a 8 h.
- Que antes de realizar la medición de la resistencia en frío la diferencia de temperaturas en el aceite entre la parte superior e inferior del tanque no sea mayor que 5 °C (cuando aplique).

Los propósitos fundamentales que tiene la medición de la resistencia óhmica del conductor de los devanados que forman la bobina son determinar si es posible:

- El cálculo de las pérdidas por efecto joule.
- Calcular la sobre elevación de temperatura.
- Fallas probables.

Equipamiento:

Para la medición en las terminales de baja tensión se utilizará el siguiente equipamiento:

Puente de Kelvin (figura 14).

Para la medición de las terminales de alta tensión se utilizará el equipo:

Puente de Wheatstone (figura 15).

Figura 17 Puente de Kelvin



Figura 18 Puente de Wheatstone



Procedimiento de ensayo

El ítem deberá de estar en el área de laboratorio de ensayo.

La temperatura de los devanados debe registrarse promediando las tres temperaturas.

Para el caso de devanados sumergidos en líquido aislante, la temperatura de éstos debe suponerse igual a la temperatura promedio del líquido aislante, siempre y cuando el ítem haya estado en reposo de 3 a 8 horas sin energizar, dependiendo de su tamaño, sin excitación y sin corrientes en sus devanados antes de hacer la mensura en frío.

La mensura de resistencia se realiza mediante el método de puente, el cual es aplicable en todos los casos de mensura de resistencia. Se prefiere generalmente debido a su exactitud, ya que las corrientes pequeñas con que trabaja no alteran el valor de resistencia por cambio de temperatura.

Las figuras 16, 17 y 18 muestran la conexión del ítem en prueba y el equipo para la obtención de resistencia óhmica del lado secundario entre los diferentes puntos.

Figura 19 Medición de Resistencia Óhmica en lado secundario de X_1-X_2



Figura 20 Medición de Resistencia óhmica en lado secundario de X_1-X_3



Figura 21 Medición de Resistencia óhmica en lado secundario de X₂-X₃



Ahora se procede a realizar la medición de Resistencia Óhmica por el lado primario.

Las figuras 19, 20 y 21 muestran la conexión del ítem en prueba y el equipo para la obtención de resistencia óhmica del lado secundario entre los diferentes puntos.

Figura 22 Medición de Resistencia óhmica en lado primario de H₁-H₂.



Figura 23 Medición de Resistencia óhmica en lado primario de H₁-H₃.

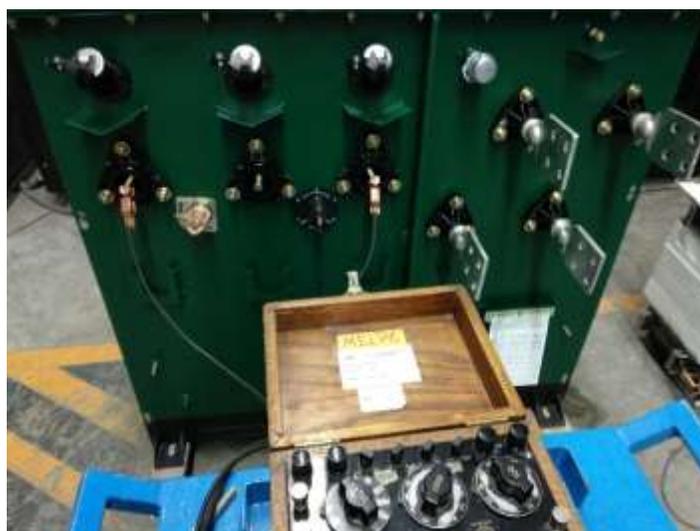


Figura 24 Medición de Resistencia óhmica en lado primario de H₂-H₃.

Se registran las mediciones en el siguiente formato

Tabla 2 Medición de Resistencia óhmica.

Resistencia Óhmica					
Posición			Temp. °C		
Fases	Kat		Fases	Kbt	
H1 - H2			X1 - X2		
H2 - H3			X2 - X3		
H1 - H3			X1 - X3		
Suma			Suma		
Promedio			Promedio		
Const. K			Const. K		
Resistencia			Resistencia		

Para obtener el promedio de la resistencia en el lado primario como en el lado secundario utilizamos las siguientes formulas

$$\sum_1^n R = R_1 + R_2 + \dots + R_n \quad (11)$$

$$\bar{R} = \frac{\sum_1^n R}{n} \quad (12)$$

Donde:

R Resistencia

\bar{R} Promedio de Resistencia

Una vez obtenida las mediciones de los equipamientos estas se multiplican por la constante del aparato.

$$R_{med} = [Lectura\ del\ aparato] \times [constante\ del\ aparato] = [ohms]\ unidades.$$

Para obtener la corrección de resistencia a temperatura de referencia utilizamos la siguiente formula:

$$K_{AT} = \frac{T_k + T_e + 20}{T_k + T_m} \quad (13)$$

$$K_{BT} = \frac{T_k + T_e + 20}{T_k + T_m} \quad (14)$$

Donde:

T_m	Temperatura a la cual la resistencia fue medida, en °C
K_{AT} y K_{BT}	Constante de corrección por temperatura en Alta Tensión y Baja Tensión
T_k	Es igual que 234.5 °C para el cobre y 225 °C para el aluminio
T_e	Temperatura de elevación °C

Para obtener las I^2R aplicamos la siguiente formula:

$$I^2R_{tot} = 1.5(I_s^2R_s + I_p^2R_p) \quad (15)$$

Para obtener la corriente primaria y la corriente secundaria aplicamos las siguientes formulas:

$$I_p = \frac{KVA}{V_p\sqrt{3}} I_s = \frac{KVA}{V_s\sqrt{3}} \quad (16)$$

Donde:

I_p	Corriente primaria
V_p	Tensión primaria
I_s	Corriente secundaria
V_s	Tensión secundaria
KVA	Capacidad

3.5 Resistencia de Aislamiento

Objetivo

Esta prueba determina la resistencia del aislamiento de los devanados individuales a tierra y/o entre devanados. Las figuras 22, 23 y 24 presentan la correcta conexión.

Condiciones de Ensayo

El ítem deberá de estar en el área de Laboratorio de ensayo.

Cortocircuitar los devanados del lado primario y de igual forma cortocircuitar los devanados del lado secundario.

- El ítem deberá estar conectado a tierra.
- Se recomienda que la temperatura de los devanados sean las más cercanas a la temperatura de 20 °C.
- Por ningún motivo deben hacerse pruebas cuando los transformadores estén energizados o en condiciones de vacío.

Equipamiento

Medidor de aislamiento Megóhmetro

Procedimiento de Ensayo

- Conectar el devanado cuya resistencia se desea medir, a la terminal de línea del Megóhmetro.
- Conectar los demás devanados y el ítem a tierra.
- Aplicar la tensión de prueba y obtener las lecturas requeridas.
- Realizar las conexiones como se indica en la tabla 3.

Cuando la prueba se termine, poner a tierra todas las terminales durante un periodo suficiente para permitir que cualquier carga atrapada se reduzca a un valor despreciable.

Figura 25 Conexión Baja Tensión contra Alta Tensión más Tierra.



Figura 26 Conexión Alta Tensión contra Baja Tensión más Tierra.



Figura 27 Conexión Alta Tensión contra Baja Tensión sin Tierra.



El tiempo para cada prueba es de 1 minuto, es el tiempo necesario para determinar si la clase de aislamiento tiene la calidad requerida, como mínimo el valor debe ser 200 M Ω .

Se registran los valores obtenidos en la tabla 3.

Tabla 0 Medición de Resistencia de Aislamiento.

B.T vs A.T. + T	
A.T. vs B.T. + T	
A.T. vs B.T.	

3.6 Tensión Aplicada

Objetivo

Someter a los devanados del ítem a una diferencia de potencial que determiné el buen estado de los aislamientos y distancias dieléctricas.

Condiciones de Ensayo

- El ítem deberá estar en el área del laboratorio de ensayo.
- Se deberá aterrizar todo ítem al cual se le realice la prueba.
- Cuando alguna persona esté dentro del área de laboratorio de ensayo, no deberá portar objetos metálicos y debe portar el equipo de seguridad.
- Todo el ítem tendrá que ser aterrizado después de terminar el ensayo en las terminales del lado primario y secundario para eliminar tensiones residuales.

Equipamiento

- Mesa de Pruebas.
- Transformador de potencial.

Procedimiento del ensayo

- El ítem deberá estar en el área de Laboratorio de Ensayo.
- Se cortocircuitan los devanados del lado primario y del lado secundario.

Las figuras 25 y 26 muestran la forma de realizar el corto circuito de los terminales de entrada y salida del ítem en evaluación.

Figura 28 Lado primario cortocircuitado.



Figura 29 Lado secundario cortocircuitado



Las partes del ítem y los devanados que no se pongan a prueba deberán estar conectados a tierra como se muestra en las figuras 27 y 28.

Figura 30 Puesta a tierra de lado de A.T.



Figura 31 Puesta a tierra del lado de B.T.



Dependiendo de la clase de aislamiento será la tensión que se aplique al ítem (ver tabla 4).

Iniciar la aplicación de la tensión de prueba a un cuarto (o menos) de su valor total, para incrementarla gradualmente hasta alcanzar su valor total en un tiempo no mayor que 15 s. Después de un minuto de prueba, reducir la tensión gradualmente (sin exceder 5 s) hasta un cuarto del valor máximo (o menos), antes de abrir el circuito.

La duración de la prueba debe ser de un minuto empleando una frecuencia de 60Hz.

Tabla 3 Tensión aplicada vs aislamiento

Nivel de aislamiento (KV)	Valor de prueba a baja frecuencia (60Hz)	
	En aceite (KV)	Secos (KV)
1.2	10	4
2.5	15	10
5.0	19	12
8.7	26	19
15.0	34	34
18.0	40	40
25.0	50	50
34.5	70	70

3.7 Prueba de potencial inducido

Objetivo

La prueba de tensión inducida consiste básicamente en inducir en los devanados del transformador una tensión del 200 % de la tensión nominal.

Condiciones de ensayo

- No deberá contar con conexiones eléctricas diferentes a las puntas de alimentación.
- El ítem deberá estar en el área de laboratorio de ensayos.
- Se deberá aterrizar el ítem al cual se le realice esta prueba.
- Personal no autorizado no podrá permanecer cerca del ítem cuando se realicen los ensayos.
- Cuando alguna persona esté dentro del área de Laboratorio de Pruebas, no deberá portar objetos metálicos en las manos, en el cuello y no tener la ropa suelta.
- Ninguna de las terminales del ítem deberá ser tocadas cuando esté energizado.
- El ítem tendrá que ser aterrizado después de terminar el ensayo en las terminales de baja o alta tensión para eliminar tensiones residuales.

Equipamiento

- Mesa de pruebas
- Generador de alta frecuencia

Procedimiento del ensayo

- El ítem deberá de estar en el área de Laboratorio de Ensayos.
- Se realizarán cálculos previos para aplicar esta prueba para la ejecución del ensayo.

Para saber el tiempo de aplicación de la prueba se aplica la siguiente fórmula:

$$t_p = \frac{7200}{f_g} \quad (17)$$

Donde:

t_p = Tiempo de prueba

f_g = Frecuencia del generador

T_{ind} = Tensión de inducido

V_{BT} = Tensión de Baja Tensión

Se recomienda hacer la conexión por el lado secundario ya que es más factible llegar a la tensión secundaria que a la primaria.

El ítem utilizado en las pruebas deberá ser conectado al sistema de tierras del laboratorio de ensayos.

Se conectará el ítem de acuerdo con el siguiente diagrama, para este ensayo considerando si es un ítem monofásico (figura 29) o trifásico (figura 30).

Figura 32 Diagrama de conexión para la realización del Ensayo de tensión inducida, por el lado de baja tensión en un transformador monofásico

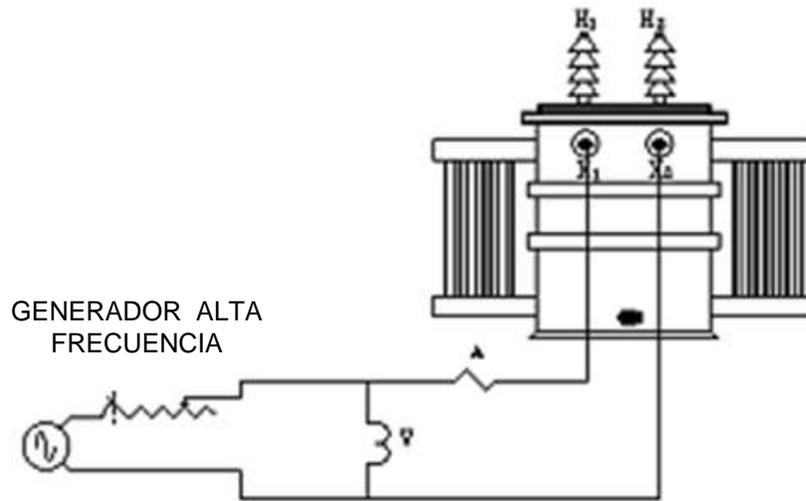
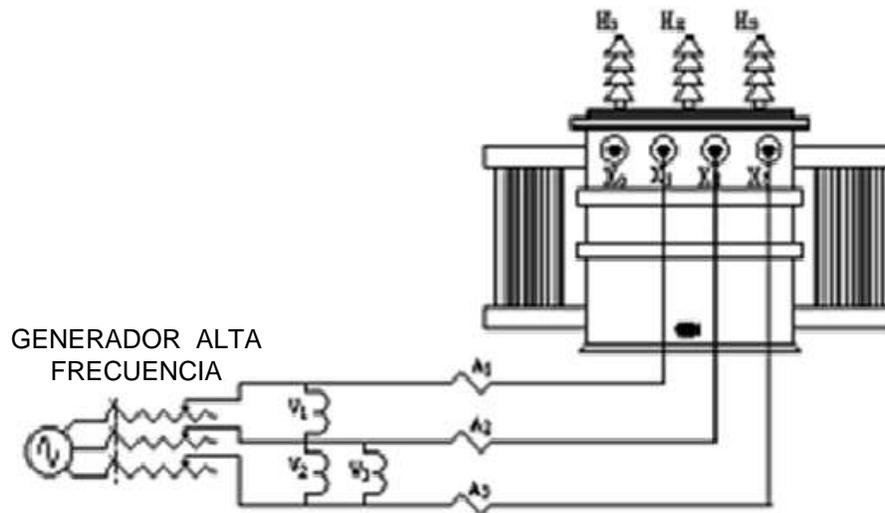


Figura 33 Diagrama de conexiones para la realización del ensayo de tensión inducida, por el lado de baja tensión en un transformador trifásico



El generador de alta frecuencia usado para la prueba es mostrado en la figura 3.26

Figura 34 Generador de alta frecuencia.



Se conecta el ítem para energizarlo ya sea por el lado primario o secundario, dejando los otros devanados en circuito abierto. Como se muestra en la figura 32 para el lado secundario.

Figura 35 Conexión en lado secundario.



Una vez alcanzada la tensión en el ítem empezará a correr el tiempo correspondiente de acuerdo con la frecuencia de la tensión inducida en el ensayo.

Al realizar esto se procede a desconectar todo y se da por terminado el ensayo donde el ítem tendrá que ser aterrizado para eliminar posibles tensiones residuales.

3.8 Prueba pérdidas en vacío y corriente de excitación.

Objetivo

Obtener las pérdidas en vacío del ítem que se encuentran en el núcleo, así como la corriente de excitación cuando éste se encuentra trabajando sin carga.

Condiciones de ensayo

- El ítem debe estar en el piso de pruebas del laboratorio.
- Realizar la conexión adecuada para realizar la prueba de pérdidas en vacío.
- Se deberá aterrizar todo ítem al cual se le realice este ensayo.
- No debe haber personal en el área de piso de pruebas al estar ejecutando esta prueba.
- Todo ítem tendrá que ser aterrizado después de terminar el ensayo en las terminales de baja o alta tensión para eliminar tensiones residuales.

Equipamiento

- Mesa de pruebas
- Transformadores Auxiliares

Procedimiento del ensayo

El equipo deberá estar en el área del piso de pruebas del Laboratorio.

Se seleccionarán los rangos adecuados en la mesa de pruebas, correspondientes a voltímetros de valor medio y valor eficaz, amperímetros, wáttmetros, transformadores de corriente, transformadores de potencial (figura 33).

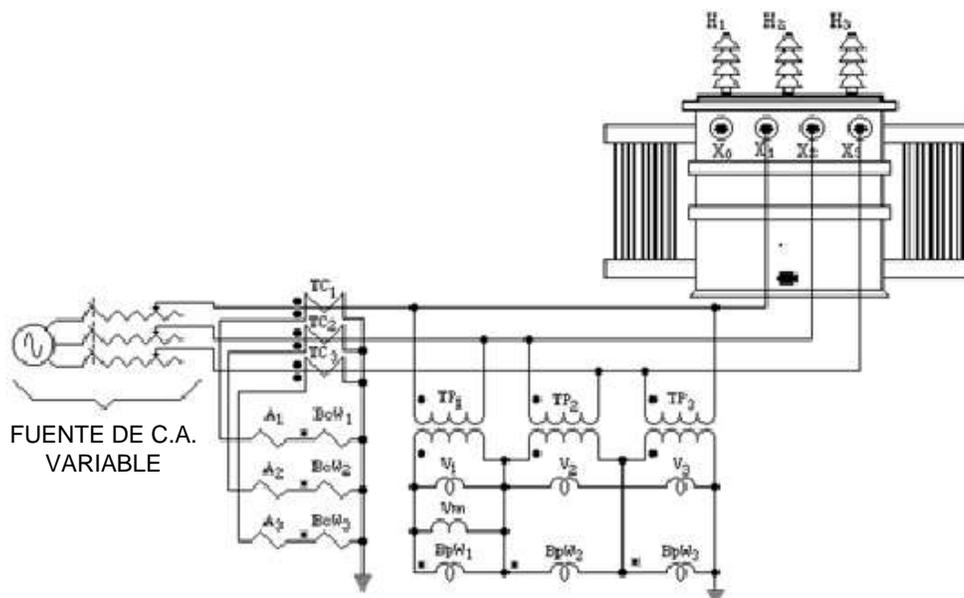
Figura 36 Consola digital para la obtención de Pérdidas en vacío.



Como en esta prueba lo que vamos a obtener es la tensión nominal por el lado secundario, para ajustar la constante del T°C debemos saber la corriente por el lado secundario y obtener el 5% de esta para así tener la constante correcta.

Se conectará el ítem de acuerdo con el siguiente diagrama de conexión (figura 34), se realizará por el lado de baja tensión por razones de facilidad en la ejecución de este ensayo.

Figura 37 Diagrama de conexión para la realización del ensayo de pérdidas en vacío y corriente de excitación



Se debe revisar la conexión del ítem antes de energizar, la figura 3.30 muestra la conexión física.

Figura 38 Conexión por el lado secundario.



Se procede a energizar la mesa de pruebas.

Una vez realizada la conexión eléctrica se energiza la consola, empieza a incrementar la tensión de ensayo por medio del variac hasta alcanzar el valor nominal del ítem, donde esta lectura será indicada por los voltímetros de valor medio.

Se deberá tener cuidado con los rangos seleccionados de los equipamientos para observar si no presenta una falla el ítem, o los rangos fueron mal seleccionados para los valores de corriente y potencia que demande el ítem.

Para determinar que el ítem esta energizado a su tensión de ensayo (debe ser energizado a su tensión nominal por baja tensión), se tomará el promedio de los tres voltímetros de valor medio. Una vez alcanzada la tensión del ensayo, se tomarán las mensuras de los voltímetros de valor medio, amperímetros y wáttmetros.

Los valores obtenidos se registran en el siguiente formato (tabla 5)

Tabla 4 Pérdidas en vacío y corriente de excitación

Fases	V EFICAZ	V. MEDIO	A	W
1				
2				
3				
Suma				
Promedio				
Constante				

Una vez tomadas todas las mensuras de los equipamientos se procederá a desenergizar el ítem bajo ensayo llevando el variac a la posición de cero.

Se desenergiza la consola de pruebas y se desconecta el ítem bajo prueba.

Cálculo de la corriente de excitación por medio de la siguiente fórmula:

$$I_{excitación} = \frac{I_{v_{totales}}}{I_{n_{BT}}} \times 100\% \quad (18)$$

Donde:

$I_{v_{totales}}$ Corriente total de pérdidas en vacío.
 $I_{n_{BT}}$ Corriente nominal del devanado de Baja Tensión.
 $I_{excitación}$ Corriente de excitación en %.

Para obtener los watts en vacío usamos la siguiente formula

$$W_{v_{totales}} = \frac{\sum_1^n W_v Cte_{total}}{0.5 fact + 0.5} \quad (20)$$

Dónde:

W_v = Pérdidas en vacío

$$fact = \left[\frac{V_{eficaz}}{V_{medio}} \right]^2 \quad (21)$$

Donde

\bar{V}_m = Tensión de valor medio

\bar{V}_{ef} = Tensión de valor eficaz

3.9 Prueba pérdidas debidas a la carga y tensión de impedancia.

Objetivo

El objetivo de esta prueba es determinar el porcentaje de impedancia y las pérdidas que tiene el transformador cuando se alimenta el devanado primario a frecuencia nominal con una tensión tal, que haga circular su corriente nominal de línea, estando el devanado secundario cortocircuitado.

Condiciones de ensayo

- No deberá contar con conexiones eléctricas diferentes a las puntas de alimentación y la de corto circuito.
- Se deberá aterrizar todo ítem al cual se le realice este ensayo.
- Ninguna de las terminales del ítem deberá ser tocadas cuando el ítem este energizado.
- Todo ítem tendrá que ser aterrizado después de terminar el ensayo en las terminales de baja o alta tensión para eliminar tensiones residuales.

Equipamiento

- Mesa de Pruebas.
- Transformador auxiliar
- Equipo para realizar el corto circuito.

Procedimiento del ensayo

El ítem deberá estar en el área de Laboratorio de Ensayo.

Se seleccionarán los rangos adecuados en la mesa de ensayos (figura 36),

Figura 39 Consola digital, ajuste de constantes para la obtención de pérdidas debido a la carga

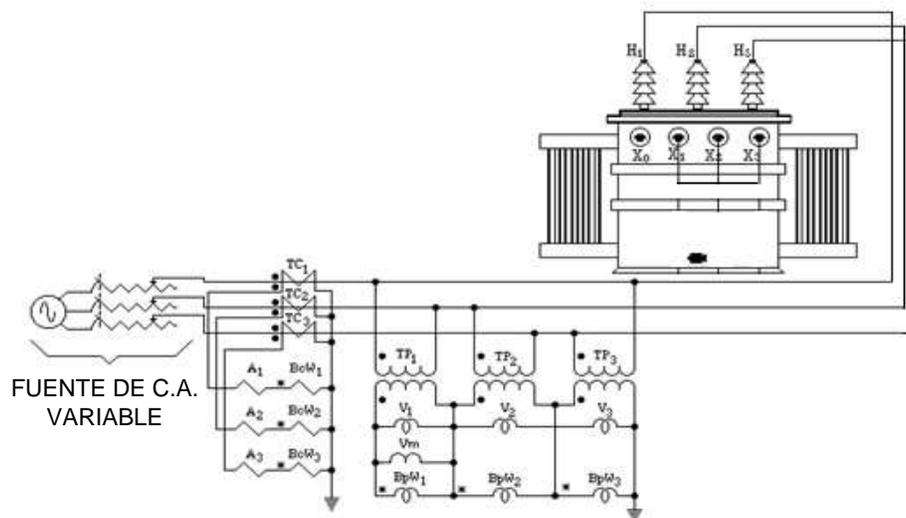


Se accionarán los interruptores adecuados para la conexión del equipamiento necesario en la realización de los ensayos.

En esta prueba se obtendrán las pérdidas debidas a la carga, es importante saber el 5% de la tensión secundaria para así poder elegir la constante a utilizar.

Se conectará el ítem de acuerdo con el siguiente diagrama (figura 37) estando sólidamente aterrizados, la conexión se realizará por el lado de alta tensión por razones de facilidad en la ejecución de este ensayo.

Figura 40 Diagrama de conexión para la realización del ensayo de perdidas debidas a la carga e impedancia



Se debe revisar la conexión del ítem (figura 38).

Figura 41 Cortocircuitado el lado secundario



Una vez realizadas las conexiones y revisado todo el equipamiento necesario en la realización del ensayo se procederá a energizar la mesa.

Una vez realizada la conexión eléctrica se empieza a incrementar la tensión de ensayo por medio del variac hasta alcanzar el valor nominal de la corriente del ítem bajo ensayo, ésta mensura se realizará por medio de los amperímetros.

Se deberá tener cuidado con los rangos seleccionados de los equipamientos para observar si no presenta una falla el ítem o los rangos fueron mal seleccionados.

Para determinar que el ítem esta energizado a su corriente nominal de ensayo, se tomará el promedio de los tres amperímetros de valor eficaz.

Una vez alcanzada la corriente nominal de ensayo, se tomarán las mensuras de los voltímetros de valor eficaz, amperímetros y wáttmetros.

Una vez tomadas las mensuras de los equipamientos se procederá a desenergizar el ítem bajo ensayo llevando el variac a la posición de cero.

Los datos obtenidos serán registrados en el formato correspondiente (tabla 6).

Tabla 5 Valores Pérdidas debidas a la carga y tensión de impedancia.

Fases	V	A	W
1			
2			
3			
Suma			
Promedio			
Constante			

Se desenergiza la consola de pruebas y se desconecta el ítem bajo prueba.

Se aplican las siguientes fórmulas para obtener el porcentaje de Impedancia.

$$\sum_1^n V_c = V_{c_1} + V_{c_2} + \dots \dots \dots V_{c_n} \tag{21}$$

$$\bar{V}_c = \frac{\sum_1^n V_c}{n} \tag{22}$$

$$V_{c_{totales}} = \bar{V}_c(Cte_{TP}) \tag{23}$$

$$Z = \frac{V_{c_{total}}}{V_{AT}} * 100\% \quad (24)$$

3.10 Prueba de hermeticidad por el método de caída de presión

Objetivo

El objeto de esta prueba es garantizar la hermeticidad del transformador para evitar la entrada de humedad y las fugas de líquido aislante.

Condiciones de ensayo

- El ítem deberá estar en el laboratorio
- Deberá estar sin energía.

Equipamiento

- Línea de aire seco o línea de nitrógeno.
- Termómetro
- Cronometro
- Manómetro

Procedimiento del Ensayo

Deben probarse todas las cámaras que requieran de hermeticidad.

La cámara debe llenarse con nitrógeno o aire seco hasta alcanzar la presión indicada en la norma de fabricación (o el valor acordado entre fabricante y usuario) correspondiente al tipo de transformador bajo prueba (figura 39).

Figura 42 Conexión de línea de nitrógeno



Cortar el suministro de nitrógeno o aire seco y dejar el tanque presurizado en reposo durante el tiempo establecido en la norma de producto correspondiente al tipo de transformador bajo prueba.

La presión que se suministrará será de 10 Psi (figura 40).

Para convertir Pa a PSI usamos el siguiente método

Factor de conversión:

$$1\text{Pa} = \text{N}/\text{m}^2$$

$$1\text{ lb}_f = 44482\text{ N}$$

$$1\text{ m}^2 = 1550\text{ pulg}^2$$

$$x\text{Pa} = x \left(\frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right) \left(\frac{1\text{ lb}_f}{4.4482\text{ N}} \right) \left(\frac{1\text{ m}^2}{1550\text{ in}^2} \right) \quad (35)$$

Figura 43 Presión suministrada



3.11 Determinación de la tensión de ruptura dieléctrica

Objetivo

Sirve para indicar la presencia de agentes contaminantes tales como: agua, lodo o partículas conductoras en un líquido, los cuales uno o más pueden estar presentes cuando se encuentra un bajo valor de tensión de ruptura dieléctrica.

Condiciones de ensayo

- La humedad debe ser menor al 60 %, si esto se cumple se puede llevar a cabo la prueba.
- La temperatura ambiente debe ser mayor a 20 °C
- Los electrodos planos deben de tener una separación de 2.54 mm.

Equipamiento

- Probador de rigidez dieléctrica y accesorios.
- Recipiente con el aceite a probar.
- Procedimiento del ensayo
- La copa debe enjuagarse con el aceite a probar (figura 41).

Figura 44 Copa donde se vierte el aceite a probar.



Se ajustan los electrodos con el perno patrón (figura 42).

Figura 45 Perno patrón



Una vez colocada la copa con aceite en el equipamiento de ensayo, se somete a un tiempo de reposo que será de tres minutos antes de energizar, para que la estructura molecular del aceite se uniformice en el recipiente (figura 43).

Figura 46 Copa con el aceite a probar.



Pasado este tiempo de reposo se energiza el regulador de tensión al cual están conectados los electrodos de la copa, se va incrementando la diferencia de potencial entre los contactos de la copa y se observa cuando se da el arqueo, que es cuando se produce la ruptura del aceite, tomando en este momento la primera mensura y anotándola en el formato correspondiente (figura 44).

Figura 47 Equipamiento para realizar prueba de rigidez dieléctrica.



Se repite esta operación en cuatro ocasiones a la misma muestra del aceite ahora esperando un minuto entre cada lectura y se registra el valor en la tabla 7.

Se determina el valor promedio de la tensión que provocó el rompimiento del dieléctrico aislante, el cual será el resultado final.

Tabla 6 Prueba de Rigidez Dieléctrica

Prueba de rigidez dieléctrica		
Lectura	Tiempo	kV
1	3 min	
2	1 min	
3	1 min	
4	1 min	
5	1 min	
Promedio		

A continuación, se muestra la fórmula empleada para obtener el promedio de las mensuras.

$$\sum_1^n \delta = \delta_1 + \delta_2 + \dots \dots \delta_n \quad (26)$$

$$\bar{\delta} = \frac{\sum_1^n \delta}{n} \quad (27)$$

Donde:

δ Lectura de ruptura del aceite

Conclusiones

Existe una amplia gama de transformadores, los cuales deben de cumplir con las Normas Nacionales donde indican las pruebas de rutina que se aplican para comprobar que el ítem cumple con los requerimientos establecidos y saber en qué condición se encuentra el transformador.

El procedimiento que se describe en los métodos cumple con la normatividad vigente nacional, el cual debe de ser ejecutado por personal calificado para poder brindar una confiabilidad en la aplicación de los métodos.

La aplicación de las pruebas y cumplimiento de estas asegura la calidad de los productos que se están comercializando en el territorio Nacional, así como la certificación ante los organismos correspondientes que avalan que el producto no es un riesgo para los usuarios bajo uso.

La aplicación de las pruebas y obtención de los resultados para el caso de los fabricantes pueden ser usados para corregir deficiencias en la fabricación o ensambles y evitar pérdidas de tiempo e incluso pérdidas económicas.

Si se cuenta con un ítem en óptimas condiciones de ensamblaje y un personal calificado para ejecutar las pruebas se podrán obtener los valores reales de pérdidas de los transformadores y así poder obtener la eficiencia y que este valor sea más confiable.

Más que tener un ítem bien ensamblado el principal objetivo es describir los métodos de prueba que se aplican y así poder aplicar los conocimientos que debe de tener el personal que ejecuta las pruebas para una certificación. Es muy importante que las pruebas solo evalúan el producto, avala que el producto no fallará estando en funcionamiento.

Referencias

Coria, F. (2021). Tipos De Enfriamiento En Transformadores. Recuperado 10 de noviembre de 2021, de academia.edu website:
https://www.academia.edu/31351792/Tipos_De_Enfriamiento_En_Transformadores.

H. Acevedo Andrés, L. Vilchis R. Rodrigo, P. Martínez E. Alejandro, “manual de pruebas a transformadores de distribución”, memoria de tesis, Ing. Electricista, Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica.

NMX-J-116-ANCE-2014, Transformadores de Distribución Tipo Poste y Tipo Subestación - Especificaciones, Diciembre 2014.

NMX-J-285-ANCE-2016, Transformadores tipo pedestal monofásico y trifásico para distribución subterránea - Especificaciones, Junio 2016.

NMX-J-287-ANCE-1998, Productos eléctricos transformadores de distribución tipo sumergible monofásico y trifásicos para distribución subterránea - Especificaciones, Junio 1999.

NMX-J-169-ANCE-2015 Transformadores y Autotransformadores de Distribución y Potencia – Métodos de Prueba.

NMX-J-123-ANCE-2008 Aceites Minerales Aislantes para Transformadores-Especificaciones, Muestreo y Métodos de Prueba.