



UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO
DIVISIÓN DE CIENCIAS E INGENIERÍA

**Proceso de construcción y pruebas eléctricas a transformadores
de distribución**

TRABAJO MONOGRAFICO
Para obtener el grado de
Ingeniero en Sistemas de Energía

PRESENTA
David Reyes Tun Xix

ASESORES
M.C. Emmanuel Torres Montalvo
M.E.S. Roberto Acosta Olea
Dr. Freddy Ignacio Chan Puc



Chetumal Quintana Roo, México, Noviembre de 2013



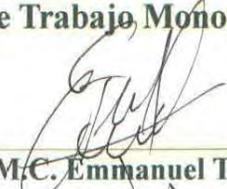
UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO
DIVISIÓN DE CIENCIAS E INGENIERÍA

Trabajo monográfico elaborado bajo supervisión del Comité de asesoría y aprobada
como requisito parcial para obtener el grado de:

INGENIERO EN SISTEMAS DE ENERGÍA

Comité de Trabajo Monográfico

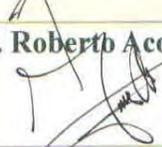
Supervisor: _____


M.C. Emmanuel Torres Montalvo

Supervisor: _____


M.E.S. Roberto Acosta Olea

Supervisor: _____


Dr. Freddy Ignacio Chan Puc



Chetumal, Quintana Roo, México, Noviembre 2013.

AGRADECIMIENTOS

Gracias Dios por permitirme compartir estos momentos de regocijo en compañía de mis amigos y seres queridos. Gracias por brindarme la oportunidad de vivir un día más, demostrarte y demostrarme lo maravilloso que es alcanzar una de muchas metas.

Agradezco a mis padres, mis abuelos, mis hermanas, mi novia, mi hija, mis cuñados, familia y amigos que siempre están y sé que estarán en los momentos importantes de mi vida. Gracias a todos ustedes es que encuentro los motivos para dedicarle esfuerzo y empeño a toda meta que me proponga. Gracias, muchas gracias por estar ahí cuando en verdad se les necesita y ser, ése detalle, ése comentario acertado, esa motivación y ese empuje para no dejarme vencer y levantarme de esos pequeños tropiezos que me pude encontrar a lo largo de mi etapa de estudiante en esta institución.

Agradecimiento especial a mis Profesores y amigos Emanuel Torres, Roberto Acosta, Inocente Bojórquez, Víctor Sánchez, Javier Vázquez, Jaime Ortigón, Freddy Chan, Jorge Aguilar, Omar Yam, que a lo largo de la carrera fueron los mejores guías y consejeros en el debido momento, logrando despertar en mí, la creatividad y entereza para afrontar cualquier problemática con la que me pudiera encontrar siempre con ese profesionalismo y alegría que les caracteriza, Gracias Amigos.

Aun gran amigo y apoyo de la familia, Manuel Pech, que a pesar de encontrarnos en momentos complicados siempre estuvo y sé que estará ahí para alentarnos y brindarnos su ayuda sin importar hora y lugar, gracias.

A mis compañeros de carrera que me ayudaron y estuvieron en las diferentes situaciones ya sea tanto personales como curriculares, muchas gracias, les deseo lo mejor y a los que se nos han adelantado que se encuentren en Paz, muchísimas gracias.

Una etapa de mi vida termina, pero da pie a iniciar muchas otras más que seguramente disfrutaré de igual o mejor forma. Gracias a todos los actores que lo hicieron posible. Me quedo con lo genial que fue estudiar en ésta máxima casa de estudios, dedicarle mi esfuerzo, sudor y ganas a lo largo de este tiempo, siempre los recordaré. GRACIAS UQROO.

RESUMEN

El presente trabajo monográfico documenta a través de cinco capítulos, el proceso de construcción de un transformador de distribución que operan por lo general con tensiones de 13.2 kV/220-127V y que se emplean en la gran mayoría de las instalaciones eléctricas tipo comercial o industrial. Se inicia resaltando la importancia del transformador dentro de una red eléctrica y se describen las piezas que lo conforman. Posteriormente se indican las pruebas eléctricas a las que se someten para verificar su operación correcta.

En él un último capítulo se muestra el armado del tanque de un transformador de distribución tipo pedestal con el objetivo de exponer la constitución del mismo y los materiales con los que son armados así como las especificaciones mínimas requeridas para una puesta en servicio del mismo.

Como aporte anexo, se encuentran los formatos que son emplean en el momento de realizar las pruebas, documentar y dar seguimiento en el armado un transformador.

CONTENIDO

RESUMEN	4
CAPITULO 1	7
Antecedentes	7
Objetivo General.....	12
Objetivos Específicos	12
Justificación.....	12
Introducción.....	13
CAPITULO II	14
El transformador y sus aplicaciones.....	14
2.1 Definición	14
2.2 Principio de funcionamiento.....	15
2.3 Relación de transformación	15
2.4 Clasificación y utilización de los transformadores	16
2.5 Partes constitutivas	25
2.6 Aplicaciones.....	31
2.7 Normas aplicables a la fabricación de un transformador.....	33
CAPITULO III	35
Proceso de fabricación de un transformador	35
3.1 Construcción del tanque y proceso de soldadura	35
3.2 Diseño del núcleo.....	36
3.3 Volumen del aceite dieléctrico	36
3.4 Accesorios, conectores, etc.	37
3.5 Pintura y rotulado	38
CAPITULO IV	40
4.1 Pruebas y ensayos a transformadores de distribución	40
4.2 Pruebas en fábrica o laboratorio.....	41
CAPITULO V	51
5.1 Puesta en servicio.....	51
CONCLUSIONES	52
ANEXOS	53

APÉNDICE A. PRUEBA DE ESTABILIDAD QUÍMICA DE LAS JUNTAS (EMPAQUES) DE MATERIAL POLIMÉRICO EN EL ACEITE MINERAL	53
APÉNDICE B. RECUBRIMIENTO ANTICORROSIVO Y COLOR DEL TRANSFORMADOR	56
APÉNDICE C. RECUBRIMIENTO ANTICORROSIVO Y COLOR DEL TRANSFORMADOR	58
APÉNDICE D. CARACTERÍSTICAS DE LOS EMPAQUES	59
Bibliografía	60

CAPITULO 1

ANTECEDENTES

Entre 1845 y 1870 se hicieron diversas modificaciones a los generadores y motores eléctricos, con lo que se mejoró sustancialmente su funcionamiento. Cuando en un principio se construyeron estas máquinas presentaban diferentes problemas como baja eficiencia, inestabilidad en el funcionamiento, etc. Se requirió un gran esfuerzo de investigación e ingenio para sortear los obstáculos. De esta manera, por ejemplo, en 1870 el francés Zénobe Théophile Gramme alcanzó voltajes muy altos en un generador eléctrico, [2].

En 1881, por medio de una ingeniosa combinación, Charles Brush logró que el voltaje del generador tuviese siempre un valor constante, sin importar cuánta corriente proporcionara el aparato.

Entre los primeros en reconocer los factores que causaban pérdidas en un generador se encuentran los estadounidenses Edward Weston y Thomas A. Edison, quienes aumentaron la eficiencia de los generadores del 50 al 90 por ciento.

Hacia principios de la década de 1890 se empezaron a utilizar conjuntos de generadores conectados en paralelo, con lo que se logró producir grandes cantidades de electricidad.

Para mover los generadores se usaban máquinas de vapor, y ocasionalmente fuentes hidráulicas.

En octubre de 1879, después de muchas experiencias infructuosas y de haber gastado la considerable cantidad de 40,000 dólares, el estadounidense Thomas Alva Edison (1847-1931) logró construir una lámpara incandescente en la que un filamento de carbón emitía luz al hacerle pasar una corriente eléctrica por más de 40 horas. El famoso inventor colocó su filamento dentro de un bulbo de vidrio que estaba al vacío en su interior. Edison logró fabricar este tipo de focos de una manera muy eficiente, y con este invento se abrió un campo extraordinario de aplicación que creó la necesidad de construir generadores eficientes de electricidad.

En 1881, Edison introdujo la estación eléctrica, o sea, una planta en la que se generaba electricidad y de allí se distribuía. Esto ocurrió en la ciudad de Nueva York. De dicha estación, que contenía un generador de corriente continua, salió

una red de líneas que distribuían la electricidad a muchas partes de la ciudad. Al ofrecer el servicio de la luz eléctrica al público, Edison dejó atrás a todos sus competidores.

Una vez que la electricidad pudo ser generada y distribuida para la iluminación, se aprovechó para ser utilizada como fuerza motriz por medio de motores eléctricos. Se puso así a disposición de la industria y de los transportes un nuevo medio universal y barato de distribución de energía que dio un gran impulso a la utilización de los motores eléctricos. Así se creó la “industria eléctrica pesada”.

A pesar de los extraordinarios logros de Edison, hubo problemas con la corriente eléctrica que utilizaba, que como bien sabemos, era corriente continua. En efecto, en primer lugar, la utilización de circuitos en paralelo requirió que los cables fueran muy gruesos, lo cual generaba altos costos y con mucha caída de tensión debido a pérdidas por efecto Joule. En segundo lugar, y de más importancia, al aumentar la demanda de iluminación se necesitarían cargas cada vez más altas que implicaban corrientes eléctricas enormes. Por lo tanto, se estaba ante la alternativa de enviar corrientes muy altas a través de grandes cables de cobre, lo cual era muy ineficiente, o de construir muchas plantas generadoras de electricidad cercanas a los usuarios, con el respectivo aumento considerable de los costos.

Por otro lado, la transmisión de corriente eléctrica de alto voltaje a largas distancias, por medio de conductores relativamente delgados, podría ser muy eficiente. La objeción era que un generador de corriente continua produce corriente con un voltaje determinado que no se puede modificar y por tanto, no habría forma de reducir el voltaje al valor que se necesitara, en particular en el uso doméstico.

La solución a estos problemas se encontró con la construcción de generadores de corriente alterna por un lado, y la invención del transformador por el otro. Estos dos dispositivos basan su funcionamiento en la ley de inducción de Faraday. Veamos un poco de su historia.

Desde que Faraday descubrió la inducción electromagnética se construyeron los primeros generadores que producían corriente eléctrica que variaba o alternaba al transcurrir el tiempo; el número de veces que el valor de la corriente cambia en un segundo es la frecuencia de la corriente y se mide en Hertz (Hz); así, una corriente de 60 Hz es aquella que varía 60 veces en un segundo. En 1888, Nikola Tesla (1856-1943) obtuvo una patente por un generador polifásico alterno que producía gran potencia eléctrica; muy pronto, este tipo de máquina fue la más usada. Hoy en día, se emplean generadores que son versiones muy mejoradas del generador

polifásico de Tesla. Los primeros generadores fueron diseñados para que produjeran corrientes que tenían diferentes valores de sus frecuencias, los de 25, 33.5, 40, 50, 60, 90, 130 y 420 Hz fueron los más usados, que con el tiempo, se ha convenido en utilizar 60 Hz.

Por otro lado, un inventor francés, Lucien H. Gaulard y un ingeniero inglés, John D. Gibbs, obtuvieron en 1882 una patente para un dispositivo al que ellos llamaron generador secundario. De esta manera, incorporaron a un sistema de iluminación la corriente alterna. El sistema que ellos patentaron fue una versión poco práctica de lo que hoy en día llamamos un transformador.

El primer transformador fue, de hecho, construido por Michael Faraday (1791-1867) cuando realizó los experimentos en los que descubrió la inducción electromagnética. El aparato que usó fueron dos bobinas enrolladas una encima de la otra. Al variar la corriente que circulaba por una de ellas, cerrando o abriendo el interruptor, el flujo magnético a través de la otra bobina variaba y se inducía una corriente eléctrica en la segunda bobina. Pues bien, este dispositivo es precisamente un transformador. Pero, Faraday no puso mayor atención en este aparato, ya que, estaba interesado en otras cuestiones. En el transcurso de los años varios experimentadores trabajaron con diferentes versiones de transformadores.

Como se mencionó anteriormente, después de haber patentado una versión de un transformador, Gaulard y Gibbs inventaron un sistema de iluminación, en el cual, usaron corriente alterna y lámparas incandescentes, del tipo que inventó Edison. Demostraron su sistema en Inglaterra en 1883 y en Italia en 1884. Sin embargo, su transformador no era muy práctico.

Entre los visitantes a sus exposiciones estuvieron tres húngaros: Otto T. Bláthy, Max Déri y Karl Zipernowski. Ellos mejoraron el diseño del transformador y en mayo de 1885, en la Exposición Nacional Húngara en Budapest presentaron lo que resultó ser el prototipo del sistema de iluminación que se utiliza hasta hoy en día. Su sistema tenía 75 transformadores conectados en paralelo que alimentaban 1,067 lámparas incandescentes del tipo de Edison, todo esto alimentado por un generador de corriente alterna que proveía un voltaje de 1,350 V. Los transformadores que usaron los húngaros proveían voltajes bajos y eran muy eficientes, pero su construcción resultaba muy laboriosa, y por tanto, muy cara. Sin embargo, lograron su objetivo: operar un sistema de lámparas a bajo voltaje a partir de un sistema de distribución de corriente operado a alto voltaje. Fue Bláthy primero en usar la palabra "transformador".

Otra persona que también presencié la demostración de Gaulard y Gibbs en Italia fue el estadounidense George Westinghouse (1846-1914). Éste era un industrial que conocía el sistema construido por Edison en Nueva York, del cual no era partidario, ya que estaba consciente de sus desventajas. En 1884 Westinghouse contrató a un joven ingeniero eléctrico, William Stanley, quien tenía algunas ideas para utilizar el transformador. Hacia 1885, Stanley ya había diseñado varios tipos de transformadores superiores a los de los científicos húngaros. Con ayuda de otros ingenieros, Oliver B. Schallenberger y Albert Schmid, construyeron transformadores como el que se muestra en la **Figura 1**, con laminillas de hierro que evitaban las pérdidas de energía. En marzo de 1886, entró en operación una planta construida bajo la dirección de Stanley en el pueblo de Great Barrington, Massachusetts. Esta planta operó con corriente alterna, con un generador que produjo una tensión de 500 V y que alimentó un conjunto de lámparas a una distancia de alrededor de 2 km. Por medio de transformadores redujeron el voltaje a 100 volts, que es el valor que se requiere para hacer funcionar las lámparas. Para demostrar que se podía transmitir la electricidad a distancias mayores por medio de un transformador elevaron el voltaje a un valor de 3,000 volts, y luego lo redujeron a 100 volts. El resultado fue un gran éxito y de inmediato Westinghouse inició la manufactura y venta de equipos para distribuir electricidad por medio de corriente alterna. Al mismo tiempo, Schallenberger inventó un medidor de energía eléctrica consumida, para poder cobrarla en forma precisa. Todo esto, aunado al hecho de que el costo de la transmisión era relativamente barato, dio inicio a la utilización de la energía eléctrica por medio de corriente alterna, sistemas que aún utilizamos en la época actual.

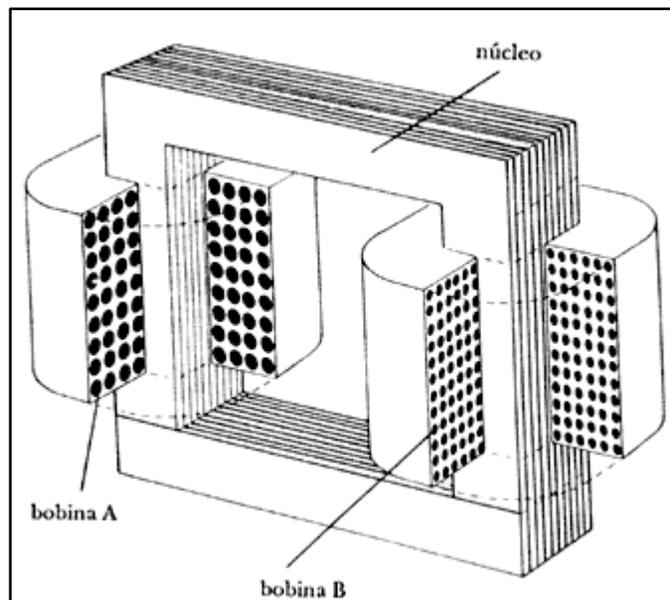


Figura 1. Esquema de un transformador.

Edison y sus asociados lidiaron contra el empleo de la corriente alterna, tanto en la prensa como en los tribunales. Sin embargo, su lucha estaba perdida. Muy pronto, la corriente continua cedió su lugar a la alterna, debido a su flexibilidad, conveniencia y bajo costo. Tres años después del éxito con su planta, Edison quedó desplazado.

En la década de 1890 el crecimiento de los sistemas de corriente alterna fue muy vertiginoso. En las cataratas del Niágara, EUA, se instalaron generadores inmensos que iniciaron su servicio en 1895 y alimentaron de electricidad a lugares bastante lejanos, algunos situados a centenares de kilómetros. De esta manera, muy pronto se establecieron sistemas de transmisión en muchos países, tendencia que continúa hasta la fecha.

En la **Figura 2** se presenta el esquema de un sistema de distribución de energía eléctrica que nace de una planta generadora y que va hasta una ciudad muy alejada. A la salida de la planta un transformador eleva el voltaje para iniciar la distribución. En la cercanía de la meta se inicia el descenso del voltaje por medio de transformadores que se encuentran en subestaciones, descenso que se va realizando de manera gradual para poder alimentar a usuarios con diferentes necesidades.

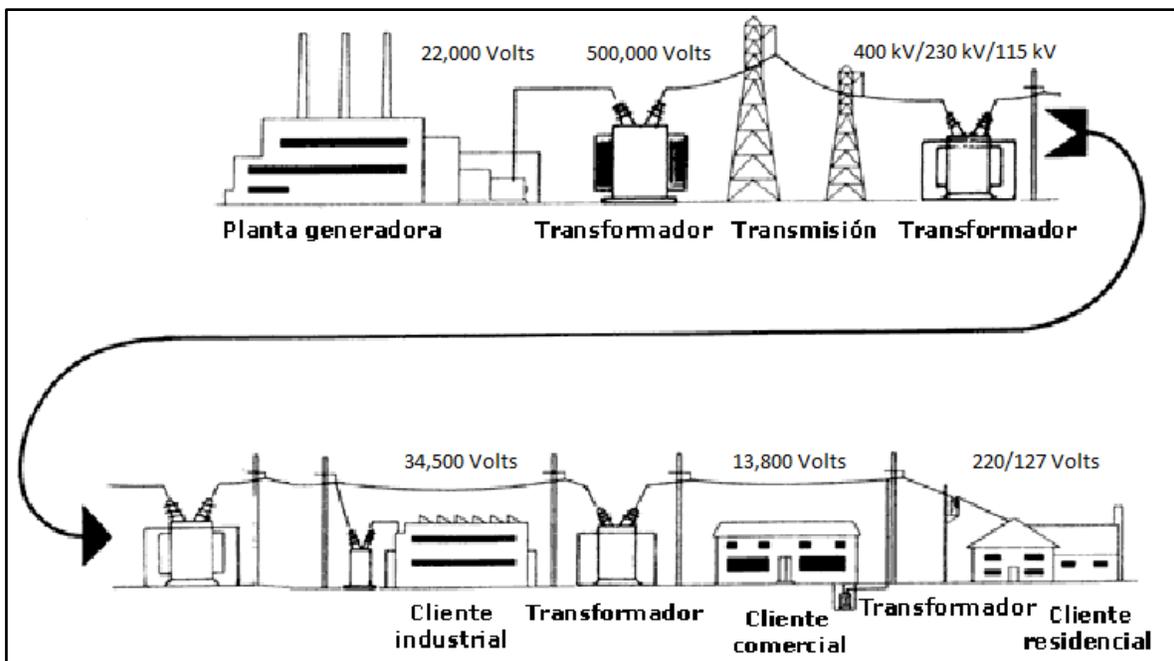


Figura 2. Esquema de un sistema de distribución de electricidad, desde la planta generadora hasta los diversos consumidores. Este sistema es posible gracias a los transformadores.

OBJETIVO GENERAL

Documentar el proceso de fabricación y las pruebas eléctricas de un transformador de distribución para su puesta en servicio, de tal forma, que toda persona interesada e involucrada en el área eléctrica pueda contar con esta guía.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar las normas referentes a la construcción de transformadores
- Describir el proceso de fabricación de un transformador.
- Documentar las pruebas eléctricas mínimas que deben realizarse a un transformador antes de la entrega.
- Describir el proceso de la puesta en servicio de un transformador de distribución

JUSTIFICACIÓN

El presente trabajo monográfico está enfocado al proceso de construcción de un transformador de potencia, partiendo de los elementos que lo constituyen, las pruebas que se le realizan para verificar que el transformador se encuentre en las mejores condiciones antes de su puesta en operación. La información recopilada es de gran ayuda para los estudiantes de Ingeniería en Sistemas de Energía para complementar los conocimientos adquiridos sobre el transformador.

INTRODUCCIÓN

La generación de energía eléctrica requerida por la población, la industria y servicio doméstico, se lleva a cabo mediante distintos tipos de centrales, dependiendo de la generación de que se trate, ya sea termoeléctrica, hidroeléctrica, geotérmica, nuclear, eólica, entre otras, para conducir la electricidad desde dichas plantas hasta los usuarios, los transformadores de potencia realizan un papel muy importante en las redes de transmisión y de distribución.

La energía eléctrica, resulta ser fundamental en nuestra vida cotidiana, y sin ella, nosotros no podemos visualizar un día de nuestras vidas. La mayoría de nuestros electrodomésticos trabajan mediante el empleo de la electricidad. En ocasiones, nuestros electrodomésticos pueden tener fallas o malos funcionamientos debido a problemas de alimentación. La solución a todos estos problemas puede establecerse sólo a través de un transformador.

Ahora bien, imagine por un momento un mundo sin transformadores eléctricos, no habrían sistemas de transmisión, y por consiguiente, no habría forma, desde el punto de vista económico y eficiente, de transportar la energía eléctrica a largas distancias.

Los transformadores son utilizados en una gran variedad de lugares, que van desde la industria más moderna y magna, hasta los hogares o el cargador de un celular utilizado a diario en casa, por lo cual, es de vital importancia contar con un sistema eléctrico confiable y seguro.

En la **Figura 2** se muestra el proceso requerido para satisfacer los requerimientos de energía eléctrica de la población, es evidente que se requiere de una organización y coordinación para proyectar el crecimiento de las plantas de generación que provean del flujo eléctrico necesario para satisfacer la demanda y brindar al usuario un servicio eléctrico de calidad de acuerdo a sus necesidades.

CAPITULO II

EL TRANSFORMADOR Y SUS APLICACIONES

2.1 Definición

Un transformador es un dispositivo que cambia la potencia eléctrica alterna con un nivel de voltaje a potencia eléctrica alterna con otro nivel de voltaje mediante la acción de un campo magnético. Consta de dos o más bobinas de alambre conductor enrolladas alrededor de un núcleo ferromagnético común. Estas bobinas (normalmente) no están conectadas en forma directa. La única conexión entre las bobinas es el flujo magnético común que se encuentra dentro del núcleo. [3]

Uno de los devanados del transformador se conecta a una fuente de energía eléctrica alterna y el segundo (y quizá el tercero) suministra energía eléctrica a las cargas. El devanado del transformador que se conecta a la fuente de potencia se llama devanado primario o devanado de entrada, y el devanado que se conecta a la carga se llama devanado secundario o devanado de salida. Si hay un tercer devanado en el transformador, se llama devanado terciario.

A los transformadores de potencia se les llama de diferentes maneras, dependiendo de su uso en los sistemas de potencia. Un transformador conectado a la salida de un generador y que se usa para aumentar su voltaje a niveles de transmisión (más de 110 kV) a veces se le llama transformador de unidad. Al transformador que se encuentra al final de la línea de transmisión, que baja el voltaje de niveles de transmisión a niveles de distribución (de 2.3 a 34.5 kV) se le llama transformador de subestación. Por último, al transformador que toma el voltaje de distribución y lo disminuye hasta el voltaje final al que se utiliza la potencia (110, 208, 220 V, etc.) se le llama transformador de distribución. Todos estos dispositivos son esencialmente iguales, la única diferencia entre ellos es el uso que se les da.

2.2 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

Como se observa en la **Figura 3**, al aplicarle un voltaje al devanado primario, las variaciones de magnitud y sentido de la corriente alterna crean un campo magnético variable dependiendo de la frecuencia de la corriente. Este campo magnético variable atravesará los conductores del devanado secundario, y de acuerdo a la ley de inducción de Faraday, un voltaje aparecerá en las terminales del devanado secundario.

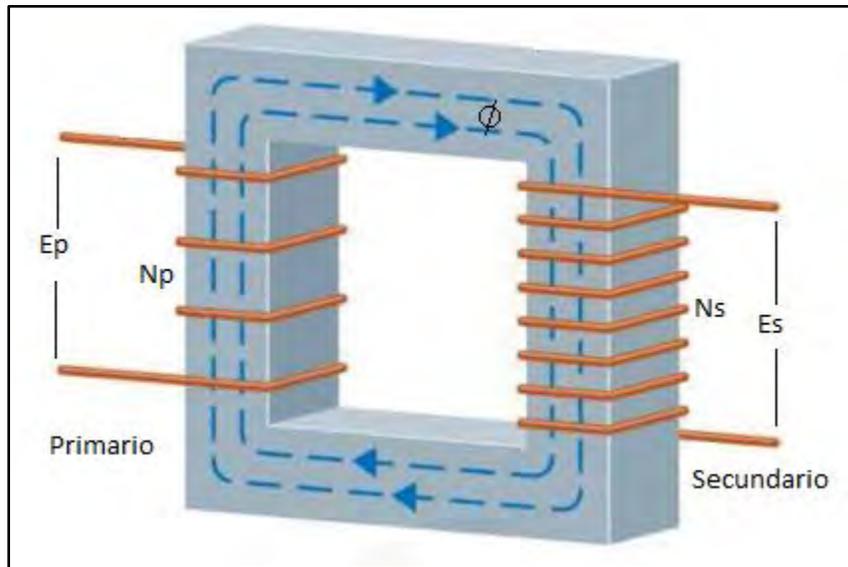


Figura 3. Representación esquemática de un transformador. [1]

2.3 RELACIÓN DE TRANSFORMACIÓN

La relación entre el voltaje primario (E_p), aplicado al devanado primario y el voltaje secundario (E_s), inducido en el devanado secundario, es directamente proporcional a la relación del número de espiras (vueltas) de los devanados primario (N_p) y secundario (N_s); a esta relación se le conoce como "relación de transformación" y está representada con la letra (a).

voltaje. Sin importar cuál sea el caso, la relación siempre se da en términos de voltaje en el primario, el cual puede aumentarse o reducirse en el devanado secundario.



2.4.1.2 TRANSFORMADORES DE POTENCIA

Aquellos transformadores con capacidades mayores a 500 kVA. [4]



Figura 5. Transformador de potencia.

2.4.2 POR EL NÚMERO DE FASES

De acuerdo a las características del sistema al cual se conectará, tenemos:

2.4.2.1 MONOFÁSICO

Son transformadores de potencia o distribución, que son conectados a una línea o fase y un neutro o tierra. Estos transformadores tienen un solo devanado de alta tensión y uno de baja tensión.

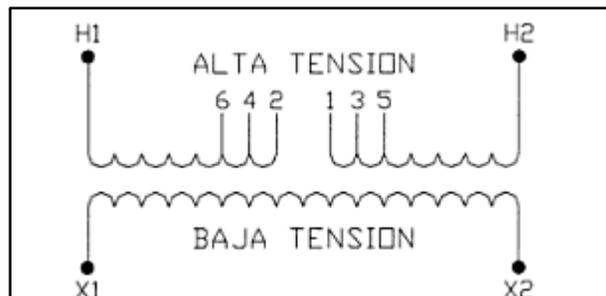


Figura 6. Esquema eléctrico, transformador monofásico.

2.4.2.2 TRIFÁSICO

Transformadores de potencia o distribución, que son conectados a tres líneas o fases y pueden estar o no conectados a un neutro común o tierra. Estos transformadores tienen tres devanados de alta tensión y tres de baja tensión.

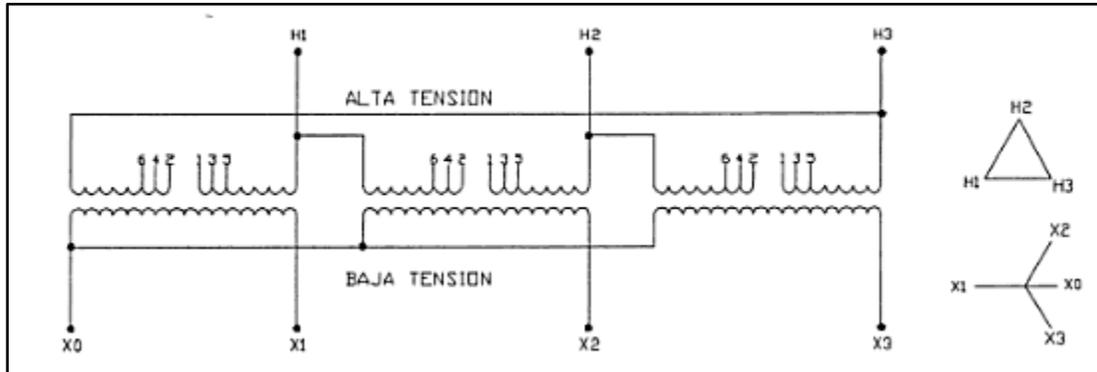


Figura 7. Esquema eléctrico, transformador trifásico.

2.4.3 POR SU UTILIZACIÓN

De acuerdo a la posición que ocupan dentro de sistema:

2.4.3.1 TRANSFORMADOR PARA GENERADOR

Son transformadores de potencia que van conectados a la salida del generador. Son aquellos que proporcionan la energía a la línea de transmisión.

2.4.3.2 TRANSFORMADOR DE SUBESTACIÓN

Son aquellos transformadores de potencia que van conectados al final de la línea de transmisión para reducir la tensión a nivel de subtransmisión.

2.4.3.3 TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN

Son transformadores que reducen la tensión de subtransmisión a niveles de consumo.

2.4.3.4 TRANSFORMADORES ESPECIALES

Son transformadores de potencia que son utilizados como por ejemplo, para: reguladores de tensión, transformadores para rectificadores, transformadores para horno de arco eléctrico, transformadores defasadores, autotransformadores para mina, transformadores para prueba, transformadores para fuentes de corriente directa.

2.4.3.5 TRANSFORMADORES DE INSTRUMENTOS

Son transformadores de potencial y de corriente. Estos transformadores son utilizados para la medición, en la protección y en el control.

2.4.4 POR LA CONSTRUCCIÓN O FORMA DEL NÚCLEO

Generalmente se conocen los siguientes tipos, por la posición que existe entre la colocación de las bobinas y el núcleo.

2.4.4.1 NÚCLEO ACORAZADO

También llamado tipo “shell”. Es aquel en el cual el núcleo se encuentra cubriendo los devanados de baja y alta tensión.



Figura 8. Núcleo tipo acorazado.

2.4.4.2 NÚCLEO NO ACORAZADO

También conocido como “tipo columnas” o “core”, y es aquel en el cual las bobinas abarcan una parte considerable del circuito magnético.



Figura 9. Núcleo no acorazado o tipo columnas (trifásico).

2.4.5 POR LAS CONDICIONES DE SERVICIO

2.4.5.1 PARA USO INTERIOR

Un transformador para uso interior tiene como características una tensión bifásica y los terminales aislados de tierra a su plena tensión de aislamiento. Es de tipo seco aislado en bloque de resina. Se los utiliza para medida y protección hasta con dos devanados secundarios.

2.4.5.2 PARA USO A LA INTEMPERIE

Un transformador para uso a la intemperie está diseñado para soportar condiciones como por ejemplo: temperatura ambiente del aire, humedad, suciedad, etc.

2.4.6 EN FUNCIÓN DE LOS LUGARES DE INSTALACIÓN

2.4.6.1 TIPO POSTE

MONOFÁSICO

Estos aparatos son aplicados a sistemas de distribución aéreos, tales como:

- Fraccionamientos residenciales.
- Urbanizaciones.
- Zonas rurales. [8]



Figura 10. Transformador tipo poste monofásico.

TRIFÁSICO

Estos aparatos son aplicados a sistemas de distribución aéreos tales como:

- Zonas urbanas.
- Fraccionamientos residenciales.
- Pequeñas industrias y comercios.
- Pozos de bombeo.
- Centros recreativos.
- Zonas rurales. [8]



Figura 11. Transformador tipo poste trifásico.

2.4.6.2 TIPO SUBESTACIÓN

Este tipo de transformador está diseñado para trabajar bajo techo o a la intemperie. Es aplicable en sistemas de distribución tanto en subestaciones interiores como exteriores en centros comerciales, edificios de oficinas, fábricas, bodegas, equipos de bombeo, hoteles, etc. Permiten ser instalados cerca de los centros de consumo, reduciendo al mínimo la pérdida de potencia y los costos de instalación. [8]

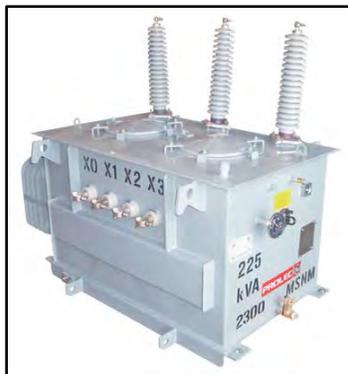


Figura 12. Transformador tipo poste trifásico.

2.4.6.3 TIPO PEDESTAL MONOFÁSICO

Estos aparatos tienen aplicación en la optimización de la confiabilidad, seguridad y la estética en:

- Fraccionamientos residenciales.
- Desarrollos turísticos.
- Centros comerciales.
- Centros recreativos.
- Hoteles. [8]



Figura 13. Transformador tipo pedestal monofásico.

TRIFÁSICO

El pedestal trifásico está diseñado para operar a la intemperie y estar montado sobre una base típicamente de concreto. Tiene integrado un gabinete a prueba de vandalismo, el cual contiene los accesorios y las terminales de conexión. [8]

Los transformadores del tipo pedestal trifásico se utilizan en lugares donde la seguridad y apariencia son un factor decisivo, tales como:

- Desarrollos comerciales.
- Desarrollos turísticos.
- Edificios de oficinas y/o residenciales.
- Hoteles.
- Hospitales.
- Parques eólicos.
- Pequeña y mediana industria bajo el concepto de subestaciones compactas.
- Universidades.



Figura 14. Transformador tipo pedestal trifásico.

2.4.6.4 TIPO SUMERGIBLE

Los transformadores tipo sumergible, están destinados a ser instalados en cámara o bóveda bajo el nivel del suelo, donde existe la posibilidad de inmersión ocasional con agua. Podrán permanecer sumergidos durante 12 horas en un volumen de agua de 3 metros sobre el transformador sin que ocurran filtraciones.

MONOFÁSICO

Estos aparatos tienen aplicación en la optimización del espacio y la estética en:

- Zonas habitacionales.
- Centros recreativos.
- Pequeños comercios. [8]



Figura 15. Transformador sumergible monofásico.

TRIFÁSICO

Estos aparatos tienen aplicación en la optimización del espacio y la estética en:

- Zonas habitacionales.
- Centros recreativos.
- Pequeños comercios.
- Centros históricos.
- Espacios culturales y recreativos. [8]



Figura 16. Transformador sumergible trifásico.

2.4.7 DE ACUERDO AL TIPO DE ENFRIAMIENTO

Existen transformadores sumergidos en aceite y de tipo seco. Entre los sumergidos en aceite tenemos:

2.4.7.1 TIPO OA

Transformador sumergido en aceite y con enfriamiento natural. Es el enfriamiento más común y con resultados más económicos. En este tipo de unidades el aceite aislante circula por convección natural dentro de un tanque con paredes llanas o corrugadas, o bien provistos de enfriadores tubulares.

2.4.7.2 TIPO OA/FA

Transformador sumergido en aceite con enfriamiento a base de aire forzado. Básicamente es una unidad OA, a la cual se le han aumentado ventiladores, para una mayor disipación de calor; y por ende, aumentar los kVA a la salida del transformador.

2.4.7.3 TIPO OA/FA/FOA

Transformador sumergido en aceite con enfriamiento propio, con enfriamiento a base de aire forzado y a base de aire forzado.

2.4.7.4 TIPO FOA

Transformador sumergido en aceite con enfriamiento con aceite forzado con enfriadores de aire forzado. El aceite de estas unidades es enfriado cuando éste pasa por los cambiadores de calor de aire y aceite, ubicados afuera del tanque.

2.4.7.5 TIPO OW

Transformador sumergido en aceite con enfriamiento por agua. Este tipo de unidades está diseñado con un cambiador de calor tubular, ubicado fuera del tanque.

2.4.7.6 TIPO FOW

Transformador sumergido en aceite, con enfriamiento de aire forzado con enfriadores de agua forzada. El enfriamiento del aceite se hace por medio de agua sin tener ventiladores.

Dentro de los tipos secos tenemos:

2.4.7.7 TIPO AA

Transformadores tipo seco con enfriamiento propio. La característica es que no posee ningún líquido aislante para las funciones de aislamiento y de enfriamiento. El aire es el que cumple éstas funciones.

2.4.7.8 TIPO AFA

Transformador tipo seco con enfriamiento por aire forzado. Este tipo de unidades está diseñado con un ventilador que empuja el aire por un ducto colocado en la parte interior de la unidad.

2.4.7.9 TIPO AA/FA

Transformador tipo seco con enfriamiento propio y con enfriamiento por aire forzado. Posee dos regímenes de operación, uno por enfriamiento natural y el otro con el enfriamiento forzado (ventiladores), dichos regímenes son controlados de forma automática por medio de un relé térmico.

2.5 PARTES CONSTITUTIVAS

Las partes que componen un transformador se dividen en cuatro grandes grupos, los cuales son:

- Circuito magnético.
- Circuito eléctrico.
- Sistema de aislamiento.
- Tanque y accesorios.

2.5.1 CIRCUITO MAGNÉTICO

Al circuito magnético se lo conoce también como el núcleo. El núcleo está formado por láminas de acero con cierto porcentaje de silicio, con un espesor que varía de 0.3 a 0.5 mm.

La finalidad de esta parte del transformador es la de limitar y direccionar el flujo magnético durante el proceso de transformación de la energía eléctrica.

2.5.2 CIRCUITO ELÉCTRICO

El circuito eléctrico está compuesto por los devanados del transformador. Dichos devanados se fabrican en diferentes tipos, dependiendo de las necesidades del diseño. Los materiales más utilizados son el cobre y el aluminio.

Las ventajas de devanados de cobre son:

- Resistencia mecánica.
- Tiene una buena conductividad eléctrica.

Las ventajas del devanado de aluminio son:

- Estabilidad del costo por suministro.
- Mayor eficiencia para disipar el calor.
- Considerable reducción del peso.

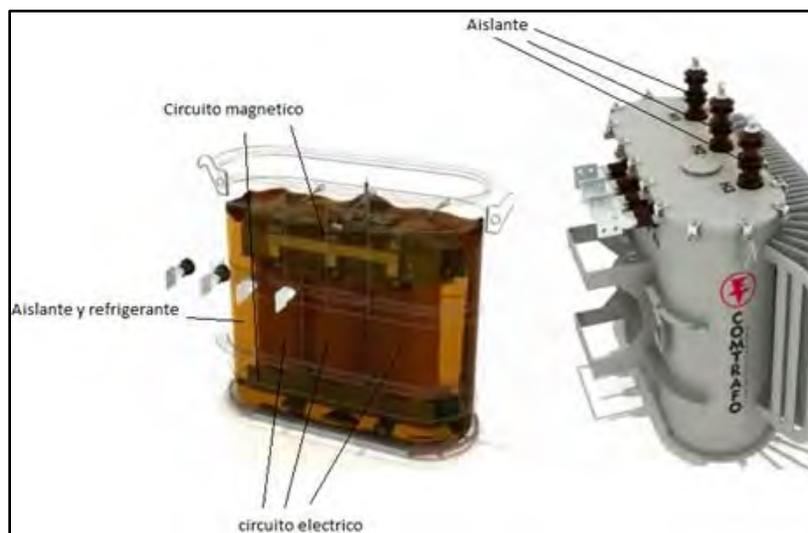


Figura 17. En la imagen se pueden observar los circuitos magnético y eléctrico de un transformador de distribución.

2.5.3 SISTEMA DE AISLAMIENTO

La finalidad de estos componentes del transformador eléctrico es la de limitar el campo eléctrico y evitar cualquier fuga de energía eléctrica que pueda afectar su

funcionamiento o al usuario. Los materiales más empleados para los sistemas de aislamientos son: aceites, resinas, maderas, papel, cartón, barnices, tela y micra, por mencionar algunos.

Entre los materiales empleados para el sistema de aislamiento se tiene:

- Cartón prensado (pressboard).
- Papel kraft.
- Papel manila y/o corrugado.
- Cartón prensado de alta densidad.
- Collares de catón prensado y aislamientos finales.
- Partes de catón prensado laminados.
- Esmaltes y barnices.
- Recubrimientos orgánicos e inorgánicos para la laminación del núcleo.
- Porcelanas (boquillas).
- Recubrimientos de polvo epóxico.
- Madera de maple.
- Fibra vulcanizada.
- Algodón (hilos, cintas).
- Plásticos y cementos, telas y cintas adhesivas, cintas de fibra de vidrio.
- Fluido líquido dieléctrico, que puede ser aceite mineral, aceite de siliconas o r-temp.

El último material es el sistema aislante líquido que baña las bobinas, el núcleo y los materiales aislantes sólidos. Este fluido sirve para tres propósitos primordiales:

- Provee una rigidez dieléctrica.
- Proporciona un enfriamiento eficiente.
- Protege al demás sistema aislante.

El fluido puede ser aceite mineral para transformador, silicona o r-temp, y de estos tres, el aceite mineral es el más empleado.

2.5.4 TANQUE Y ACCESORIOS

Los transformadores deben de estar contruidos con un tanque hermético, con objeto de preservar el líquido refrigerante y aislante (generalmente aceite dieléctrico) donde se sumerge el conjunto núcleo-bobinas. Este, contiene tanto a los elementos internos como externos, en este recae todo el peso del transformador, además de disipar el calor producido durante la operación del transformador. Está diseñado para soportar un vacío absoluto y una presión absoluta de 1 kg/cm².

2.5.4.1 ACCESORIOS

Los accesorios de un transformador son el conjunto de partes y dispositivos que auxilian en la operación y facilitan las labores de mantenimiento. Algunos de estos son:

BOQUILLAS

Son aisladores terminales de las bobinas de alta y baja tensión que se utilizan para atravesar el tanque o la tapa del transformador. Además, de ser los elementos que permiten el paso de la corriente a través del transformador, proporcionando un nivel de aislamiento adecuado sin ocasionar fugas indebidas.

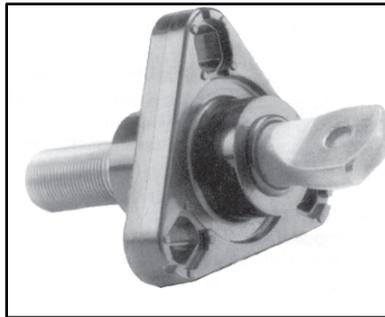


Figura 18. Boquilla aislante en resina epóxica.

RADIADORES

Es parte del sistema de enfriamiento, a través de sus serpentines, pasa el aceite caliente para ser enfriado ya sea por ventilación natural o aire forzado.

MEDIO REFRIGERANTE

Debe ser un buen conductor de calor para su disipación hacia el medio ambiente, además de tener propiedades dieléctricas. El más empleado es el aceite mineral, sin embargo, existen otros en el mercado, los cuales, pueden reemplazar a este último; entre ellos está el aceite silicónico, el r-temp y el MEDEL 7131.

CAMBIADOR DE DERIVACIONES

Regulan la tensión del transformador; debido a las variaciones de tensión que pueden haber en la red de distribución, el transformador se provee de un cambiador de derivaciones, de tal forma, que pueda aumentar o disminuir el número de espiras y en consecuencia, la relación de transformación dentro de los límites establecidos que son del 5% de la capacidad del transformador.

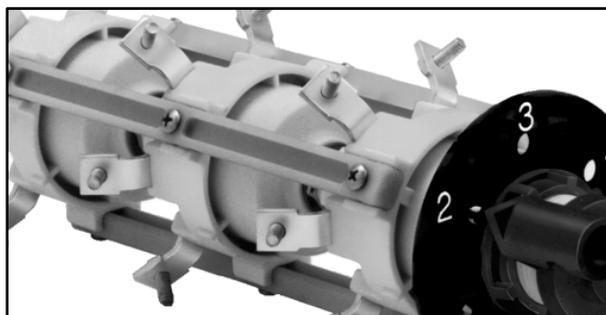


Figura 19. Imagen de un cambiador de derivaciones.

INDICADOR DE NIVEL

Es un dispositivo de alarma y sirve para indicarnos que el nivel de aceite del tanque principal se encuentra normal. También se cuenta con un indicador de temperatura y uno de presión.



Figura 20. Indicador de nivel de líquido aislante.

PLACA O TORNILLO DE TIERRA

Es un medio de conexión a tierra física que permite drenar las corrientes de falla en aislamientos o por efecto electrostático en los aislamientos o tanque y garantizar la seguridad de operación y la del usuario.

PLACA DE DATOS

Es la parte del transformador donde se pueden consultar sus especificaciones de fabricación, operación y características de conexión. La placa característica deberá de ser metálica e inoxidable. Debe de contener la siguiente información:

- Nombre del fabricante.
- Número de serie.
- Año de fabricación.
- Número de fases.
- Frecuencia.
- Capacidad (kVA).
- Voltaje nominal primario (V).

- Voltaje nominal secundario (V).
- Voltaje nominal en cada derivación (V).
- Nivel básico de aislamiento-BIL (kV).
- Aumento promedio de temperatura en devanados (

CHE TRANSFORMADORES ELECTRICOS
I.M.P.I. 1181523

SUMERGIDO EN ACEITE MINERAL

TRANSFORMADOR TRIFASICO

KVA 60 HERTZ IMPEDANCIA EN (%)
13200-220Y/127 VOLTS A 85 °C 65 %

SERIE SOBRE-ELEVACION 65 °C
INSTRUCTIVO 10135 AMBIENTE MAXIMO 40 °C
CLASE 15 KV TIPO DA A 2000 (m/N.M.)
NIVEL BASICO DE IMPULSO: A.T. 110 KV B.T. 45 KV

DIAGRAMA DE CONEXIONES

DIAGRAMA VECTORIAL

	POS. DERECH.	VOLTS	AMPS
ALTA	1-4	13860	31.2
	2-5	13530	32.0
TENSION	1-4	13200	32.8
	2-5	12870	33.6
	1-7	12540	34.5

NOTA
NUNCA DEBE EL CABLE
RANCHO DE DERECHA
CONECTAR EN ANTES DE
RIFICAR QUE EL
TRANSFORMADOR
ESTE DESENERGIADO

SALA TENSION 220 1968

TRANSFORMADOR 1262 Kg TANQUE Y ACCS 776 Kg
LUBRICANTE 552 Kg 637 Lit. PESO TOTAL 2590 Kg
ACEITE PEMEX No. 1 FABRICADO EN



RECOLECTOR DE ACEITE PARA MONTAJE EN PORTA FUSIBLE

El recolector de aceite o bandeja de goteo, está diseñada para su aplicación en la pared lateral del transformador tipo pedestal con bayoneta, para que al sacar las bayonetas porta fusibles se evite que al transformador se le escurra el aceite dieléctrico y gotee sobre las terminales primarias.



Figura 23. Recolector de aceite o bandeja de goteo.

FUSIBLES DE EXPULSIÓN TIPO BAYONETA

Están diseñados para usarse con una sola fase y tres fases para transformadores tipo pedestal; van sumergidos en el líquido aislante, y está diseñado para proteger el sistema de distribución en el caso de un fallo interno, fallo secundario o sobrecarga severa. Se debe utilizar en serie con un fusible limitador de corriente o el aislamiento.



Figura 24. Fusible de expulsión tipo bayoneta.

2.6 APLICACIONES

Tanto en materia de electricidad industrial y comercial como en radiotelefonía, telefonía, televisión y electrónica en general, el transformador tiene un amplio campo de aplicación. Puede decirse que es un elemento indispensable, especialmente en todo lo referente a corrientes alternas de baja y alta frecuencia. [4]

Un caso significativo, es el de los sistemas eléctricos de potencia, en los que hace posible que la generación, el transporte y el consumo de la energía eléctrica se realicen en tensiones rentables en cada caso. El transporte resulta más económico cuanto más alta sea la tensión, ya que la corriente y la sección de los conductores son menores (intensidades pequeñas provocan menores pérdidas por efecto Joule).

Existen dos aplicaciones básicas para la utilización de los transformadores de distribución de energía eléctrica:

2.6.1 TRANSPORTE DE ENERGÍA ELÉCTRICA

Gracias a su capacidad de transportar los parámetros de tensión e intensidad, con la consiguiente reducción de las pérdidas por efecto Joule, se emplean dos transformadores, uno al principio de la línea para elevar la tensión (transformador elevador) y uno al final de la línea para la reducir la tensión (transformador reductor).

2.6.2 INTERCONEXIÓN DE LÍNEAS ELÉCTRICAS A DIFERENTES TENSIONES

Por su capacidad de transformar los niveles de tensión, los transformadores son ideales para interconectar líneas a diferente nivel de tensión, dando para todas ellas una salida común.

A continuación, la **Figura 25**, presenta la estructura de un sistema eléctrico de potencia, en el cual, se aprecian tanto el transporte de energía eléctrica, como la interconexión de líneas eléctricas a diferentes tensiones mediante los transformadores.

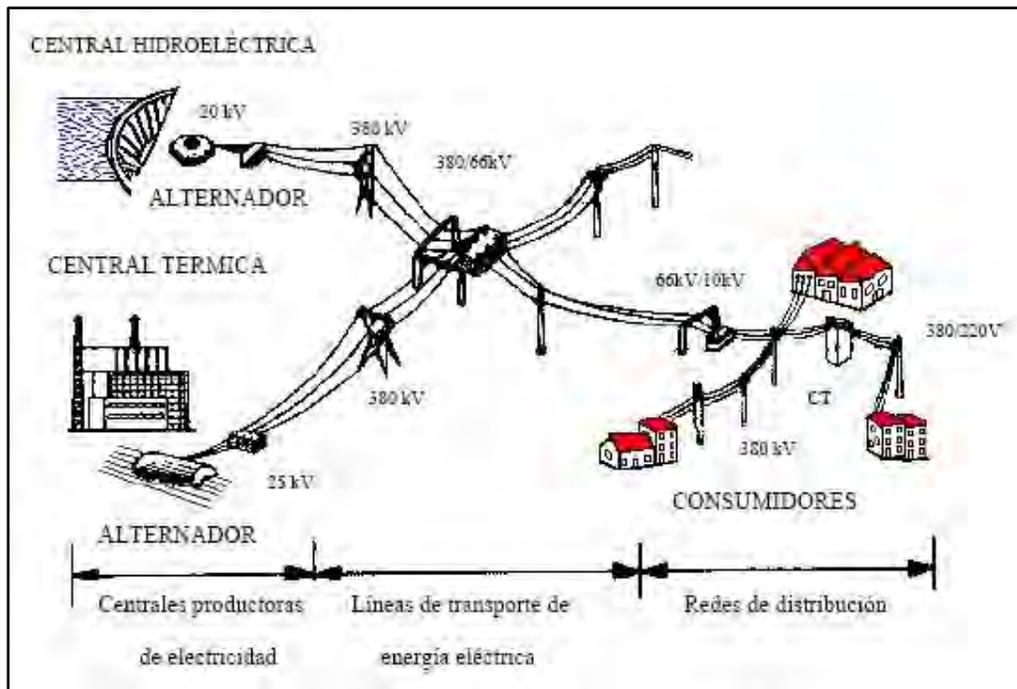


Figura 25. Estructura de un sistema eléctrico de potencia, que nace desde las centrales o plantas generadoras hasta los diversos consumidores.

2.6.3 OTRAS APLICACIONES

Los transformadores, también son muy empleados en la soldadura eléctrica y hornos eléctricos, empleándose unidades reductoras de tensión con pocas espiras en el devanado primario y un devanado secundario constituido por un solo conductor de cobre de gran sección.

En materia de transformadores de audiofrecuencia, o sea, transformadores utilizados para la reproducción del sonido, la ingeniería electrónica cubre un amplio campo. El cálculo y diseño de transformadores de audio origina mayor cantidad de problemas que los que podrían presentarse en transformadores destinados al transporte y transformación de energía. En estos últimos, la frecuencia de trabajo es generalmente de 50 ó 60 Hz (ciclos/segundo). En audio, en cambio, las frecuencias de uso van desde un mínimo de 35 hasta 12,000 Hz (ciclos/segundo) y a veces más, por otra parte, se trabajan con señales con formas de onda más complejas y variadas.

En cuanto a los transformadores empleados en etapas de radiofrecuencia y frecuencia intermedia en receptores superheterodinos, transformadores de videofrecuencia en receptores de televisión; entre otros, su construcción resulta aún más delicada interviniendo en los cálculos problemas referentes a ancho de banda, elevada frecuencia de trabajo (entre los 450 kHz y 40 a 250 MHz), alta inductancia en relación al número de espiras y baja resistencia óhmica y otros factores derivados del estudio de los circuitos resonantes.

2.7 NORMAS APLICABLES A LA FABRICACIÓN DE UN TRANSFORMADOR

Los transformadores manufacturados por los fabricantes, son diseñados, fabricados y probados para cumplir con las siguientes normas y especificaciones en su última versión. [7]

NOM (Norma Oficial Mexicana y NMX (Norma Mexicana):

- NOM-002-SEDE-1999 *Requisitos de seguridad y eficiencia energética para transformadores de distribución.*
- NOM-008-SCFI *Sistema general de unidades.*
- NOM-024-SCFI *Información comercial para empaques, instructivos y garantía de los productos electrónicos, eléctricos y electrodomésticos.*
- NMX-J-116-ANCE *Productos eléctricos. Transformadores - Transformadores de distribución tipo poste y tipo subestación. Especificaciones.*
- NMX-J-169-ANCE *Productos eléctricos. Transformadores y autotransformadores de distribución y potencial. Métodos de prueba.*
- NOM-J-284 *Transformadores de potencia.*
- NMX-J-285-ANCE-1996 *Productos eléctricos. Transformadores de distribución tipo pedestal, monofásicos y trifásicos para distribución subterránea. Especificaciones.*
- NMX-J-287-ANCE-1996 *Productos eléctricos. Transformadores de distribución tipo sumergible, monofásicos y trifásicos para distribución subterránea. Especificaciones.*
- NOM-J-271 *Técnicas de prueba en alta tensión.*
- NMX-J-123/I-ANCE-1999(IEC-296) *Productos eléctricos. Transformadores-aceites minerales aislantes para transformador - parte 1: especificaciones.*
- NOM-J-153 *Clasificación de materiales aislantes.*

CFE K-0000 (Especificaciones de Comisión Federal de Electricidad):

- K-0000-01 *Transformadores de distribución tipo poste.*
- K-0000-02 *Inspección por muestreo de transformadores de distribución.*
- K-0000-03 *Criterios de evaluación de pérdidas para consumo y penalizaciones.*
- K-0000-09 *Transformadores de potencia de 10 MVA y menores.*
- K-0000-06 *Transformadores de potencia de 10 MVA y mayores.*
- K-000-10 *Reparación de transformadores de potencia.*

CAPITULO III

PROCESO DE FABRICACIÓN DE UN TRANSFORMADOR

En los capítulos anteriores se describieron los conceptos teóricos del funcionamiento de los transformadores y la metodología del cálculo para el diseño analítico de los mismos. En este capítulo, se describe en forma literal y gráfica las diversas etapas de fabricación de los principales elementos constructivos de un transformador.

3.1 CONSTRUCCIÓN DEL TANQUE Y PROCESO DE SOLDADURA

3.1.1 CONSTRUCCIÓN DEL TANQUE

El tanque del transformador debe construirse para soportar, totalmente ensamblado, una presión interna de 50 kPa durante 3 horas, sin presentar una deformación final mayor del 2 %.

La deformación inicial del tanque del transformador es inherente al material y a la manufactura y no debe exceder del 1,0 %.

La deformación final es aquella que se presenta después de la liberación de la presión indicada anteriormente.



Figura 26. Imagen del interior de un tanque o cuba.

3.1.2 SOLDADURA DEL TANQUE

La soldadura aplicada para el armado de los tanques de lámina de acero al carbón de 1/4 de espesor, se emplea la soldadura 70/18 y de 1/8 para las uniones.

La soldadura aplicada para el sellado del tanque por la parte interior inferior es la soldadura 60/13 y de 1/8 para el sellado de las juntas entre lámina y lámina.



Figura 27. Proceso de soldadura de un transformador.



Figura 28. Soldadura del soporte del transformador.

3.2 DISEÑO DEL NÚCLEO

Debe de ser de cobre y/o aluminio. El aislamiento debe ser compatible con el líquido aislante del transformador, su clase térmica debe ser como mínimo 105 °C. El diseño específico depende del fabricante y de las necesidades del cliente.

3.3 VOLUMEN DEL ACEITE DIELECTRICO

De acuerdo al tamaño de la bobina, se diseña el tanque, tomando en cuenta una separación de por lo menos 10 cm por cada lado y tomando en cuenta las conexiones del cambiador de derivaciones y el seccionador se deja un espacio por la parte de arriba de 60 cm, por lo que de acuerdo a las características de la bobina es el tamaño del tanque y de ahí se saca el volumen, y por consiguiente, la cantidad de litros de aceite, tomando en cuenta un factor de 85 % de llenado.

El líquido aislante debe cumplir con lo siguiente:

No tóxico, contenido de bifenilos policlorados (BPC): menor de 2 mg/kg, lo cual se considera como libre de este contaminante.

Si el líquido aislante es aceite, debe cumplir con los requisitos indicados en la norma NMX-J-123-ANCE. Para otros líquidos aislantes, deben acordarse entre fabricante y consumidor las características y métodos de prueba de los mismos.

3.4 ACCESORIOS, CONECTORES, ETC.

3.4.1 BOQUILLAS Y CONECTADORES

Los transformadores deben equiparse con boquillas, cuyo nivel de aislamiento no sea menor que el correspondiente a la terminal del devanado.

Todos los barrenos de las boquillas que se localizan en la tapa del tanque deben contar con un realce para evitar estancamiento de líquidos entre sus uniones.

Las características eléctricas de las boquillas deben estar de acuerdo con la norma NMX-J-234-ANCE.

El color de las boquillas en media y baja tensión pueden ser café o gris, no permitiéndose la combinación de colores en un transformador.

3.4.2 REGISTRO DE MANO

El registro o registros de mano deben localizarse en la tapa, en una zona donde se pueda tener acceso para maniobrar el cambiador de derivaciones de operación interna y/o el tablero de reconexión.

Todos los registros de mano deben contar con un realce, para evitar estancamiento de líquidos entre sus uniones. Los transformadores tipo poste, pueden no contar con registro de mano si el transformador está provisto con cambiador de derivaciones de operación externa.

3.4.3 JUNTAS (EMPAQUES)

Las juntas o empaques deben ser de un material polimérico que cumpla con las características indicadas en la **Tabla 1**, compatible con el líquido aislante, de acuerdo con el método y los límites indicados en el Apéndice A.

Tabla 1. Características de los empaques

Concepto	Valor	Método de prueba recomendado
Dureza shore A	60 a 65	NMX - T - 024 - SCFI
Resistencia a la tensión mínima	10 MPA	Apéndice D
Elongación última mínima	500%	Apéndice D
Compresión permanente a 22 h 70	20%	Apéndice D
Cambio de volumen máximo después de envejecido 70 h a 100	5%	Apéndice D
Color	Negro	

3.4.4 ADITAMENTOS PARA PALANQUEO

Deben proporcionarse refuerzos de palanqueo apropiados a la masa del transformador. Dichos refuerzos deben soldarse en la base del tanque o en las paredes laterales del mismo, de tal manera que tengan un claro vertical con respecto al piso de 40 mm como mínimo y 60 mm como máximo.

3.4.5 ADITAMENTOS PARA DESLIZAMIENTO

La base del transformador debe construirse de manera que permita deslizarlo en dos direcciones: paralelo y en ángulo recto a la línea del centro de las boquillas de media tensión.

3.4.6 RADIADORES

Cuando los transformadores requieran radiadores deben colocarse en los segmentos indicados en la **Tabla 2**, a menos que el usuario especifique otra cosa. En el caso de boquillas colocadas en la pared del tanque, la entrada superior de líquido a los radiadores, debe encontrarse en un nivel inferior al orificio del tanque que alojan las boquillas. Se excluye esta condición cuando las boquillas se encuentren dentro de ductos o gargantas.

Los radiadores tubulares con soldadura interna al cabezal, deben tener una soldadura en la parte exterior para que elimine las cavidades que puedan acumular agua.

Tabla 2. Colocación de radiadores

Transformadores	Capacidad
Monofásicos	5 KVA a 167 KVA
Monofásicos	250 KVA a 500 KVA
Trifásicos	15 KVA a 75 KVA
Trifásicos	112.5 KVA a 500 KVA

3.5 PINTURA Y ROTULADO

3.5.1 RECUBRIMIENTO ANTICORROSIVO DEL TRANSFORMADOR

El tanque del transformador debe tener un recubrimiento que lo proteja contra la corrosión, el cual a su vez, debe cumplir con los valores indicados en el Apéndice B, a menos que el usuario especifique otra cosa.

Las superficies internas y externas del tanque, antes de recubrirse deben someterse a un proceso de preparación de la superficie. Para las superficies internas del tanque debe aplicarse también un recubrimiento de color claro, a menos que el usuario especifique otra cosa y que no contamine al líquido aislante.

Los soportes del conjunto núcleo-bobina, deben de estar libres de oxidación y no necesariamente deben llevar recubrimiento.

No deben utilizarse recubrimientos que contengan cromatos o minio.

Deberá llevar al frente del transformador la capacidad en kVA, así como un letrero o calcomanía indicando “Peligro Alta Tensión”.



Figura 29. Pintura y rotulación de un transformador.

CAPITULO IV

4.1 PRUEBAS Y ENSAYOS A TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN

Un transformador de distribución, es sometido a pruebas y ensayos para verificar que ha sido adecuadamente diseñado y construido a fin de soportar la carga solicitada, y que, al mismo tiempo, resista todas las situaciones peligrosas a las que esté expuesto en operación durante un período de veinte años o más. (Pérez, 2001)

Las pruebas se hacen en los transformadores y sus componentes por distintas razones: durante su fabricación, para verificar las condiciones de diseño; durante la entrega, para verificar el estado de sus componentes; y durante su operación, como parte del mantenimiento preventivo y la reparación.

A los transformadores se les práctica una serie de pruebas que inicia desde una inspección visual, hasta las pruebas de mantenimiento.

4.1.1 INSPECCIÓN VISUAL

Cuando se adquiere un transformador de distribución por primera vez, se desea conocer sus características, que pruebas de rutina aplicarles y la forma de llevar a cabo el mantenimiento; pero antes de aplicar lo anterior, primero se debe hacer una inspección visual.

Con dicha inspección, puede concluirse muchas cosas, sin embargo, ello depende en gran parte de la experiencia del inspector.

Una lista de observaciones a realizar es la siguiente:

- Identificación visual de las bobinas de alto y bajo voltaje.
- Contactos de las conexiones.
- Posibles contactos de salidas flojas o no aisladas al núcleo o los herrajes.
- Aislamientos quemados o demasiado deteriorados (ver **Figura 30**).

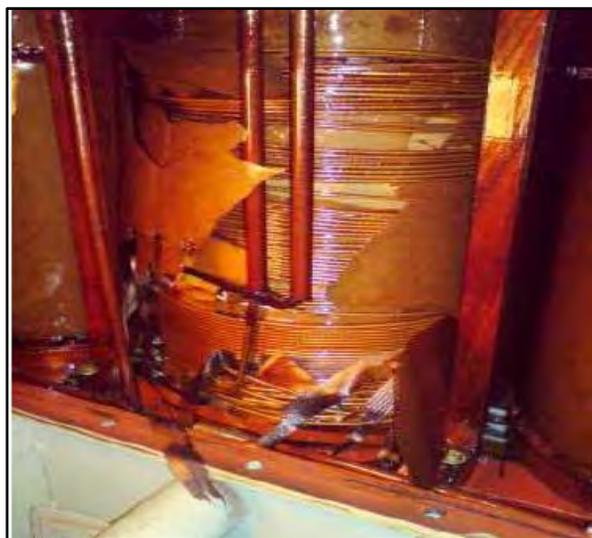


Figura 30. Aislamientos quemados o deteriorados.

Mediante la observación visual anterior se busca identificar, entre otras cosas, si existe algún peligro de energizar el transformador.

Paralelo con la observación visual, se pueden hacer algunas mediciones de resistencias que ayuden a corroborar o complementar las conclusiones de la observación visual.

Luego de la inspección visual, las demás pruebas se las realiza por lo general siguiendo un orden cronológico, y son las siguientes:

4.2 PRUEBAS EN FÁBRICA O LABORATORIO

Constan de pruebas eléctricas, y para la realización de estas, se debe de contar con el equipo y accesorios adecuados y no reemplazarlos por otros. Nunca se debe de realizar las pruebas eléctricas cuando el transformador a probar se encuentre energizado. El hacerlo puede causar lesiones graves, daños a la propiedad e inclusive la muerte.

Estas pruebas pueden se dividen en:

- Pruebas que determinan la calidad de su fabricación.
- Pruebas que determinan la calidad del servicio.

4.2.1 PRUEBAS QUE DETERMINAN LA CALIDAD DE SU FABRICACIÓN

Esta prueba verifica la calidad con que el transformador fue diseñado, además permite conocer las condiciones en que se encuentra el transformador en condiciones normales de operación y en condiciones anormales provocadas por sobrevoltajes de tipo atmosférico.

A continuación se detalla las pruebas que pertenecen a este primer grupo.

4.2.1.1 RESISTENCIA DE AISLAMIENTO

Esta prueba se realiza en fábrica, después de que el transformador ha terminado su proceso de secado de la aislación, y se encuentra en una temperatura entre 0°C y 40°C.

Esta prueba además brinda información sobre la cantidad de humedad e impurezas de los aislamientos del transformador y aterrizado del núcleo.

Existen tres componentes de corrientes que pueden ser medidos en esta prueba:

- Corrientes de Carga: Dependen del tamaño y tipo de equipo a probar, esta corriente tiende a disminuir con el tiempo.
- Corrientes de Absorción: Es causada por cambios moleculares en la aislación, pueden estar por varios minutos.
- Corrientes de Fuga: Es la que resulta del cociente de la tensión aplicada al devanado y la resistencia de la aislación (Ley de Ohm).

La prueba se efectúa con un aparato conocido como medidor de resistencias de aislamiento y comúnmente llamado “MEGGER”, a una tensión de 1000 Voltios, durante 10 minutos.



Figura 31. Medición de la resistencia de aislamiento.

El análisis de resultados se realiza con los valores obtenidos y corregidos a 20°C; el criterio de aceptación o rechazo es fijado por el fabricante. Así mismo, deberá analizarse el incremento de la resistencia entre el primer minuto y el décimo minuto. El cociente de dividir el valor de resistencia de aislamiento a 10 minutos y el valor a 1 minuto, dará un número mayor que la unidad, que se lo conoce como índice de polarización (I_p).

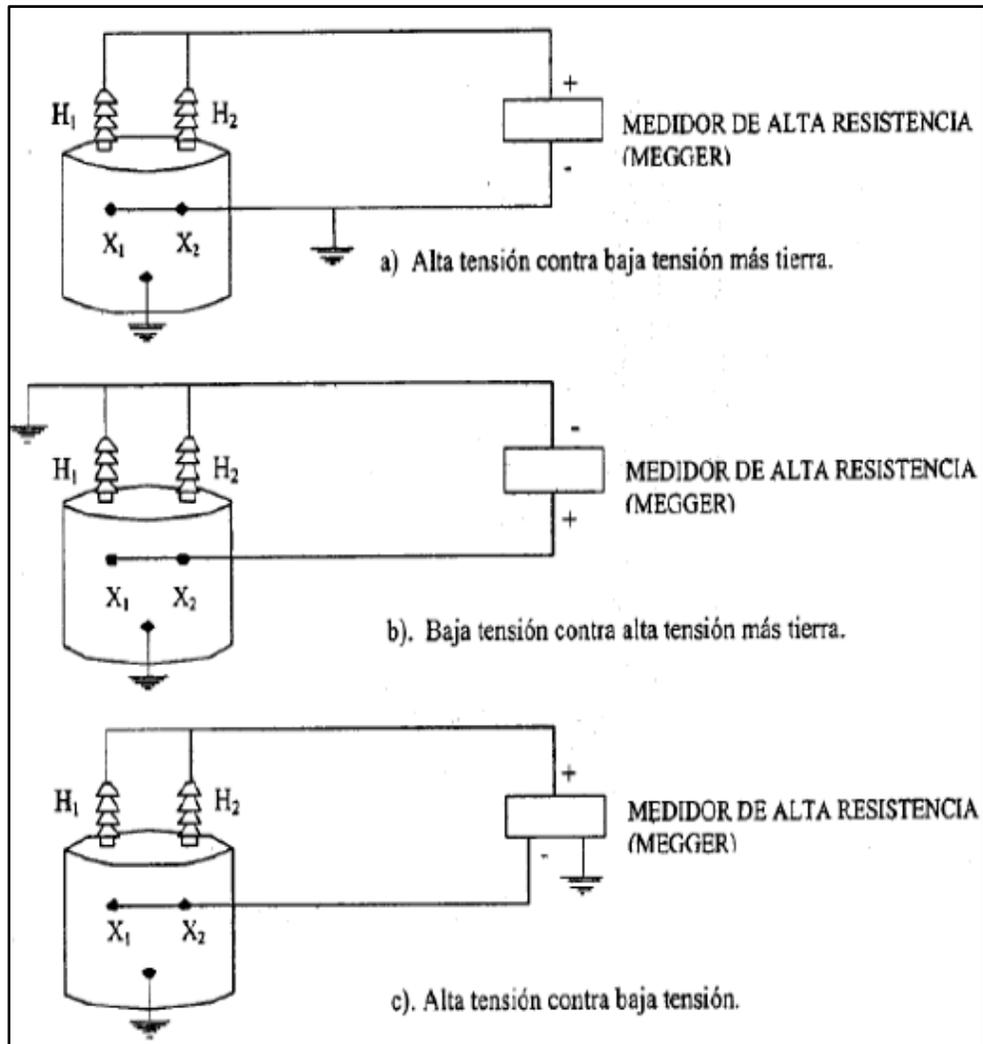


Figura 32. Esquema de conexiones de un transformador para la prueba de resistencia de aislamiento.

4.2.1.3 CRITERIOS DE ACEPTACIÓN O DE RECHAZO

Para aceptar o rechazar una prueba de resistencia de aislamiento existen varios criterios que podrán ser establecidos por el fabricante dependiendo de la experiencia y posibilidad de extracción de humedad en los transformadores.

En las **Tablas 4 y 5**, se indican los valores mínimos de aceptación de resistencia para cada clase de aislamiento de acuerdo a los criterios de aceptación de los fabricantes de transformadores.

De acuerdo a estos criterios, los valores del índice de absorción mayores a 1.4 se consideran de buenas condiciones de aislamiento.

Tabla 4. Valores mínimos de aislamiento recomendado por norma en transformadores sumergidos en aceite.

Resistencia mínima de aislamiento de un transformador en aceite a 20°C, 1 min y 1000 Volts de prueba.	
Clase de aislamiento kV	Megaohms
1.2	32
2.5	68
5	135
8.7	230
15	410
25	670
34.5	930
46	1240
69	1860
92	2480
115	3100
138	3720
161	4350
196	5300
230	6200
287	7750
345	9300

Tabla 5. Condiciones de aislamiento basadas en la relación de índice de absorción dieléctrica y del índice de polarización.

Condiciones	Relación 60/30 seg	Relación 10/1 min
Peligro	-----	Menos de 1
Pobre	Menos de 1.1	Menos de 1.5
Dudoso	1.1 a 1.25	1.5 a 2
Regular	1.25 a 1.4	2 a 3
Bueno	1.4 a 1.6	3 a 4
Excelente	Mayor a 1.6	Mayor a 4

4.2.1.4 PRUEBA DE RIGIDEZ DIELECTRICA DEL ACEITE

Esta prueba que se aplica al aceite es una de las más frecuentes, ya que, el conocer el valor del voltaje de ruptura que un aceite soporta es mucho más valioso; además, esta prueba revela cualitativamente la resistencia momentánea de la muestra del aceite al paso de la corriente y el grado de humedad, suciedad y sólidos conductores en suspensión.

Esta prueba muestra la presencia de agentes contaminantes (agua, polvo, partículas conductoras) en el aceite, las cuales pueden ser representativas si se presentan valores bajos de rigidez dieléctrica. Cuando un aceite está muy contaminado tiende a presentar valores bajos de rigidez dieléctrica, los cuales, disminuyen el aislamiento del transformador.

El aceite de un transformador cumple con 2 funciones elementales como lo son el enfriado y aislamiento de los devanados eléctricos para mejorar su eficiencia y correcto funcionamiento. Como el aislante estará sometido a grandes voltajes de operación, es necesario que cumpla con una prueba de voltaje disruptiva mínima que se pudiera presentar y de este modo prevenir percances que pudieran ser más costosos.

4.2.1.5 PROCEDIMIENTO DE LA PRUEBA

La prueba se efectúa con un probador especial denominado “probador de rigidez dieléctrica del aceite” o comunmente llamado “chispometro”, que consiste de un transformador de potencial elevado, un regulador de voltaje, un voltímetro indicador, un interruptor y la copa estándar patrón para la prueba.



Figura 33. Chispómetro o probador de rigidez dieléctrica del aceite.

Se toma una muestra del aceite y se vierte en la copa estándar, que puede ser de porcelana o de vidrio refractario, y que tiene una capacidad del orden de ½ litro. Después de llenar la copa estándar al nivel marcado en ella, se debe esperar alrededor de tres minutos para permitir que se eliminen las burbujas de aire del aceite; posteriormente, se cierra el interruptor del aparato. Luego, se va incrementando gradualmente el voltaje en el aparato con el regulador, aproximadamente a una velocidad de 3 kV/ segundo, hasta que el aceite contenido en la copa estándar falle; es decir, se produzca el inicio del arco eléctrico entre los electrodos, con lo cual se cortocircuitan abriéndose el interruptor de alimentación de la fuente de energía eléctrica.

Mientras se va incrementando el potencial, el operador deberá ir registrando las lecturas en kV alcanzadas hasta que ocurra la ruptura de aislamiento; en este momento, la prueba concluye y se registrará el valor de los kV más alto alcanzado.

A cada muestra de aceite por lo general, se debe realizar tres pruebas de ruptura, agitando y dejando reposar la muestra por un tiempo mínimo de 1 minuto, después de cada prueba. Los valores obtenidos se promedian y el valor obtenido promedio será el representativo de la muestra, y será válido siempre y cuando que, ninguna prueba sea diferente en más de 5 kV, si la variación es mayor se deben efectuar más pruebas con nuevas muestras.

Para probar aceite muy sucio, deberá lavarse la copa con un buen solvente y secarla perfectamente; posteriormente, tener la precaución al obtener la muestra, ya que, se debe enjuagar la copa 2 o 3 veces con el mismo aceite por muestrear.

Una rigidez dieléctrica de 18 kV es considerada como baja, 25 kV o mayor como buena. Un aceite seco, limpio y nuevo soporta normalmente 35kV.

Normalmente, la rigidez dieléctrica en los aceites aislantes se debe comportar de la siguiente forma:

- Aceites degradados y contaminados De 10 a 28 kV.
- Aceites carbonizados no degradados De 28 a 33 kV.
- Aceites Nuevo sin desgasificar De 33 a 44 kV.
- Aceite Nuevo desgasificado De 40 a 50 kV.
- Aceite regenerado De 50 a 60 kV.

4.2.1.6 PRUEBA DE RELACIÓN DE TRANSFORMACIÓN

Esta prueba tiene como objetivo principal, la transformación para las diferentes posiciones del tap de un transformador estén dentro de la tolerancia de medición de +/- 5%.

Determinar la relación de transformación tiene como fin detectar posibles variaciones por problemas de corto entre espiras (sobre todo en transformadores de relaciones muy altas, puede haber pequeños cortocircuitos entre espiras y el transformador continuar operando sin evidenciarlo).

Matemáticamente, la relación de transformación de un transformador se puede expresar como:

Esta prueba tiene como finalidad determinar la corriente en vacío (I_0), la potencia en vacío (P_0), que representa las pérdidas en vacío del transformador, las cuales resultan de la suma de las pérdidas por histéresis y corrientes parásitas en el núcleo y el factor de potencia en vacío ($\cos\phi_0$).

La prueba de circuito abierto, se hace siempre, sobre el devanado de bajo voltaje, debido a la peligrosidad que representa el hacer la prueba en el lado de alto voltaje, y debido a que las pérdidas en el hierro serán la misma en cualquiera de los devanados; pero si la prueba se hiciera sobre el devanado de alto voltaje, la corriente de vacío (I_0) resultaría demasiada pequeña y el voltaje será excesivamente muy grande.

La corriente de excitación se encuentra alrededor de un 5% de la corriente nominal.

En la **Figura 34** se indica el esquema eléctrico para la prueba de circuito abierto de un transformador.

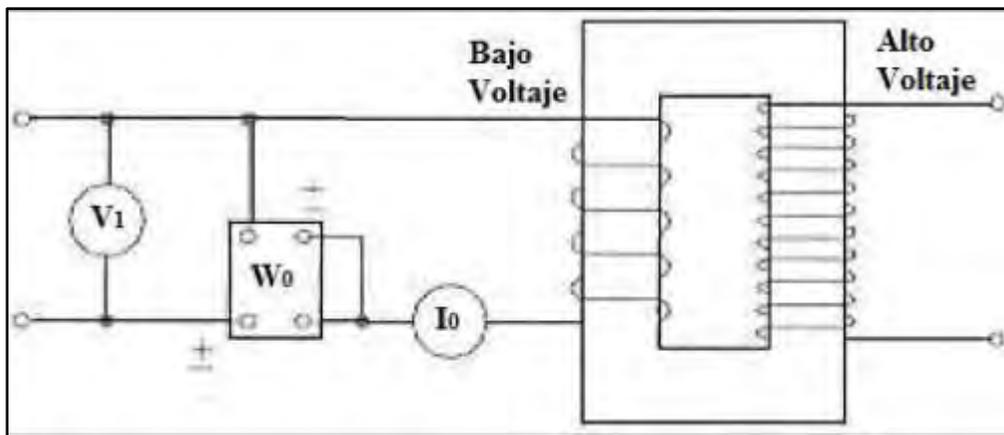


Figura 34. Esquema de conexión para la prueba de circuito abierto.

4.2.2.2 PRUEBA DE CORTOCIRCUITO

En la prueba de cortocircuito un devanado del transformador, generalmente, el del lado de bajo voltaje, se cortocircuita.

En el otro devanado se aplica un voltaje inferior al nominal, tal que, haga pasar por el devanado en cortocircuito la corriente nominal del devanado conectado a la fuente de alimentación.

También se debe tener en cuenta que no hay potencia suministrada, en consecuencia, la potencia absorbida se transforma todo en pérdidas, las cuales se

reducen casi por completo a la pérdida en el cobre, porque las pérdidas en el hierro varían aproximadamente con el cuadrado del voltaje.

Esta prueba de cortocircuito, se considera no destructiva para el transformador; y mide parámetros como el voltaje, corriente, potencia activa de entrada del transformador.

Se considera la corriente de excitación despreciable, toda la corriente primaria circula por los elementos del devanado secundario.

El voltaje de cortocircuito se encuentra alrededor de un 5% del voltaje primario nominal.

En la **Figura 35** se indica el esquema eléctrico para el ensayo en cortocircuito de un transformador con el devanado secundario cortocircuitado.

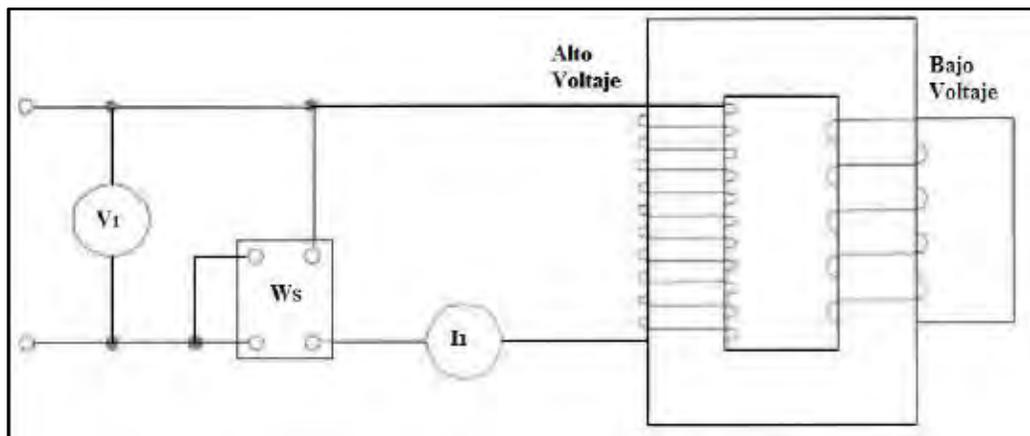


Figura 35. Esquema de conexión para la prueba de cortocircuito.

CAPITULO V

5.1 PUESTA EN SERVICIO

Antes de la puesta en servicio del transformador, la empresa instaladora deberá proporcionar un informe escrito sobre los resultados de las pruebas realizadas al término de la ejecución de la instalación, que comprenderá al menos y principalmente:

- Resistencia de aislamiento.
- Relación de transformación.
- Rigidez dieléctrica del aceite.

Después de su puesta en servicio, se realizará un control, al menos semanal, del correcto funcionamiento del dispositivo de vigilancia de aislamiento y de los dispositivos de protección.

Así mismo, se realizarán medidas de continuidad y de resistencia de aislamiento, de los diversos circuitos, como mínimo mensualmente.

El mantenimiento de los diversos equipos y la revisión periódica de las instalaciones en general, deberá efectuarse de acuerdo con las instrucciones de sus fabricantes.

Además de las inspecciones periódicas, se realizará una revisión anual de la instalación por la empresa instaladora autorizada, incluyendo, en ambos casos, las verificaciones indicadas.

Todas las inspecciones realizadas serán almacenadas en una bitácora, en la que se plasmen los resultados obtenidos especificando las fechas y hora en que se efectuaron, con firma del técnico o especialista que las realizó. En la misma, también deberán reflejarse con detalle las anomalías observadas, para disponer de antecedentes que puedan servir de base a la corrección de deficiencias.

CONCLUSIONES

El planteamiento de éste documento monográfico atendió la necesidad de contar con material bibliográfico que documentara los diferentes procedimientos como tal y así brindar un material de apoyo que expusiera las diferentes partes, requerimientos necesarios para dar explicación a su constitución y armado de un transformador de distribución, partiendo desde la importancia de una pieza hasta el momento que ocupa el mismo dentro de una red eléctrica todo para así lograr operar los aparatos eléctricos que utilizamos hoy de forma cotidiana.

La documentación de armado, pruebas y ensayos a realizar antes presentada, son parámetros básicos mínimos que son considerados en el ensamble de un transformador, teniendo en cuenta que existen empresas especializadas y debidamente registradas bajo normas estrictas para su elaboración que establecen el producto final junto con su puesta en servicio de acuerdo al diseño de cargas requerido.

La elaboración de éste documento da pie a seguir investigando e enriqueciéndolo de forma que pueden incluirse posteriormente los diferentes tipos de transformadores y su armado, aunque el principio de funcionamiento es el mismo posiblemente la diferencia radique en el tipo de ensamblado de sus tanques contenedores.

ANEXOS

APÉNDICE A. PRUEBA DE ESTABILIDAD QUÍMICA DE LAS JUNTAS (EMPAQUES) DE MATERIAL POLIMÉRICO EN EL ACEITE MINERAL

A.1 ALCANCE

Este método cubre la evaluación de la estabilidad química que deben tener las juntas (empaques) de material polimérico en el aceite aislante utilizados en los transformadores.

A.2 SIGNIFICADO DEL USO

La magnitud del cambio en las dimensiones de las juntas por estar en contacto con el aceite aislante, indica el grado de inestabilidad con éste.

Los cambios físicos, químicos y eléctricos en el aceite, ocasionan suciedad por la disolución del material polimérico en contacto con el aceite, sometido a la acción de los cambios de temperatura.

A.3 EQUIPO REQUERIDO

Horno de corriente de aire forzada, ajustable a $100\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ y secado en horno ajustable a $105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Charolas de vidrio refractario para introducirse dentro del horno.

Balanza analítica (500 g).

Micrómetro para medición de espesores.

Vernier de precisión.

Guantes para manejar materiales calientes ($150\text{ }^{\circ}\text{C}$).

A.4 PREPARACIÓN DE LA MUESTRA

Material polimérico de reciente fabricación, libre de polvo, grasa y humedad.

Debe medirse al material polimérico: espesor, largo, ancho, diámetro interior y exterior, color y masa (gramos).

El aceite mineral debe ser nuevo.

Deben obtenerse del aceite aislante los valores medios de rigidez dieléctrica, factor de potencia a 25 °C y 100 °C tensión interfacial en newton por centímetro cuadrado, número de neutralización en g de KOH/g de aceite y color.

A.5 PROCEDIMIENTO DE PRUEBA

Colocar en una charola refractaria el empaque bajo prueba, cubriéndolo con aceite aislante nuevo.

Colocar en otra charola refractaria únicamente aceite aislante nuevo.

Introducir ambas charolas al horno durante 72 h a $100\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$.

Después de concluidas las 72 h y sin abrir el horno, dejar enfriar en el interior del horno.

Abrir el horno hasta conseguir que la temperatura interior sea similar a la del ambiente.

Extraer las muestras y colocarlas en posición que escurran, posteriormente se procede a efectuar pruebas indicadas en los incisos b y d del punto A.4.

Evaluar el aceite mineral aislante que no estuvo en contacto con el empaque.

A.6 EVALUACIÓN DE RESULTADOS

El cambio físico, referente a masa y dimensiones, del material debe ser máximo de 5 %. Esto es: todos los valores obtenidos, del inciso "b" del punto A.4 no deben presentar alteraciones mayores al 5% con respecto a los valores obtenidos antes de someterlo a prueba.

Evaluar el cambio físico, químico y dieléctrico del aceite nuevo con respecto al aceite envejecido por las variaciones de temperatura.

Determinar el efecto en el aceite por el contacto con la junta.

Los valores obtenidos deben ser menores que lo indicado a continuación:

Rigidez dieléctrica

Entre aceite nuevo y aceite envejecido: 10 %

Entre aceite envejecido y aceite en contacto con el empaque: 15 %

Color

Entre aceite nuevo y aceite envejecido 20 %

Entre aceite envejecido y aceite en contacto con el empaque: 25 %

Tensión interfacial

Entre aceite nuevo y aceite envejecido: 10 %

Entre aceite envejecido y aceite en contacto con el empaque: 10 %

Factor de potencia a 25 °C

Entre aceite nuevo y aceite envejecido: 0,05

Entre aceite envejecido y aceite en contacto con el empaque: 0,08

Factor de potencia a 100 °C

Entre aceite nuevo y aceite envejecido: 0,05

Entre aceite envejecido y aceite en contacto con el empaque: 0,70

Índice de neutralización, mg de KOH/g de aceite

Entre aceite nuevo y aceite envejecido: 0,01

Entre aceite envejecido y aceite en contacto con el empaque: 0,03

A.7 BIBLIOGRAFÍA

ASTM D3455-02 Standard test methods for compatibility of construction material with electrical insulating oil of petroleum origin.

APÉNDICE B. RECUBRIMIENTO ANTICORROSIVO Y COLOR DEL TRANSFORMADOR

B.1 APLICACIÓN DE RECUBRIMIENTOS ANTICORROSIVOS

Los recubrimientos deben cumplir los valores indicados en la tabla siguiente:

TABLA B1. Valores especificados para recubrimientos anticorrosivos en probetas.

Ambientes de prueba	Adherencia ⁴⁾ Método A o B mínimo	Ampollamiento ⁴⁾	Herrumbre ⁴⁾ mínimo	Brillo ⁴⁾ (%) a 85	Falla ⁴⁾ máxima	
					Procedimiento A mm	Procedimiento B (%)
Inicial	5	No	No	38	0	0
1416 h a 85°C	5	No	No	-	-	-
Niebla salina NMX-D-122 de 2000 h a 2016 h	4	No	Grado 9	-	Nota 3)	0.09
Luz ultravioleta ⁴⁾ * mínimo 2000h	5	No	No	20	-	0

Índice de abrasión (máximo)⁴⁾ * = 0,125 g (1000 ciclos, 1000 g, piedra CS - 10)

NOTAS:

Estas pruebas sólo aplican para recubrimiento externo y superficies de acero al carbón.

Para superficies de acero inoxidable sólo aplica adherencia.

Valor en estudio por parte del subcomité SC 14 A de CONANCE.

Para los métodos de prueba véase el Apéndice C.

B.2 COLOR

Los colores preferentes del acabado externo, a menos que el usuario especifique otra cosa, deben cumplir con la escala de color alternativa CIELAB normalizada, con el observador a 2 grados y luz de día, y sus valores son:

Para arena: $L^* = 76,49$; $a^* = -0,61$; $b^* = 9,76$.

Para el Munsell 5BG 7.0/0.4 (ANSI gris 70): $L^* = 72,45$; $a^* = -3,40$; $b^* = 2,24$.

Para todos los colores la diferencia máxima de color aceptable es 2,0 (para el método de prueba véase el Apéndice C).

APÉNDICE C. RECUBRIMIENTO ANTICORROSIVO Y COLOR DEL TRANSFORMADOR

C.1 APLICACIÓN DE RECUBRIMIENTOS ANTICORROSIVOS Y COLOR

En tanto no exista norma mexicana al respecto pueden consultarse en forma supletoria las publicaciones ASTM indicadas en la tabla siguiente:

Tabla C1. Métodos de prueba para recubrimientos anticorrosivos en probetas y color.

Ambientes de prueba y características de evaluación del recubrimiento	Método de prueba
Adherencia	ASTM D3359
Ampollamiento	ASTM D714
Falla	ASTM D1654
Brillo	ASTM D523
Diferencia de color	ASTM D2244
Herrumbre	ASTM D610
Índice de abrasión	ASTM D4060
Luz ultravioleta	ASTM G153

C.2 BIBLIOGRAFÍA

ASTM D3359–02 Standard test methods for measuring adhesion by tape test.

ASTM G153–00 Standard Practice for operating enclosed carbon arc light apparatus for exposure of nonmetallic materials.

ASTM D523–89 Standard test methods for specular gloss.

ASTM D610–01 Standard test method for evaluating degree of rusting on painted steel surfaces.

ASTM D714–02 Standard test method for evaluating degree of blistering of paints.

ASTM D1654–92 Standard test method for evaluation of painted or coated specimens.

ASTM D2244–02 Standard practice for calculation of color tolerances and color differences from instrumentally measured color coordinates.

ASTM D4060–01 Standard test method for abrasion resistance of organic coatings by the taber abraser.

APÉNDICE D. CARACTERÍSTICAS DE LOS EMPAQUES

D.1 MÉTODOS DE PRUEBA

En tanto no existan Normas Mexicanas al respecto, consúltense en forma supletoria las siguientes publicaciones ASTM:

Concepto	Método de prueba
Resistencia a la tensión mínima.	ASTM D-412
Elongación última mínima.	ASTM D-412
Compresión permanente a 22 h 70 °C, máxima.	ASTM D-395 (B)
Cambio de volumen máximo después de envejecido a 70 h a 100 °C en aceite de transformador.	ASTM D-3455 ASTM D-471

D.2 BIBLIOGRAFÍA

ASTM D2240-03 Standard test method for rubber property - durometer hardness.

ASTM D3455-02 Standard test methods for compatibility of construction material with electrical insulating oil of petroleum origin.

ASTM D471-98 Standard test method for rubber property - effect of liquids.

ASTM D412-98 Standard test methods for vulcanized rubber and thermoplastic.

ASTM D395-03 Standard test method for rubber property - compression set.

BIBLIOGRAFÍA

[1] **Anderson, John. 2011.** ELECTRÓNICA. [En línea] 10 de Abril de 2011. [Citado el: 24 de Abril de 2013.] <http://electronica-uco.blogspot.mx/p/decimo-grado.html>.

Braun, Eliezer. ELECTROMAGNETISMO: DE LA CIENCIA A LA TECNOLOGÍA. [En línea] [Citado el: 22 de Abril de 2013.] <http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/112/htm/electr.htm>.

Chapman, Stephen J. 2005. MÁQUINAS ELÉCTRICAS. *MÁQUINAS ELÉCTRICAS*. México : Mc Graw Hill, 2005, págs. 65-66, 67.

CONCEPTOS DE ELECTROTECNIA PARA APLICACIONES INDUSTRIALES. *El transformador eléctrico. Aplicaciones prácticas de los transformadores*. [En línea] [Citado el: 26 de Abril de 2013.] http://www.sapiensman.com/electrotecnia/transformador_electrico7.htm.

GE Energy. 2013. DIRECT INDUSTRY: El Salón Virtual de la Industria. [En línea] 2013. [Citado el: 24 de Abril de 2013.] <http://www.directindustry.es/prod/ge-digital-energy/transformadores-de-potencia-de-subestacion-50469-584926.html>.

OHNMAN DE MEXICO. 2010. OLX. [En línea] 27 de Agosto de 2010. [Citado el: 24 de Abril de 2013.] <http://oaxacadejuarez.olx.com.mx/venta-de-transformadores-para-distribucion-iiid-109310735>.

Pérez, Pedro Avelino. 2001. *Transformadores de distribución: Teoría, cálculo, construcción y pruebas*. México : Reverté, 2001. págs. 5-9.

PROLEC GE. PROLEC GE: Impulsando saluciones confiables. *Transformador Poste Monofásico*. [En línea] [Citado el: 24 de Abril de 2013.] http://www.prolecge.com/internet/sp/uploadfile/poste_monofasico_nacionalIMR.pdf.

—. PROLEC GE: Impulsando saluciones confiables. *Transformador Poste Trifásico*. [En línea] [Citado el: 24 de Abril de 2013.] http://www.prolecge.com/internet/sp/uploadfile/poste_trifasico_nacionalIMR.pdf.

—. PROLEC GE: Impulsando saluciones confiables. *Transformador Pedestal Monofásico*. [En línea] [Citado el: 24 de Abril de 2013.] http://www.prolecge.com/internet/sp/uploadfile/pedestal_monofasico_nacionalIMR.pdf.

—. PROLEC GE: Impulsando saluciones confiables. *Transformador Pedestal Trifásico*. [En línea] [Citado el: 24 de Abril de 2013.] http://www.prolecge.com/internet/sp/uploadfile/Pedestal_trifasico%20.pdf.

—. PROLEC GE: Impulsando saluciones confiables. *Transformador Sumergible Monofásico*. [En línea] [Citado el: 24 de Abril de 2013.] http://www.prolecge.com/internet/sp/uploadfile/sumergible_monofasico_nacionalIMR.pdf.

—. PROLEC GE: Impulsando soluciones confiables. *Transformador Sumergible Trifásico*. [En línea] [Citado el: 24 de Abril de 2013.] http://www.prolecge.com/internetsp/uploadfile/sumergible_trifasico_nacionalMR.pdf.

—. PROLEC GE: Impulsando soluciones confiables. *Transformador Tipo Estación (NMX-J-116-ANCE)*. [En línea] [Citado el: 24 de Abril de 2013.] http://www.prolecge.com/internetsp/uploadFile/tipo_estacion.pdf.