



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES

CUAUTILÁN

DESCRIPCIÓN, SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE LOS TRANSFORMADORES ELÉCTRICOS

TESIS PROFESIONAL

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO MECÁNICO ELÉCTRICISTA

PRESENTA:

CRISTHIAN MORAN FEDERICO

ASESOR: ING. ANGEL ISAÍAS LIMA GOMEZ



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN
UNIDAD DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR
DEPARTAMENTO DE EXÁMENES PROFESIONALES

U. N. A. M.
FACULTAD DE ESTUDIOS
ASUNTO: VOTO APROBATORIO

DRA. SUEMI RODRÍGUEZ ROMO
DIRECTORA DE LA FES CUAUTITLÁN
PRESENTE

ATN: L.A. ARACELI HERRERA HERNÁNDEZ
Jefa del Departamento de Exámenes
Profesionales de la FES Cuautitlán.



Con base en el Reglamento General de Exámenes, y la Dirección de la Facultad, nos permitimos a comunicar a usted que revisamos **LA TESIS:**

“Descripción, Selección y Aplicación de los Transformadores Eléctricos”.

Que presenta el pasante: Cristhian Morán Federico

Con número de cuenta: 40808603-3 para obtener el Título de: Ingeniero Mecánico Electricista

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el **EXAMEN PROFESIONAL** correspondiente, otorgamos nuestro **VOTO APROBATORIO**.

ATENTAMENTE

“POR MI RAZA HABLARA EL ESPÍRITU”

Cuautitlán Izcalli, Méx. a 20 de Septiembre de 2013.

PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO

	NOMBRE	FIRMA
PRESIDENTE	Ing. Javier Hernández Vega	
VOCAL	Dra. Celina Elena Urrutia Vargas	
SECRETARIO	Ing. Ángel Isaias Lima Gómez	
1er SUPLENTE	Ing. Fernando Patlán Cardoso	
2do SUPLENTE	Ing. Fernando Fierro Téllez	

NOTA: los sinodales suplentes están obligados a presentarse el día y hora del Examen Profesional (art. 127).

AGRADECIMIENTOS

A nuestra máxima casa de estudios: la Universidad Nacional Autónoma de México por brindarme la oportunidad de cumplir con esto que inicie como un sueño y porque es un gran orgullo pertenecer a esta gran institución.

A la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, porque fue mi casa, donde viví por más de 5 años; porque en este lugar me forme profesionalmente; pero sobre todo porque ahora soy un hijo egresado de esta institución.

A mi asesor de tesis el Ing. Ángel Isaías Lima Gómez, por su vocación, su paciencia, su atención, sus conocimientos y su vocación. Porque son sus observaciones y sugerencias este trabajo es una realidad, pero sobre todo porque siempre se agradece cuando alguien te tiende la mano sin esperar nada a cambio.

A los miembros del jurado: Ing. Javier Hernández Vega, Dra. Celina Elena Urrutia Vargas, Ing. Ángel Isaías Lima Gómez, Ing. Fernando Patlan Cardoso, Ing. Fernando Fierro Téllez, por el tiempo dedicado a este proyecto, por sus atinados comentarios y sus valiosas sugerencias.

A todos los profesores de la carrera de los cuales siempre obtuve atención.

A mis compañeros y amigos, por los momentos vividos y por el apoyo recibido en el transcurso del tiempo.

A todas aquellas personas que en algún momento me apoyaron incondicionalmente y desinteresadamente.

A todas esas personas que siempre creyeron en mí.

Porque cuando algunos ven el fin de un ciclo, yo veo el principio de otro; y este no es sino el comienzo de uno nuevo.

ATENTAMENTE

I.M.E. Cristhian Moran Federico

Por mi raza, hablara el espíritu.

DEDICATORIAS

A la mujer más grandiosa del mundo, esa mujer que a pesar de su avanzada edad siempre estuvo conmigo desde que nací hasta mis 20 años, esa mujer tan increíble que estuvo al pendiente de mí y con gran esfuerzo y amor me ofreció comida, un abrazo, una risa o un llanto, que sin importar las condiciones de salud tenía un minuto en su mente y corazón para preguntar ¿Si ya había llegado?, no podría expresar completamente mi agradecimiento hacia ella; sin embargo, ahora que ya no se encuentra en este mundo, ha de saber que la amo y aun la extraño y que estoy muy orgulloso de haber sido su nieto.

*A mi abuelita **Epifanía Timotea Trejo León (QEPD).***

A la mujer de la casa, aquella que se entrega a su familia sin exigir nada a cambio; que sacrifica todo por sus hijos; que es la última que se duerme y la primer que se despierta; que siempre tiene la comida caliente y la ropa limpia; esa mujer tan fuerte pero a la vez tan frágil; a quien le debo la vida.

*A mi mama **Silvestra Federico Trejo.***

Al hombre de la casa, ese que desde pequeño siempre admire, el que me ha demostrado con ejemplo como seguir adelante, aquel que no se derrumba ni ante las peores adversidades y siempre lo remarca un alto grado de responsabilidad y compromiso, gracias no solo por darme apoyo económico sino también moral.

*A mi papa **Telesforo Moran Ventura.***

A la mayor de la familia, por su apoyo y cariño, por sus ánimos que me hicieron alcanzar esta meta, por su gran ejemplo de fortaleza, por ese tiempo dedicado a platicar conmigo y aconsejarme sobre seguir el buen camino, por tu apoyo económico y fraternal.

*A mi hermana **Xóchitl Moran Federico.***

Al menor de la familia, por su comprensión y su apoyo, por esas desveladas que te provoquen cuando por las madrugadas me ibas a dejar a la central, porque aunque algunas veces nos peleamos ¿Qué hermanos no lo hacen? Siempre serás alguien por quien me preocupe.

*A mi hermano **Iván Antonio Moran Federico.***

A todos aquellos que siempre me han apoyado con un consejo, que me expresan su cariño y siempre tienen para mí palabras de aliento, mis tíos, mis primos especialmente a mi Tía Juana y Tío Guillermo porque nunca me negaron el techo de su hogar, un consejo especial y me ofrecieron un plato de comida, mil gracias.

A mis familiares.

A todos mis compañeros y conocidos, que siempre estuvieron orgullosos de mi esfuerzo y siempre me dieron ánimos para continuar, hoy les digo ¡LO LOGRE! Y gracias porque no perdieron la fe en mí.

A mis amigos.

A ti mi cerecita, que siempre estuviste conmigo afrontando cosas positivas y negativas, que siempre te tomaste tiempo para darme ánimos de continuar, que siempre creíste en mí y me demostrabas tu amor incondicional, que desde que te conocí supe que eras especial y tan afortunado fui de tenerte a mi lado; ahora sé que te está yendo mejor y eso me pone muy feliz; y aunque ya no estés conmigo jamás olvidare lo importante y esencial que fuiste para mí por 2 largos años; al igual que toda la maravillosa familia Mendoza Ramírez.

*A mi mejor consejera **Eunice Abigail Mendoza Ramírez.***

Pero sobre todo y principalmente, a ese ser que no veo, pero que percibo; aquel del que a veces niego y otras no me acuerdo, pero que siempre está ahí; el que me ha permitido vivir este momento.

A Dios.

¡MUCHAS GRACIAS!

TABLA DE CONTENIDO

OBJETIVO GENERAL	2
OBJETIVO PROFESIONAL	3
INTRODUCCIÓN	4
CAPÍTULO 1.- DESCRIPCIÓN DEL TRANSFORMADOR ELÉCTRICO	6
1.1 ANTECEDENTES HISTÓRICOS DEL TRANSFORMADOR	7
1.2 CONCEPTOS BÁSICOS DE LOS TRANSFORMADORES	10
1.2.1 Ley de Faraday	12
1.2.2 Inducción magnética	14
1.2.3 Permeabilidad magnética	15
1.2.4 Fuerza electromotriz	16
1.2.5 Flujo magnético	18
1.2.6 Fuerza magnetomotriz	20
1.2.7 Perdidas en el núcleo	22
1.3 CONSTITUCIÓN FÍSICA DE UN TRANSFORMADOR ELÉCTRICO	25
1.3.1 Circuito eléctrico de un transformador	27
1.3.2 Circuito magnético de un transformador	31
1.3.3 Sistema de refrigeración de un transformador.....	33
1.3.3.1 Refrigeración de los transformadores en seco	34
1.3.3.2 Refrigeración de los transformadores en aceite	37
1.3.4 Partes constitutivas del transformador.....	41
1.3.5 Datos de placa de un transformador eléctrico	43
1.4 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE UN TRANSFORMADOR ELÉCTRICO	45
1.4.1 Fuerza electromotriz inducida en vacío	48
1.4.2 El transformador ideal	49
1.4.2.1 Diagrama fasorial de un transformador ideal	52
1.4.3 El transformador real	53
1.4.3.1 Diagrama fasorial de un transformador real	58
1.4.4 Relaciones de transformación	59
1.4.5 La eficiencia de un transformador	61
1.5 CONDICIONES DE OPERACIÓN DE UN TRANSFORMADOR ELÉCTRICO	63
1.5.1 Transformador sin carga	63
1.5.2 Transformadores con carga	65
1.5.3 Regulación de tensión de un transformador	66

CAPÍTULO 2.- TIPOS, NORMAS Y CONEXIONES DE LOS TRANSFORMADORES ELÉCTRICOS ----- 68

2.1 INTRODUCCIÓN.....	69
2.2 TIPOS Y CLASIFICACIÓN DE LOS TRANSFORMADORES ELÉCTRICOS .	70
2.2.1 Transformadores según su funcionalidad	71
2.2.2 Transformadores según su sistema de tensión	78
2.2.3 Transformadores según la tensión del secundario	80
2.2.4 Transformadores según el medio ambiente de utilización	83
2.2.5 Transformadores según su elemento refrigerante	84
2.2.6 Transformadores según su modo de refrigeración	88
2.2.7 Otras clasificaciones de transformadores	90
2.3 CONEXIONES EN LOS TRANSFORMADORES ELÉCTRICOS	100
2.3.1 Conexiones de transformadores monofásicos	100
2.3.1.1 Conexiones de transformadores en paralelo	100
2.3.1.2 Transformadores no concordantes en paralelo	102
2.3.1.3 Transformadores concordantes en paralelo	103
2.3.2 Conexiones de transformadores trifásicos	104
2.3.2.1 Conexiones delta-delta (Δ - Δ)	105
2.3.2.2 Conexiones delta-estrella (Δ -Y)	106
2.3.2.3 Conexiones estrella-delta (Y- Δ)	107
2.3.2.4 Conexiones estrella-estrella (Y-Y)	108
2.3.2.5 Conexiones delta abierta-delta abierta	109
2.4 NORMAS Y ESPECIFICACIONES DE APLICACIÓN A LOS TRANSFORMADORES ELÉCTRICOS	110
2.4.1 Ley federal sobre metrología y normalización.....	111
2.4.2 Norma mexicana ance transformadores y autotransformadores de distribución y potencia	112
2.4.3 Norma mexicana ance transformadores tipo poste y tipo Subestación	119
2.4.4 Norma de transformadores de potencia	125
2.4.5 Norma para transformadores y autotransformadores de potencia para subestaciones de distribución	130
2.4.6 Ventajas y desventajas generales de la aplicación de pruebas a transformadores según las normas mexicanas nmx	134

CAPÍTULO 3.- APLICACIÓN Y PRUEBAS A LOS TRANSFORMADORES ELÉCTRICOS ----- 137

3.1 INTRODUCCIÓN	138
3.2 APLICACIÓN DE LOS TRANSFORMADORES ELÉCTRICOS	139
3.3 PRUEBAS DE CIRCUITO ABIERTO A TRANSFORMADORES	145
3.4 PRUEBAS DE CORTO CIRCUITO A TRANSFORMADORES	149

CAPÍTULO 4.- MANTENIMIENTO PREVENTIVO DEL TRANSFORMADOR ELÉCTRICO -----	158
4.1 INTRODUCCIÓN	159
4.2 DEFINICIONES Y TIPOS DE MANTENIMIENTO	161
4.3 MANTENIMIENTO PREVENTIVO DEL TRANSFORMADOR ELÉCTRICO EN SECO	162
4.4 MANTENIMIENTO PREVENTIVO DEL TRANSFORMADOR ELÉCTRICO EN ACEITE	169
4.4.1 Mantenimiento e inspección del aceite	174
4.4.2 Mantenimiento e inspección de los pasatapas.....	177
4.4.3 Mantenimiento e inspección del sistema de ventilación	179
4.4.4 Mantenimiento e inspección de los medidores de temperatura ...	181
4.4.5 Mantenimiento e inspección de los medidores de nivel de aceite .	183
4.4.6 Mantenimiento e inspección del relevador de buchholz	184
4.4.7 Mantenimiento e inspección de la válvula de sobrepresión	186
4.4.8 Mantenimiento e inspección del tanque	186
4.4.9 Mantenimiento e inspección del cambiador de taps	188
4.4.10 Mantenimiento e inspección del respirador silica gel	190
CONCLUSIONES -----	191
BIBLIOGRAFÍA -----	192

OBJETIVO GENERAL.

Describir la importancia, la utilidad y la persistencia de los transformadores eléctricos en la industria y la vida diaria; así como obtener un texto especializado en donde se resalten las ventajas, junto con las características de selección, aplicación y mantenimiento de los transformadores eléctricos.

OBJETIVO PROFESIONAL.

Desarrollar mis conocimientos y habilidades adquiridas durante el curso de mi carrera como ingeniero, siendo un profesional confiable y con un elevado grado de responsabilidad y compromiso; participando en forma activa y positiva en mi ambiente profesional, encaminando mis esfuerzos al cumplimiento de mis metas y objetivos en el sector industrial que me desempeñe.

INTRODUCCIÓN.

La vida industrial atraviesa por una etapa de globalización a través del sector industrial, el cual representa una de las principales fuentes de empleo y recursos económicos. Se sabe que, cuando aumenta la demanda de algún bien o servicio, se tiende a aumentar la producción de los mismos con el fin de satisfacer a los consumidores.

Hoy en día, la industria moderna utiliza como principal fuente la energía eléctrica para el funcionamiento de sus áreas productivas y a nivel residencias es de igual manera un servicio indispensable para la realización de diversas tareas de la vida cotidiana; por tal motivo el suministro de electricidad debe de contar con ciertas características como un servicio en forma continua y eficiente, así como otras particularidades más técnicas tales como el nivel de tensión, ciclo de operación, etc.

Los transformadores son máquinas capaces de elevar, reducir o mantener los niveles de tensión y corriente sin variar la frecuencia; la principal función de ellos es cambiar los parámetros de la energía eléctrica⁶.

La industria eléctrica ha tenido un mayor crecimiento y más dificultad de poder llevar la energía eléctrica de un lugar a otro haciéndose más evidente, debido a que en un inicio los circuitos eléctricos eran a base de corriente directa a un bajo voltaje, el cual los hacia sumamente

⁶ Gilberto Harper Enríquez. *El libro practico de los generadores, transformadores y motores eléctricos*. México DF. Editorial Limusa 2005.

ineficientes para la transmisión de la energía eléctrica a distancias considerablemente grandes.

Se vio entonces con la necesidad que de alguna manera se elevara el voltaje entre el centro de generación y los de consumo (hogares, industrias y comercios) a través de equipos eléctricos llamados **TRANSFORMADORES** que nos permiten y facilitan la transmisión de la energía eléctrica a grandes distancias.

En vista del gran número de transformadores sujetos a envejecimiento acelerado, debido al exceso de carga en los actuales sistemas de potencia, es importante conocer el tiempo de vida útil, funcionamiento y el estado que el mismo posee, por lo que se debe analizar y realizar las pruebas necesarias para su correcto funcionamiento.

Por estas razones los Transformadores Eléctricos son el objeto de estudio en la realización de este trabajo de titulación, considerando que antes de ser puestos en operación se debe cumplir con los requerimientos que establecen las Normas Mexicanas (NXM-J-169-ANCE-2004 y NRF-144-PEMEX-2005), para que puedan cumplir su objetivo de diseño de una forma óptima y efectiva disminuyendo costos por mantenimiento o reparación.

El objetivo primordial de esta tesis, en lo personal fue cumplido en su totalidad, debido a que la información recabada fue seleccionada de una forma adecuada y organizada de tal forma que en cada uno de los capítulos y subcapítulos de esta tesis, se plasma lo más concretamente posible; facilitando así el mejor entendimiento del lector.

CAPÍTULO 1



DESCRIPCIÓN DEL TRANSFORMADOR ELÉCTRICO.

1.1 ANTECEDENTES HISTORICOS DEL TRANSFORMADOR.

El transformador eléctrico, es posiblemente uno de los dispositivos más útiles que se han desarrollado en la electricidad, el primer prototipo de ellos fue construido por Faraday durante la realización de sus experimentos en los que descubrió la inducción electromagnética en el año de 1831.

La primera bobina de inducción fue inventada por Nicholas Callan en 1836, quien fue uno de los primeros científicos en descubrir que la relación de espiras entre el primario y secundario bobinado, hace un aumento de la Fuerza Electromotriz (FEM).

Durante los años 1830 y 1870 aproximadamente, se llevaron a cabo esfuerzos para construir mejores bobinas de inducción y gracias a esos ensayos y a los errores que se presentaban, se fueron desarrollando a un paso muy lento los principios básicos de los transformadores eléctricos.

En el año 1878, la empresa Ganz en conjunto con su grupo de ingenieros, asignaron buena parte de sus recursos para fabricar aparatos de iluminación eléctrica usando sistemas de transformadores primitivos.

Mientras tanto Lucien Gaulard y John Dixon expusieron por primera vez en 1882 la idea de crear un dispositivo con núcleo de hierro al que llamaron "generador secundario" y posteriormente vendieron su idea a la compañía americana Westinghouse.

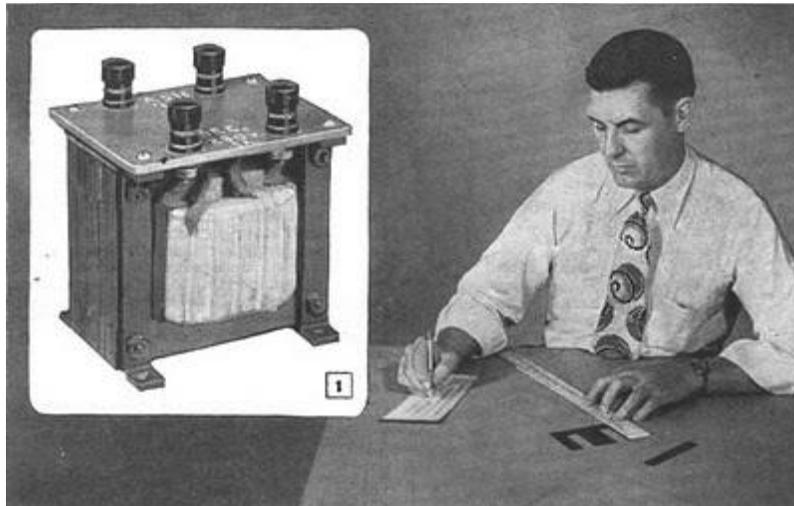


Figura 1-1. Primer centro de distribución de energía de 120 V puesta en servicio por Edison.

Pero fue en el bimestre de 1884 y 1885, cuando los ingenieros Zipernowsky, Bláthy y Deri de la empresa Ganz que crearon el transformador de corriente alterna al cual denominaron modelo "ZBD" y basados en el diseño de núcleo de hierro de Gaulard y Dixon descubrieron las relaciones de transformación.

Finalmente, el diseño de los ingenieros de Ganz se hizo patente con la palabra "transformador" gracias a Bláthy Ottó quien la acuñó; mientras que en 1885 Westinghouse compró las patentes del ZBD y le encomendó a William Stanley la construcción de un

transformador para uso comercial y en 1886 fue cuando se utilizó por primera vez.

Durante el transcurso del siglo actual, se han presentado una cantidad innumerable de avances científicos y desarrollos tecnológicos que han ayudado a mejorar la eficiencia de los transformadores, el trabajo principal consiste en desarrollar materiales de calidad mayor para los núcleos con la finalidad de evitar pérdidas de energía o un valor excesivo de corrientes parasitas que incrementen la temperatura del transformador.

La razón principal es que la temperatura excesiva del transformador, altera las propiedades del material ferromagnético y con el tiempo deja de tener esa propiedad, por lo que la calidad de funcionamiento del transformador disminuye notablemente; por eso, con el esfuerzo tecnológico de los investigadores se descubrió que al sumergirlo en un líquido viscoso como el aceite dicho calentamiento se puede evitar.

1.2 CONCEPTOS BASICOS DE LOS TRANSFORMADORES.

Actualmente, la sociedad requiere transportar grandes cantidades de fluido eléctrico desde las fuentes de generación hasta los centros finales de consumo humano, los transformadores son el dispositivo adecuado para esta función, ya que pueden elevar o reducir voltajes de corriente alterna C.A. y variar los valores de capacitores o inductores en los circuitos eléctricos.

“El transformador es catalogado como una maquina eléctrica que permite aumentar o disminuir el nivel de voltaje o tensión de corriente alterna que se le suministra, con la característica principal de mantener la frecuencia, la potencia que ingresa a un transformador, en caso de que este se considere como un dispositivo ideal, no produce perdidas, es decir, es igual a la que se obtiene en la salida; sin embargo en las maquinas reales se presenta un porcentaje pequeño de perdidas, dependiendo del uso, diseño y características del transformador”⁷.

El transformador en su forma más sencilla se compone de dos bobinas acopladas por medio de un flujo magnético mutuo, es decir, un flujo magnético reciproco; si algún devanado por ejemplo, el principal se conecta a una fuente de corriente alterna C.A. se producirá un flujo cuya amplitud dependerá del voltaje principal, de la frecuencia del voltaje aplicado y del número de vueltas o espiras de la primer bobina; se vinculara dicho flujo con

⁷ Megger (2012) *Nuevas Tecnologías de Evaluación de la Condición de Transformadores de Potencia*. Buenos Aires, Argentina.

el devanado secundario e inducirá un voltaje dentro de él cuyo valor dependerá de las vueltas en el devanado secundario, de la magnitud del flujo y de la frecuencia utilizada.

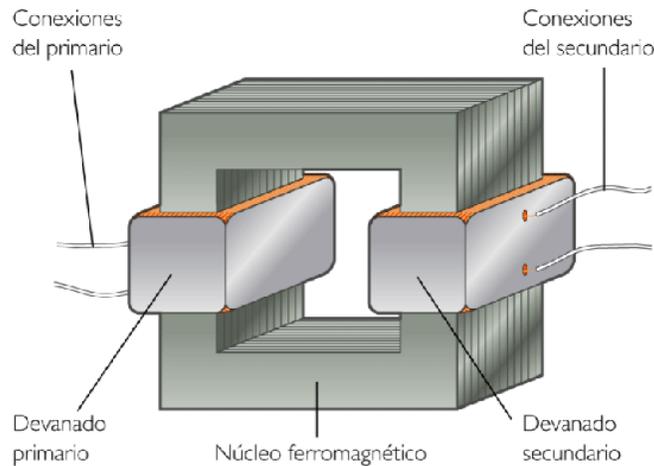


Figura 1-2. Esquema básico del transformador eléctrico.

Esta transferencia de flujo va acompañada generalmente de un cambio de tensión, cuando un transformador recibe una tensión y a la salida devuelve una tensión más elevada se le denomina *transformador elevador*, cuando un transformador recibe una tensión y a la salida devuelve una tensión baja se le denomina *transformador reductor*.

Sin embargo, para entender de mejor forma el funcionamiento de un transformador eléctrico, es importante señalar los siguientes conceptos además de que son importantes, su simbología y la importancia que cada uno de ellos posee.

1.2.1 Ley de Faraday.

También conocida como "Ley de inducción electromagnética de Faraday" está basada en experimentos que el mismo Michael realizo en el año de 1831 y señala que "el voltaje inducido en un circuito cerrado es directamente proporcional a la rapidez con que cambia en el tiempo el flujo magnético que atraviesa una superficie cualquiera con el circuito como borde"⁸.

Aplicada al transformador podemos decir que una fuente de energía aplica una corriente AC que pasa por el devanado primario, produciendo una densidad de flujo magnético que varía en el tiempo sobre el núcleo, este flujo también pasa a través del secundario induciendo una tensión en el mismo y cuando la carga está conectada al secundario, la corriente fluye según la impedancia de la carga.

$$\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \int_S \vec{B} \cdot d\vec{A} \quad (1.0)$$

Dónde:

\vec{E} Es el campo eléctrico.

$d\vec{l}$ Es el elemento infinitesimal de contorno C.

\vec{B} Es la densidad de campo magnético.

S Es una superficie arbitraria, cuyo borde es C.

⁸ Delta Transformadores. *Manual Técnico Delta*. Monterrey México. 92 páginas.

La permutación de la integral de superficie y derivada temporal se puede hacer, si y solo si la superficie de integración no cambie con el transcurso del tiempo, a través del teorema de Stokes, se puede obtener una diferencial de esta ley, se expresa de la siguiente manera:

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (1.1)$$

La ecuación 1.1 se considera como una de las ecuaciones de Maxwell, unificando así al electromagnetismo; para el caso de inductores y en este caso transformadores, dicha ecuación se transforma en la siguiente y será la más usual:

$$V_E = -N \frac{\partial \Phi}{\partial t} \quad (1.2)$$

Dónde:

V_E Es el voltaje inducido.

N Es el número de vueltas o espiras.

$\frac{\partial \Phi}{\partial t}$ Es la variación del flujo magnético a través del tiempo.

1.2.2 Inducción Magnética.

También conocida como densidad de flujo de un campo magnético de intensidad H , se representa por la letra B . Básicamente es el proceso mediante el cual, campos magnéticos generan campos eléctricos, esto se debe gracias a que al generarse un campo eléctrico en un material conductor, los portadores de carga se verán sometidos a una fuerza y se inducirá una corriente eléctrica en el conductor y está dada por la siguiente ecuación

$$B = \mu H \quad (1.3)$$

Dónde:

H Es la intensidad del campo magnético [Ampere-vuelta por m].

μ Es la permeabilidad magnética del material [H.m].

La densidad final de flujo resultante se da en Webers por metro cuadrado, cuya equivalencia son los teslas (T).

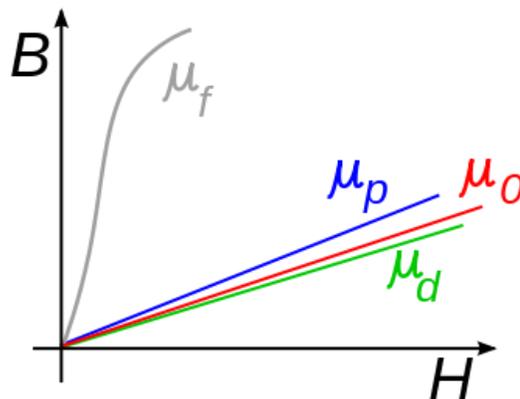


Figura 1-3. Comparación de permeabilidades en función de la inducción magnética.

1.2.3 Permeabilidad magnética.

Hablando de términos físicos, "es una propiedad que posee un cuerpo o sustancia para atraer o hacer pasar a través de ella campos magnéticos, está dada por la relación entre la inducción magnética y la intensidad del campo magnético"⁹.

La permeabilidad relativa μ_r toma como referencia al aire, es decir, si en una maquina eléctrica como un transformador la permeabilidad relativa pueda alcanzar valores cercanos a 100,000, lo cual indica que el flujo magnético que atraviesa una determinada sección del núcleo es 100,000 veces mayor que el que atravesaría a una sección equivalente del aire para el mismo valor de campo magnético. La permeabilidad magnética de vacío, conocida también como constante magnética, se define de la siguiente manera:

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \quad (1.4)$$

Así mismo, podemos concluir que la permeabilidad relativa es una forma de comparar entre si los materiales, se entiende la permeabilidad magnética absoluta μ como el producto entre la permeabilidad magnética relativa μ_r y la permeabilidad magnética de vacío μ_0

$$\mu = \mu_r \mu_0 \quad (1.5)$$

⁹ Chapman, Stephen J. *Maquinas Eléctricas*. México DF. Editorial McGraw-Hill Interamericana. 2005.

Despejando la ecuación 1.5, tenemos entonces para la permeabilidad relativa un valor adimensional.

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (1.6)$$

Por lo tanto, los materiales se pueden clasificar según su permeabilidad magnética relativa en:

- ✓ Ferromagnéticos: son aquellos cuyo valor de permeabilidad magnética relativa es muy superior a la unidad 1.
- ✓ Paramagnéticos: son aquellos cuyo valor de permeabilidad magnética relativa es aproximadamente de 1.
- ✓ Diamagnéticos: son aquellos cuyo valor de permeabilidad magnética relativa es inferior a la unidad 1.

1.2.4 Fuerza Electromotriz.

Es un término no tan complejo, también se le conoce como F.E.M. y "se refiere a la energía proveniente de cualquier medio, dispositivo o fuente que suministre corriente eléctrica, para ello se necesita que exista una diferencia de potencial entre dos polos o puntos de dicha fuente, de los cuales uno debe ser negativo y el otro positivo; que sea capaz de bombear e impulsar cargas eléctricas a través de un circuito cerrado"¹⁰.

¹⁰ Norberto A. Lemozy. *Circuitos Magnéticos y Transformadores* Editorial Reverté. 2008.

Es una característica que poseen la mayoría de las maquinas eléctricas, ya que también se define como el trabajo que el transformador realiza para pasar por su interior la unidad de carga del polo positivo al negativo, la FEM se mide en voltios, al igual que el potencial electico y se expresa mediante

$$P = \frac{R}{A} \quad (1.7)$$

Mientras tanto, la fuerza electromotriz inducida en un circuito cerrado es igual a la variación del flujo de inducción ϕ del campo magnético que lo atraviesa en una unidad de tiempo, lo que se expresa con la siguiente formula:

Para el Sistema Ingles y se expresa en volts (v).

$$E = \frac{\Delta\phi}{\Delta t} \times 10^{-8} \quad (1.8)$$

Para el Sistema Internacional y se expresa en volts (V).

$$E = \frac{\Delta\phi}{\Delta t} \quad (1.9)$$

Dónde:

ϕ Es el flujo en líneas o maxwell (Sistema ingles) o webers (SI).

t Es el tiempo en segundos en el cual se enlazan ϕ líneas.

E Es el voltaje promedio generado por el conductor.

1.2.5 Flujo Magnético.

Se define como el número de líneas de campo magnético que atraviesan una determinada superficie, es representado por la letra griega ϕ y en el Sistema Internacional de Unidades es el weber y se designa por Wb , mientras en el sistema inglés se utiliza el maxwell cuya equivalencia es la siguiente **1 weber = 10^8 maxwells.**

El flujo total en cierta área irregular que es atravesada por un campo magnético heterogéneo está dado por la siguiente ecuación

$$\phi = \int_A B \cdot dA \quad (1.10)$$

Dónde:

dA Es la diferencial del área que atraviesa.

B Es el campo magnético.

ϕ Es el flujo magnético y se expresa en weber o maxwell.

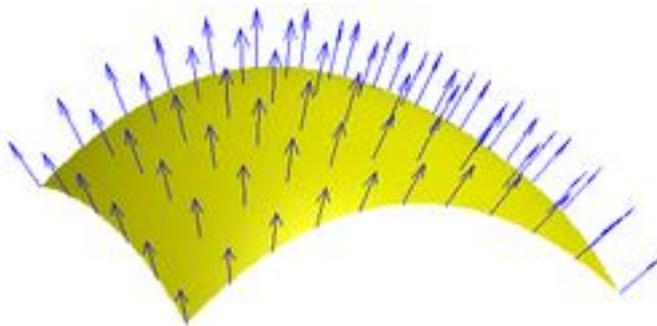


Figura 1-4. Vectores normales a una superficie dada.

Si el vector de densidad de flujo es perpendicular a un plano de área S , y si la densidad de flujo se mantiene constante en toda la superficie, la ecuación 1.10 puede reducirse de la siguiente manera:

$$\phi = B \cdot A \quad (1.11)$$

Dónde:

A Es el área que atraviesa.

B Es el campo magnético.

ϕ Es el flujo magnético y se expresa en weber o maxwell.

En muchos casos el campo magnético no será normal a la superficie, sino que forma un ángulo φ con la normal, por lo que podemos generalizar un poco más tomando vectores y expresando la ecuación de la siguiente forma:

$$\phi = \vec{B} \cdot \vec{A} = |\vec{B}| \cdot |\vec{A}| \cos(\varphi) \quad (1.12)$$

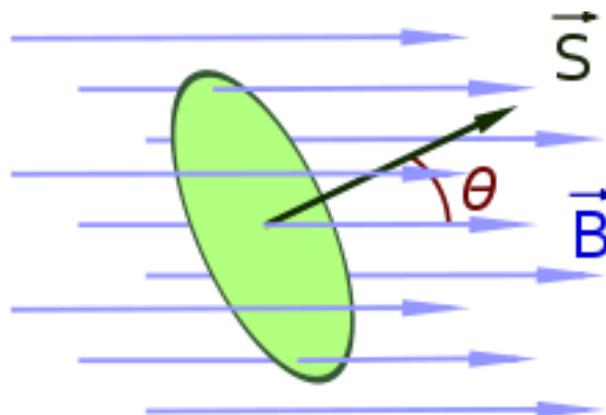


Figura 1-5. Se puede apreciar en ángulo entre los vectores de flujo y la superficie.

1.2.6 Fuerza magnetomotriz.

Es un concepto fácil de entender si se toma como referencia un circuito eléctrico, donde la fuente de voltaje V genera una corriente I a lo largo de la resistencia R , todo relacionado en base a la ley de Ohm.

$$V = R.I \quad (1.13)$$

El voltaje o fuerza electromotriz genera un flujo de corriente, de manera análoga en un circuito magnético se denomina fuerza magnetomotriz (F.M.M.) dicha fuerza magnetomotriz de un circuito magnético es igual al flujo efectivo de corriente que es aplicado al núcleo, se expresa con la siguiente ecuación:

$$F = N.I \quad (1.14)$$

Dónde:

N Es el número de espiras de la bobina.

I Es la intensidad de corriente en amperes (A).

F Es la fuerza magnetomotriz medida en amperes-vuelta (Av).

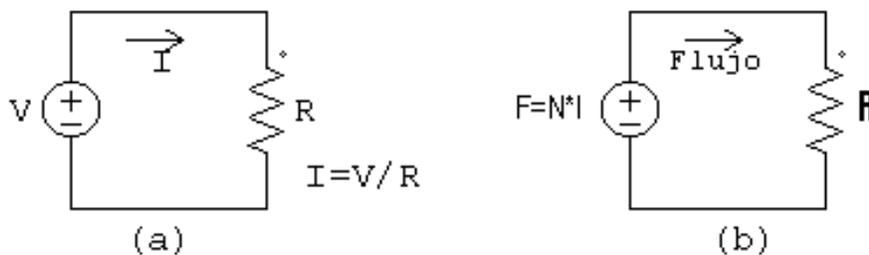


Figura 1-6. Diferencia entre un circuito eléctrico y magnético.

Dicha analogía se puede reafirmar con la figura anterior, en donde se puede observar la simple diferencia entre un circuito eléctrico (a) y un circuito magnético (b). En el circuito eléctrico el voltaje aplicado ocasiona un flujo de corriente I , en forma similar, en un circuito magnético, la fuerza magnetomotriz aplicada ocasiona un flujo ϕ .

Si en el circuito eléctrico la relación entre el voltaje y corriente está dada por la ley de Ohm, en forma semejante en el circuito magnético la relación entre la fuerza magnetomotriz y el flujo magnético se le conoce como reluctancia y es expresado de la siguiente forma

$$F = \phi \cdot R \quad (1.15)$$

Dónde:

F Es la fuerza magnetomotriz del circuito (A.vuelta).

ϕ Es el flujo del circuito expresado en weber (Wb).

R Es la reluctancia del circuito (A.vuelta/Wb).

Con todo esto podemos concluir un paralelismo que existe entre los circuitos eléctricos y magnéticos, simplificado por las ecuaciones 1.13 y 1.15

$F = \phi \cdot R$	$V = R \cdot I$
Fuerza magnetomotriz	Diferencia de potencial
Flujo magnético	Corriente Eléctrica
Reluctancia	Resistencia

1.2.7 Pérdidas en el núcleo.

El núcleo magnético de un transformador está sometido a un núcleo magnético variable y puesto que el material ferromagnético también es un conductor, por el van a circular unas corrientes llamadas corrientes parasitas o de Foucault. Estas corrientes, obedecen a la ley de Lenz y reaccionan contra la variación del flujo que las crea y por lo tanto, reducen el valor efectivo de la inducción magnética originando pérdidas. Con el fin de reducir las pérdidas debidas a las corrientes parasitas, los núcleos de todas las maquinas eléctricas se construyen mediante chapas aisladas de muy poco espesor.

De esta forma, las corrientes parasitas ya no disponen de caminos de baja resistencia eléctrica como lo supondría un núcleo macizo, ya que al estar las chapas aisladas y al tener muy poco espesor, cada una de ellas presenta una resistencia eléctrica elevada y así entre más delgadas sean las chapas del núcleo mayor va a ser la resistencia.

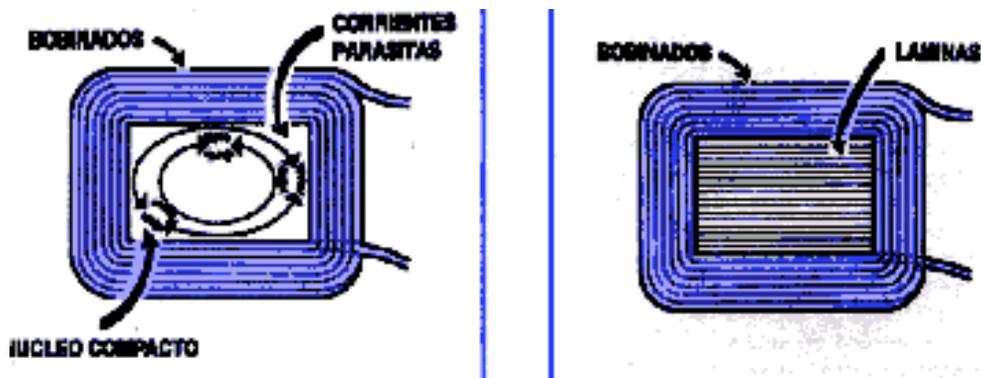


Figura 1-7. Diferencia entre chapas de núcleo laminado y núcleo macizo.

Sabemos que en un transformador ideal, la potencia en el secundario es exactamente igual a la potencia en el primario. En la práctica es imposible encontrar un transformador así. El grado con que un transformador cualquiera se aproxime a estas condiciones ideales, recibe el nombre de eficiencia del transformador y se expresa de la siguiente manera:

$$\eta = \frac{\text{Potencia de entrada}}{\text{Potencia de salida}} \times 100 \quad (1.16)$$

Las pérdidas ocasionadas por la circulación de corrientes parasitas son directamente proporcionales a los cuadrados de la frecuencia del campo magnético y del valor máximo de la densidad de flujo.

$$P_{foucault} = K \cdot f^2 \cdot B_m^2 \quad (1.17)$$

Dónde:

K Es una constante que depende de la clase y espesor de la chapa.

f Es la frecuencia.

B_m Es el valor máximo de la densidad de flujo.

Otro tipo de perdidas, es debido al ciclo de histéresis (*tendencia de un material a conservar sus propiedades, en ausencia del estímulo que las genera*) y se presenta en todos los materiales magnéticos. Este fenómeno parte de dos condiciones generales:

1.- La primera de ellas en vez de aplicar corriente directa al material magnético se aplica un campo alternativo.

2.- La segunda de ellas es que el flujo inicial en el núcleo es cero.

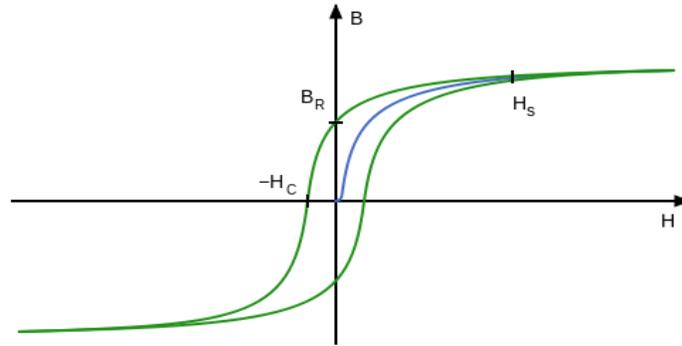


Figura 1-8. Curva de histéresis.

La curva de histéresis muestra la curva de magnetización de un material. Sea cual sea el material específico, la forma tiene características similares.

- ✓ Al principio, la magnetización requiere un mayor esfuerzo eléctrico. Este intervalo es la llamada zona reversible.
- ✓ En un determinado punto, la magnetización se produce de forma proporcional. En ese punto se inicia la denominada zona lineal.
- ✓ Finalmente, se llega un instante a partir del cual, por mucha fuerza magnética que induzcamos al material, ya no se magnetiza más. Este es el llamado punto de inducción de saturación, que determina el inicio de la llamada zona de saturación.

Todo proceso da origen a un calentamiento del material y por tanto una pérdida de potencia y energía que dan como resultado un bajo rendimiento y calentamiento de una maquina eléctrica y dichas perdidas responden a la siguiente expresión:

$$P_{\text{histeresis}} = K \cdot f \cdot B_m^2 \quad (1.18)$$

1.3 CONSTITUCION FISICA DE UN TRANSFORMADOR ELECTRICO.

Un transformador es una maquina eléctrica que transforma la energía eléctrica recibida en otra energía eléctrica con características completamente distintas, que pueden ser de tensión, intensidad o voltaje. El transformador es uno de los equipos eléctricos más utilizados en la electricidad, ya que puede aumentar o disminuir la tensión y puede aislar un circuito de otro.

Básicamente, todos los transformadores están constituidos de la misma manera, al margen de las bobinas o fases que sobre él se enrollen y cómo se enrollen, o del tamaño que tengan, o de la forma de su núcleo. Así pues, en un transformador encontraremos:

- Un núcleo magnético.
- Un arrollamiento o devanado primario o de entrada.
- Un arrollamiento o devanado secundario o de salida.
- Un sistema de enfriamiento.
- Placa de datos.

De la misma manera y en función de la energía a transformar, el transformador estará dotado de un sistema de refrigeración; bien por convección, si intercambia el calor con el aire circundante, o bien de un sistema de refrigeración líquido, si se hace necesario disipar una mayor cantidad de calor.

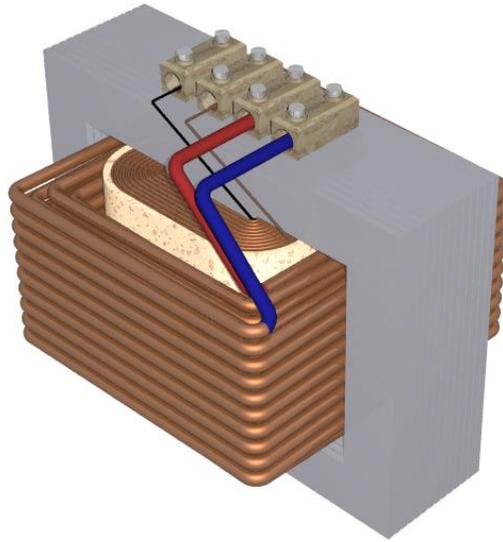


Figura 1-9. Un transformador en su forma general.

El transformador es uno de los equipos eléctricos más utilizados en la electricidad, ya que puede aumentar o disminuir la tensión y aislar un circuito eléctrico de otro; se utiliza la mayor parte de las veces para rebajar la tensión de alimentación a valores más bajos y así poder manipular los circuitos sin riesgos para los usuarios.

El devanado primario es el que recibe la energía y el devanado secundario es el que la cede, al ser una maquina estática, no tiene perdidas mecánicas y por lo tanto puede alcanzar un rendimiento de hasta un 98 %.

Las pérdidas que un transformador eléctrico puede presentar son en el hierro y el cobre, es decir, la chapa magnética y los conductores devanados respectivamente, dichas perdidas

producen caídas de tensión que solo modifican ligeramente la relación de transformación.

Los transformadores eléctricos tienen una cantidad de innumerables aplicaciones, se utilizan en cuadros de mando y control, equipos de soldadura, alumbrado público, redes de alimentación residencial, fuentes de poder, equipos médicos, ignición de calderas, en general en aquellos equipos que precisan adaptar niveles de tensión eléctrica que suministran las compañías a niveles que utilizan los equipos.

Un transformador eléctrico está constituido por dos circuitos eléctricos principales:

- 1.- Circuito eléctrico → Devanado o arrollamiento primario.
→ Devanado o arrollamiento secundario.
- 2.- Circuito magnético → Chapa o núcleo magnético.

1.3.1 Circuito eléctrico de un transformador.

Básicamente está constituido por los arrollamientos primario y secundario.

El arrollamiento o devanado primario está compuesto por una bobina de hilo de cobre principalmente o puede ser aluminio, este

se enrolla en un carrete de plástico o cartón dentro de la chapa magnética.

En un transformador el devanado primario es el que va conectado a la fuente o red eléctrica, independientemente del número de espiras que posea, y por tanto, mayor o menor tensión según sea el caso.

Mientras tanto, el devanado o arrollamiento secundario está constituido por una bobina de hilo esmaltado arrollada a través del núcleo magnético.

A este arrollamiento se le conecta a la carga para utilizar el nuevo nivel de tensión obtenido, mayor o menor sea el caso, suele ser de mayor diámetro que el hilo del devanado primario.

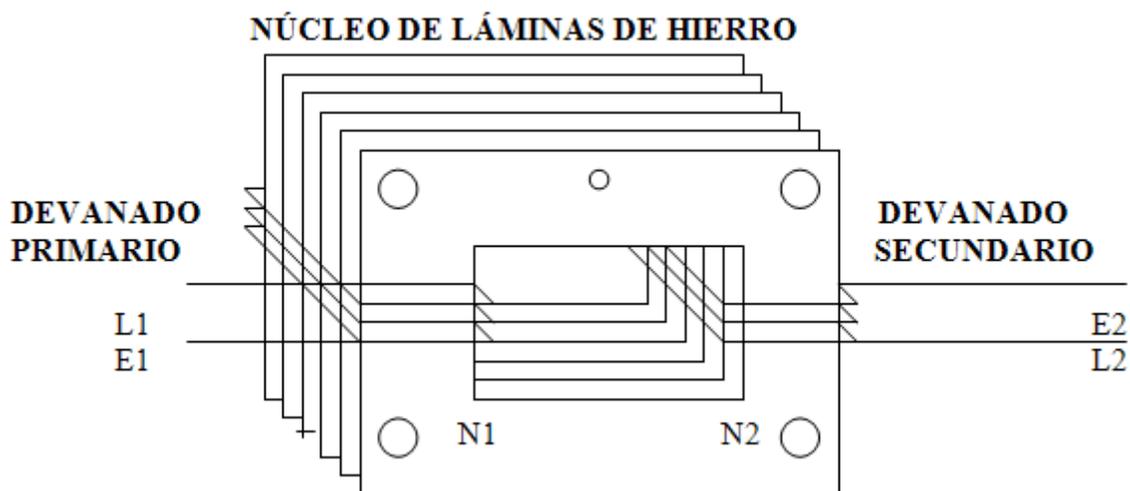


Figura 1-10. Arrollamientos alrededor del núcleo eléctrico de un transformador.

Sin embargo, existen varias disposiciones en las cuales se puede llevar a cabo el arrollamiento, según el número de espiras o los valores de tensión e intensidad que se desea tener tanto en la entrada como en la salida.

✓ **Arrollamientos simétricos**

Es decir, es una disposición simple, el devanado primario y el secundario están montados en distintas figuras del circuito magnético del transformador.

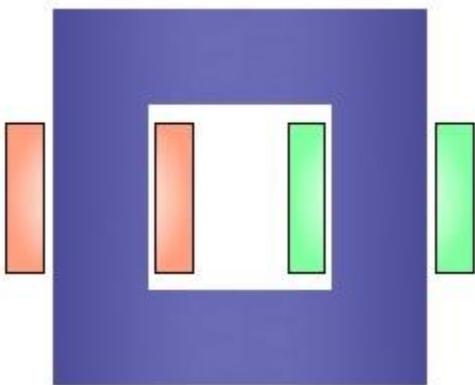


Figura 1-11. Arrollamientos simétricos del transformador.

✓ **Arrollamientos concéntricos**

Es decir, ambos arrollamientos tanto el primario como el secundario, se han montado en una sola columna del circuito magnético del transformador.

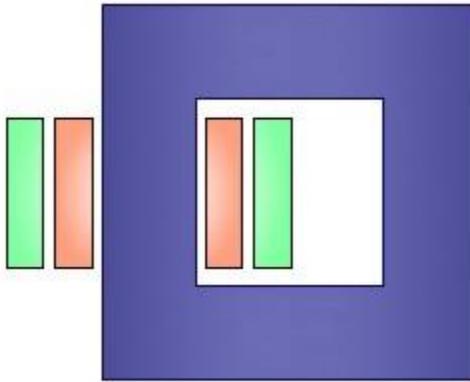


Figura 1-12. Arrollamientos concéntricos del transformador.

✓ **Arrollamientos alterados.**

Es decir, se han arrollado la mitad de las espiras del devanado primario en la columna de la izquierda y la otra mitad en la columna de la derecha, de forma análoga se ha hecho lo mismo con el devanado secundario.

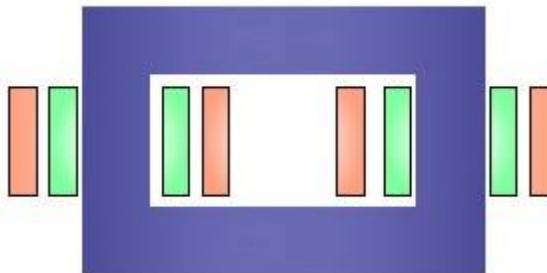


Figura 1-13. Arrollamientos alterados del transformador.

✓ **Arrollamientos acorazados.**

Es decir, ambos arrollamientos están dispuestos en una columna que es la central, en este caso debe cumplirse que la sección de dicha columna sea el doble que la de los extremos para que no

haya pérdida de flujo magnético. El flujo que se establece en la columna central es ϕ , mientras que el flujo en cada una de las extremas es $\phi/2$.

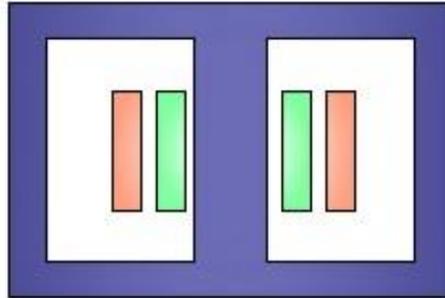


Figura 1-14. Arrollamientos acorazados del transformador.

1.3.2 Circuito magnético de un transformador.

Está compuesto por la chapa magnética formando un empilado que será denominado núcleo magnético, puede adoptar diversas formas dependiendo del tipo de transformador.

Para minimizar las pérdidas en el hierro por las corrientes parasitarias de Foucault, la sección conductora del flujo magnético se divide en pequeñas partes, o láminas y se intercala entre lámina y lámina de acero un papel o barniz aislante.

Las chapas magnéticas se suelen montar a tope o solapadas para evitar la dispersión de flujo y que éste cambie bruscamente de dirección.

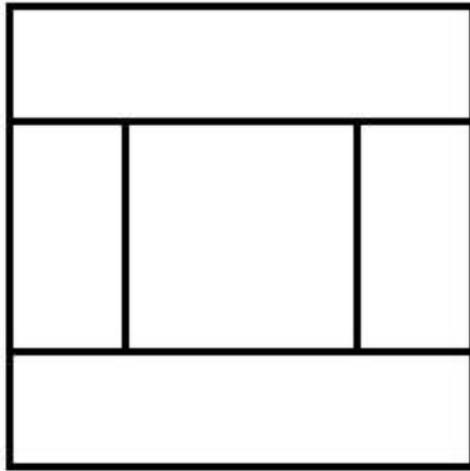


Figura 1-15. Láminas a tope.

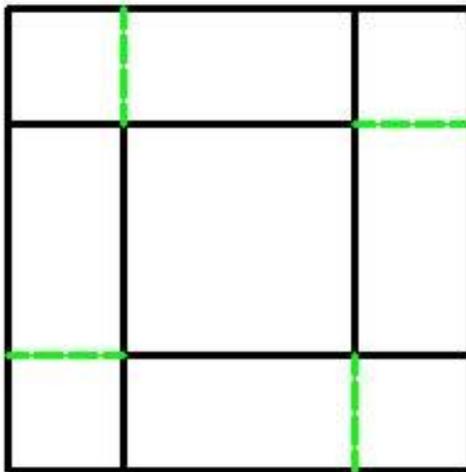


Figura 1-16. Láminas solapadas.

La chapa utilizada con más frecuencia es de acero aleado a base de silicio (Si) del orden del 3 % al 5 %, dicha aportación de silicio tiene las finalidades de reducir la pérdida por histéresis y de aumentar la resistividad del acero.

Con lo último, se logra lógicamente, disminuir las pérdidas por corrientes parasitas. Además el silicio estabiliza la chapa, en el

sentido de prácticamente evitarle el envejecimiento con el tiempo y principalmente por la acción continua del calor.

Actualmente, en la fabricación de transformadores, se emplea, con carácter exclusivo, la chapa magnética de gran orientado. No obstante, hay que tener presente que buen número de los transformadores en servicio se fabrican a base de capa laminada en caliente. El espesor de las chapas utilizadas es de, aproximadamente, 0,35 mm. Las pérdidas por histéresis y por corrientes parasitas suelen darse en voltios por kilogramo de material.

1.3.3 Sistema de refrigeración de un transformador.

Las pérdidas en los arrollamientos, en el núcleo, y en otros elementos que componen al transformador, motivan el calentamiento de la máquina, dicho calentamiento debe limitarse a un nivel mínimo.

Dicha transmisión de calor se hace por un medio en forma más o menos eficiente, dependiendo de los siguientes valores:

- La masa volumétrica.
- El coeficiente de dilatación termina.
- La viscosidad.
- El calor específico.
- La conductividad térmica.

La selección del método de enfriamiento de un transformador es muy importante, ya que la disipación del calor, influye mucho en su tiempo de vida y capacidad de carga, así como en el área de instalación y el costo que pueda llegar a presentar la sustitución del mismo.

Los principales medios refrigerantes que se usan, en contacto inmediato con los arrollamientos del transformador, son el aire y el aceite de tipo mineral; en el caso de este último pueden emplearse otros líquidos incombustibles especiales a los que se les llama askarel (*aceite oscuro, no flamable, utilizado como aislante y refrigerante*).

Gracias a la primera definición del párrafo anterior, se pueden denotar en una primera clasificación los tipos de refrigeración de un transformador de la siguiente forma:

1. Transformadores en seco.
2. Transformadores en baño de aceite.

1.3.3.1 Refrigeración de los transformadores en Seco.

Los transformadores secos de uso general se aplican en sistemas de distribución de baja tensión donde parte de la carga tiene un voltaje suministrado por la distribución general. Pueden ser sistemas de iluminación, aire acondicionado, equipos médicos, etc.

Estos se fabrican en capacidades desde los 5 hasta los 1000 kVa, con tensiones primarias y secundarias de clase 1.2 kV y pueden ser de tipo Reductor o Elevador.

Estos transformadores de aislamiento separan magnéticamente una carga especial del sistema de distribución general, eliminando distorsiones de la onda senoidal, garantizando una buena conversión del nivel de tensión, se fabrican en las mismas capacidades que los de uso general.

Los transformadores en seco, al estar libres de un dieléctrico como lo es el aceite, únicamente dependen del aire de la zona donde estén instalados para enfriarse y gracias a ello poseen las siguientes ventajas:

- Reconectable en el lado primario: 480 ó 440 Vca.
- Voltaje en el lado secundario: 220Y/127 Vca.
- Mantenimiento mínimo.
- Libre de contaminantes.
- Amigables con el ambiente ya que elimina el uso de aceite mineral.
- Sin riesgo de incendio, libre de fugas de aceite.
- Seguridad para el instalador y el usuario.
- Alta resistencia a los esfuerzos electromecánicos de corto circuito.
- Excelente capacidad para soportar sobrecargas.

- Cumple con los estándares de regulación ambiental NOM e ISO14001.
- No genera emisiones de CO₂.
- Compacto: Misma capacidad, menor tamaño.
- Facilidad para el instalador: Sin accesorios como boquillas, cambiador de derivaciones, indicador de nivel de aceite y válvulas de sobrepresión.
- Permite una inspección visual interna a los componentes activos.



Fuente: Manual Comercial de Transformadores Eléctricos. Voltran 2011.

Figura 1-17. Un transformador en seco.

Estos tipos de transformadores principalmente, poseen las siguientes dimensiones en milímetros (mm), según la capacidad de carga:

Capacidad (kVA)	Largo (mm)	Ancho (mm)	Alto (mm)
15	577	394	777
30	620	478	846
45	620	478	846
75	702	563	916
112.5	702	563	916
150	880	563	916

Fuente: Catalogo Comercial de Transformadores Eléctricos. Voltran México 2010-2012.

Tabla 1-1. Capacidades de los transformadores en base a sus dimensiones.

1.3.3.2 Refrigeración de los transformadores en aceite.

La eficiencia de la refrigeración es un factor fundamental, determinando la seguridad operacional y el periodo de vida útil de un transformador eléctrico.

En la actualidad, los transformadores más sobresalientes son los de aceite en los cuales el propio transformador, o así la llamada parte desmontable, es decir, su núcleo va sumergido en aceite; ya que este tiene una mejor conductividad térmica y posee un mayor calor específico.

En este tipo de enfriamiento el conjunto del núcleo y devanados van sumergidos en una caja o tanque lleno de aceite, el dieléctrico que se calienta en contacto con el núcleo y las bobinas tiene la

libertad de movimiento y así puede eliminar el calor ya sea por convección o por radiación.

La refrigeración externa de la caja, puede efectuarse por convección natural o en otro caso se consigue disponiendo de ventiladores que activen la circulación del aceite, ello motiva la clasificación a:

- Transformadores con refrigeración natural.
- Transformadores con refrigeración forzada.

La selección del método de enfriamiento de un transformador es muy importante, ya que la disipación del calor, como ya se hizo mención anteriormente, influye en su tiempo de vida, coste de mantenimiento y capacidad de carga; en base a ello se han implementado normas americanas llamadas "ASA C57-1948" ya normalizadas que definen algunos métodos de enfriamiento y se mencionan a continuación:

- Tipo AA. Son transformadores tipo seco con enfriamiento propio, estos transformadores no contienen aceite ni otros líquidos para enfriamiento, el aire es también el medio aislante que rodea el núcleo y las bobinas, por lo general se fabrican con capacidades inferiores a 2000 kVA y voltajes menores de 15 kV.

- Tipo AFA. Son transformadores tipo seco con enfriamiento por aire forzado, se emplea para aumentar la potencia disponible de

los tipo AA y su capacidad se basa en la posibilidad de disipación de calor por medio de ventiladores o sopladores.

- **Tipo AA/FA.** Son transformadores tipo seco con enfriamiento natural y con enfriamiento por aire forzado, es básicamente un transformador tipo AA al que se le adicionan ventiladores para aumentar su capacidad de disipación de calor.

- **Tipo OA.** Son transformadores sumergidos en aceite con enfriamiento natural, en estos transformadores el aceite aislante circula por convección natural dentro de un tanque que tiene paredes lisas o corrugadas o bien provistas con tubos radiadores. Esta solución se adopta para transformadores de más de 50 kVA con voltajes superiores a 15 kVA.

- **Tipo OA/FA.** Son transformadores sumergidos en líquido un aislante con enfriamiento propio y con enfriamiento por aire forzado, es básicamente un transformador OA con la adición de ventiladores para aumentar la capacidad de disipación de calor en las superficies de enfriamiento.

- **Tipo OA/FOA/FOA.** Son transformadores sumergidos en líquido aislante con enfriamiento propio con aceite y aire forzado, con este tipo de enfriamiento se trata de incrementar el régimen de operación de carga de transformador tipo OA por medio del empleo combinado de bombas y ventiladores. Se fabrican en capacidades de 10000 kVA monofásicos 15000 kVA trifásicos.

- **Tipo FOA.** Son transformadores sumergidos en líquido aislante con enfriamiento por aceite forzado y de aire forzado. Estos transformadores pueden absorber cualquier carga de pico a plena capacidad ya que se usa con los ventiladores y las bombas de aceite trabajando al mismo tiempo.

- **Tipo OW.** Son transformadores sumergidos en líquido aislante con enfriamiento por agua, en estos transformadores el agua de enfriamiento es conducida por serpentines, los cuales están en contacto con el aceite aislante del transformador y se drena por gravedad o por medio de una bomba independiente, el aceite circula alrededor de los serpentines por convección natural.

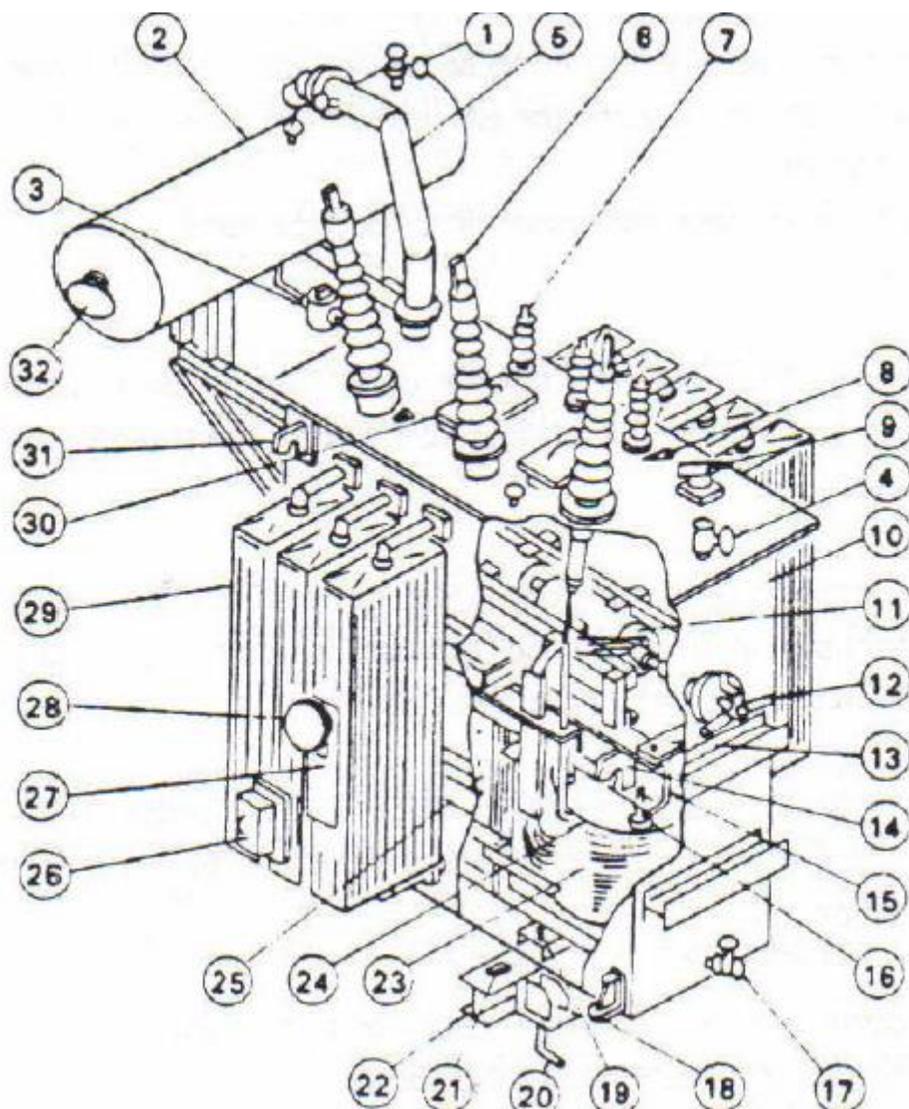
- **Tipo FOW.** Son transformadores sumergidos en líquido aislante con enfriamiento de aceite forzado y con enfriadores de agua forzada. Este tipo de transformadores es prácticamente igual que el FO, sólo que el cambiador de calor es del tipo agua - aceite y se hace el enfriamiento por agua sin tener ventiladores.



Figura 1-18. Un transformador en aceite.

1.3.4 Partes constitutivas del transformador

Para conocer físicamente a los transformadores es necesario mencionar las partes principales y auxiliares que lo conforman, de tal forma como se demuestra en la siguiente figura:



Fuente: Operación y Mantenimiento de Transformadores de Potencia. Abba. 2009.

Figura 1-19. Diagrama físico de un transformador.

La tabla muestra los nombres de los componentes del transformador que se representa en la figura anterior:

Numero	Nombre del componente
1	Válvula de filtro de aceite
2	Tanque concertador
3	Relevador de buchholz
4	Válvula de filtro de aceite
5	Ducto de válvula de alivio
6	Boquillas de alta tensión
7	Boquillas de baja tensión
8	Ganchos de suspensión
9	Terminal
10	Tanque
11	Cambiador de derivaciones
12	Manija del cambiador de derivaciones
13	Sujeción del núcleo y bobinas
14	Gancho de sujeción de núcleo y bobinas de ensamble
15	Herraje
16	Tornillo de presión de aceite
17	Válvula de drenaje de aceite
18	Rieles de enlace
19	Tope
20	Tornillo de base
21	Terminal de tierra
22	Base de apoyo o rolar
23	Bobina
24	Placa de presión de bobina
25	Núcleo
26	Caja de terminales para dispositivos de protección
27	Placa de datos
28	Caratula de termómetro
29	Radiadores
30	Agujero de inspección
31	Gancho de levantamiento
32	Caratula de nivel de aceite

Fuente: Nombres de los componentes del transformador eléctrico, obtenida de Manual Técnico de la compañía española Abba (2009).

Tabla 1-2. Componentes del transformador eléctrico.

1.3.5 Datos de Placa de un Transformador eléctrico.

La placa de características o de fabricante constituye la fuente principal de información nominal acerca del transformador, en ella se encuentran los datos más importantes que son necesarios para poner transformador en servicio, para llevar a cabo sus mantenimientos o reparaciones.

El contenido de la placa y la forma en la que se presenta la información de las características del transformador dependerán en gran parte del fabricante, pero en concreto siempre se tienen los principales datos de operación del transformador para su uso adecuado.

La placa de datos, será metálica y fabricada en acero inoxidable para una mayor duración, será fijada al fondo del compartimiento de conexiones y principalmente deberá contener la siguiente información del transformador.

- Nombre del fabricante.
- Número de serie.
- Año de fabricación.
- Numero de fases.
- Frecuencia.
- Capacidad en KVA.
- Voltaje nominal en el lado primario (V).
- Voltaje nominal en el lado secundario (V).

- Voltaje nominal en cada derivación. (V).
- Nivel básico de aislamiento.
- Aumento promedio de la temperatura en devanados (°C).
- Temperatura ambiente promedio diaria (°C).
- Impedancia (%).
- Peso total aproximado (Kg).
- Diagrama de conexión unifilar (Delta o Estrella).
- Litros aproximados del líquido aislante.

A continuación se muestra un ejemplo de los datos que puede presentar la placa de un transformador en su forma general, esto dependiendo del país y compañía fabricante:

Transformadores Tusan Ltda.		AVDA RAMON FREIRE 6030 SANTIAGO - CHILE		TRANSFORMADOR		FABRICACION CHILENA	
Nº	773.0355.015	ALTA TENSION		ELEVACION MAX. TEMP.			
AÑO	1989	TENSION NOM		LIQ. AISL.	0 °C		
NORMA	CHILENA	CONMUTADOR VOLTS		ENROLLADO	5 °C		
POTENCIA	2000 KVA	P	1	SOBRE AMB	40 °C		
NIVEL AISL.	10 KV	O	2	ALT MAX.	00 m		
FASES		S	3	ESTANQUE			
FRECUENCIA	50 Hz	I	4	LIQ. AISL.			
CONEXION		C	5	LIQ. AISL.	1		
POLARIDAD	INVERTIDA	BAJA TENSION		PESO TOTAL	40		
IMPR A 75°C	%	VOLTS		PLACA Nº	N7.852012		
NIVEL DE ACEITE mm DESDE BORDE SUPERIOR ESTANQUE							
FABRICADO BAJO LICENCIA DE SIEMENS A. G.							

Fuente: Fotografía tomada de un transformador de potencia, fabricado a cargo de Siemens Chile.

Figura 1-20. Placa de datos de un transformador Tusan.

1.4 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE UN TRANSFORMADOR ELECTRICO.

El transformador basa su operación mutua en la acción entre fenómenos físicos y químicos, a excepción de los mecanismos para cambio de derivaciones o la impulsión de ventiladores para los sistemas de enfriamiento; la transferencia de energía eléctrica por inducción electromagnética de un arrollamiento a otro, dispuesta en el mismo circuito magnético, se realiza con un buen rendimiento.

El principio de operación de los transformadores eléctricos se basa en teorías de inducción electromagnética que se han basado en la Ley de Faraday; al alimentar el bobinado primario con una fuente de voltaje alterno, por el bobinado circulará una corriente eléctrica alterna I_1 , que produce una **fuerza magnetomotriz** que causa que se establezca un flujo de líneas de fuerza alterno Φ_1 en el **circuito magnético del transformador.**

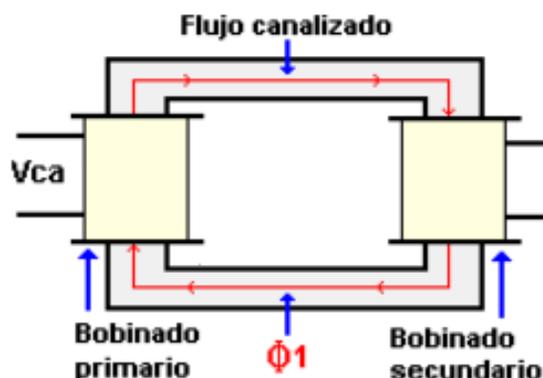


Figura 1-21. Flujo de líneas provocado por la corriente alterna suministrada.

El flujo Φ_1 al estar canalizado en el núcleo, induce en las espiras del bobinado secundario una **fuerza electromotriz** E_2 .

Las espiras del bobinado primario también están en la influencia del Φ_1 . Por lo tanto en ellas se va a inducir una **fuerza contra electromotriz** E_1 , que se opone al voltaje de alimentación, dando como resultado una disminución de la intensidad de corriente I_1 .

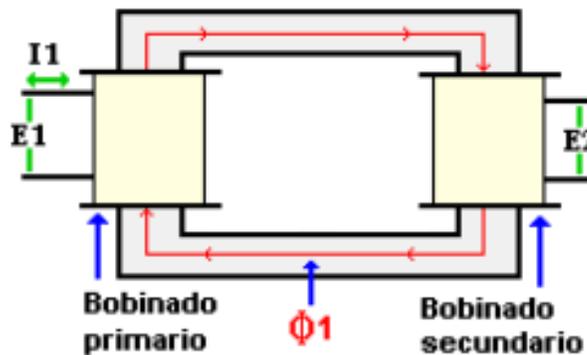


Figura 1-22. Disminución de corriente I_1 por influencia de flujo en el bobinado primario.

$$E_1 = 4.44 \times \Phi \times F \times N_1 \quad (1.19)$$

$$E_2 = 4.44 \times \Phi \times F \times N_2 \quad (1.20)$$

Cuando se le aplica carga R al bobinado secundario, circula por él la intensidad de corriente I_2 , la cual produce el **flujo magnético** Φ_2 , opuesto al Φ_1 , por lo tanto reduce el flujo resultante en el

núcleo dando como resultado que la **fuerza contra electromotriz** disminuya y la intensidad de corriente I_1 aumente.

Se puede observar como un aumento de la corriente en el secundario I_2 provoca un aumento de la corriente en el primario I_1 , sin que exista conexión eléctrica entre ambos bobinados.

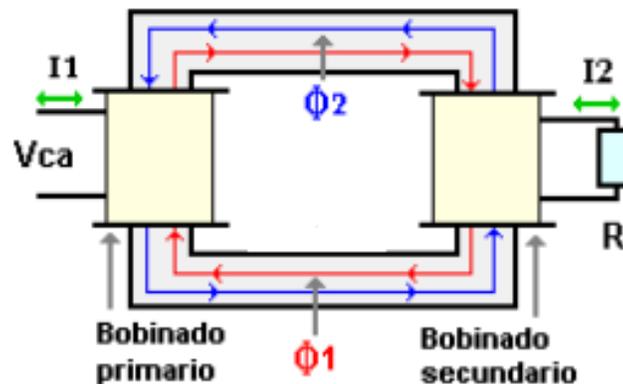


Figura 1-23. Aumento de corriente en ambos bobinados del transformador.

Dado que la **fuerza contra electromotriz** es directamente proporcional al flujo inductor Φ_1 , al disminuir éste, por la contraposición del Φ_2 , se da un incremento en la corriente I_1 .

Las fuerzas electromotrices (F.E.M.) se inducen por la variación del flujo magnético, las espiras y el circuito magnético están en reposo uno con respecto al otro, mientras tanto las F.E.M. se inducen por la variación de la magnitud del flujo con el tiempo; el núcleo al estar formado de chapas de acero superpuestas y con

un aislamiento propio tiene en uno de sus lados un devanado y en el lado opuesto el otro devanado.

Cada arrollamiento puede ser considerado como primario o secundario, y puede funcionar como transformador reductor o elevador, solo dependiendo cuál de los dos arrollamientos es el que recibe la energía o el que suministra la carga.

1.4.1 Fuerza electromotriz inducida en vacío.

El flujo ϕ al pasar por el circuito que está constituido por el núcleo de hierro o acero, y esta a su vez conformado por los devanados primario y secundario, en cada uno de ellos se debe inducir la misma F.E.M. por espira y la F.E.M. total debe de ser proporcional al número de espiras que lo componen.

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (1.21)$$

Siendo E_1 y E_2 las F.E.M. inducidas en el devanado primario y devanado secundario, y N_1 y N_2 los números de espiras de cada uno de ellos respectivamente. En los transformadores comunes, la tensión en las terminales difiere solamente de la F.E.M. inducida en un porcentaje muy pequeño, de modo que para muchos casos prácticos puede decirse que las tensiones en las terminales del primario y del secundario son proporcionales a sus números de espiras.

Teniendo en cuenta la senoidal entre el flujo y tiempo, la relación entre el valor eficaz y valor medio de la F.E.M. eficaz es dada por la siguiente ecuación y se expresa en Volts

$$E = 4.44 \times F \times N \times \phi_m \times 10^{-8} \quad (1.22)$$

1.4.2 El transformador Ideal.

El funcionamiento y las aplicaciones de un transformador se comprenden de mejor forma siempre y cuando sea considerando como un dispositivo ideal, esta simplificación se refiere a definir los términos del transformador y comprender el funcionamiento del mismo.

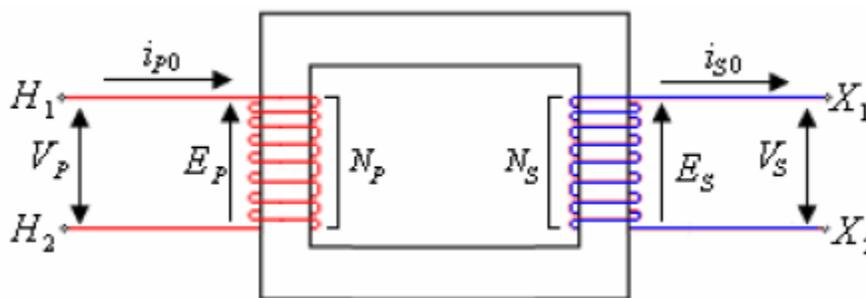
Estos transformadores ideales aparecen en los modelos circuitales o circuitos equivalentes de los transformadores reales y de otras máquinas eléctricas; las diferencias entre los transformadores ideales y los reales no suelen ser muy grandes. No obstante estas pequeñas diferencias se deben tener en cuenta en la mayoría de los casos.

Los transformadores ideales pueden ser monofásicos, trifásicos, o multicircuitos y generalmente tienen las siguientes propiedades:

- a) Sus arrollamientos no tienen resistencia ($r = 0$).
- b) Su núcleo no posee pérdidas ($P_{Fe} = 0$).

- c) La permeabilidad del núcleo es infinita ($\mu = 0$).
- d) No tiene capacidades parasitas.
- e) Su flujo de fuga e inductancia son nulos.
- f) No contiene reactancia.
- g) Sus impedancias propia y mutua son cero.
- h) Su coeficiente de acoplamiento K es la unidad.
- i) Su eficiencia es del 100 %.

Generalmente un transformador ideal, se acostumbra a representarlo como un circuito acoplado, tal y como se ve en la siguiente figura:



Fuente: Trabajo profesional de especialidad "Ing. Adrián Hernández Zamorano". 2009

Figura 1-24. Esquema de un transformador ideal.

Los puntos que se ven en los extremos de cada arrollamiento se le denominan bornes y se emplean para su estudio en circuitos acoplados, cuando se aplica un voltaje de V_p de variación senoidal al devanado primario, circula una corriente i_o formada por dos componentes (I_{pm}) y $I(h+e)$.

Si V_p varia en forma senoidal la corriente de magnetización lo hace como un circuito inductivo, es decir, como una función

coseno y originando así el flujo (Φ) que eslabona en los devanados primario y secundario.

$$\Phi = \theta_{max} \cos \omega t \quad (1.23)$$

Dónde:

θ_{max} Es el flujo que circula en el núcleo.

ω Es la velocidad angular "2 πf " expresada en Radianes/segundo.

Según la Ley de Faraday el voltaje inducido se expresa como:

$$V_E = -N \frac{\partial \Phi}{\partial t} \quad (1.24)$$

Aplicada al devanado primario del transformador se tiene:

$$V_E = \theta_{max} \operatorname{sen} \omega t \frac{\partial(\omega t)}{\partial t} N_p \quad (1.25)$$

Por lo tanto el valor instantáneo es:

$$V_E = 2\pi f N_p \operatorname{sen} \omega t \theta_{max} \quad (1.26)$$

Si **$\operatorname{sen} \omega t = 1$** , tenemos el valor máximo para la tensión inducida.

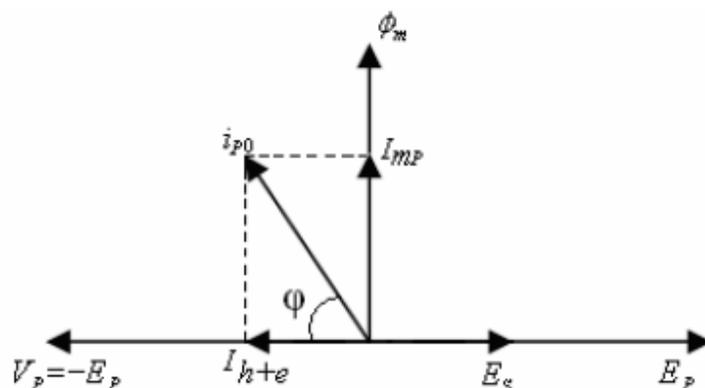
$$E_{max} = 2\pi f N_p \theta_{max} \quad (1.27)$$

El valor eficaz se obtendrá dividiendo la Ec. 1.27 entre $\sqrt{2}$.

$$E_p = 4.44 N_p f \theta_{max} \quad (1.28)$$

1.4.2.1 Diagrama fasorial de un transformador ideal.

Se puede comprender el funcionamiento de un transformador ideal con ayuda del diagrama eléctrico y fasorial que son herramientas que nos describe su comportamiento cuando opera bajo ciertas condiciones y no representa magnitudes reales solo ideales.

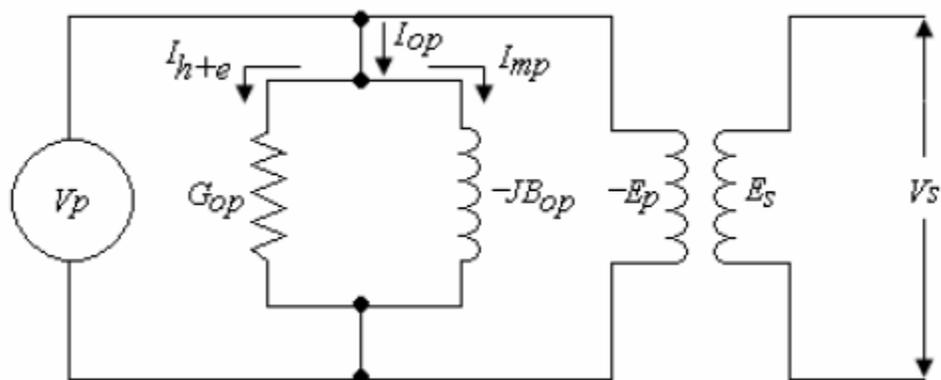


Fuente: Sitio Web de internet especializado en Transformadores Eléctricos.

Figura 1-25. Diagrama fasorial de un transformador ideal.

Primeramente se trazan las tensiones E_p , E_s que están en fase y son inducidas por el Φ_{max} originando I_{mp} (en fase).

Se puede observar la magnitud de $-E_p$ que es igual a V_p , con un signo negativo por la Ley de Lenz, en fase con V_p la corriente de pérdidas que es $I(h+e)$ y con dicha composición vectorial de ambas corrientes se traza el vector i_{p0} .



Fuente: Trabajo profesional de especialidad "Ing. Adrián Hernández Zamorano". 2009

Figura 1-26. Circuito equivalente de un transformador ideal.

1.4.3 El transformador Real.

El funcionamiento de un transformador real es sumamente diferente a un transformador ideal, debido a que aquí no se carece de pérdidas en el núcleo de hierro del transformador; sino que hablamos de casos prácticos de la vida cotidiana.

Las diferencias entre el transformador ideal y el transformador real, aunque son sumamente importantes, no son demasiado complicadas para poder comprenderlas y se basan principalmente en los componentes que conforman a un transformador real.

Como sabemos el paso de la electricidad a través de un conductor produce calor, y en el caso del transformador, no es la excepción; este calor se considera una pérdida de potencia o rendimiento para

el transformador y se puede calcular para tener de forma más clara las tensiones e intensidades que se estarán manejando.

Los transformadores reales presentan las siguientes características:

	Sin embargo...
$R > 0$	Son pequeñas.
$P_{Fc} > 0$	Son pequeñas.
$\mu_{Fc} < \infty$	Es muy elevada.
$C > 0$	Son muy pequeñas.

Fuente: Libro de Maquinas Eléctricas de Irving Kosow (1996).

Tabla 1-3. Características del transformador real.

Si estas diferencias son pequeñas, aun así deben ser consideradas en la mayoría de los casos de estudio, una pequeña conclusión de la tabla mostrada anteriormente es que el rendimiento aunque sea muy elevado, resulta menos que la unidad (100 %) por las caídas de tensión que se lleguen a producir que son generalmente muy pequeñas.

Los transformadores prácticos o reales tienen pérdidas en las bobinas debido a que tienen una resistencia, así mismo, los núcleos de las bobinas no son infinitamente permeables y el flujo generado en la bobina primaria no es capturado por la bobina secundaria cuando hablamos de un transformador real.

Si no existiesen pérdidas, como se estudió en el transformador ideal no sería indispensable tener en cuenta el flujo de dispersión o las corrientes parasitas y pérdidas por histéresis que aumentan el calor y la temperatura del transformador; pero todas estas diferencias nos hacen ver que el estudio de un transformador real es más complejo.

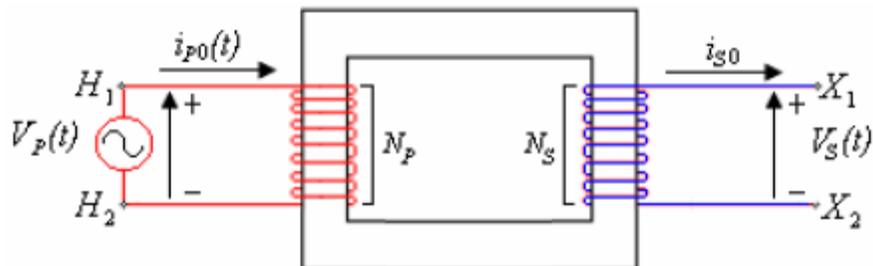


Figura 1-27. Esquema de un transformador real.

Al igual que en caso del transformador ideal, la base de funcionamiento del transformador real se basa en la Ley de Faraday.

$$V_E = \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (1.29)$$

Dónde:

ϕ Es el flujo magnético de la bobina por el cual se induce la tensión.

El flujo ligado total es la suma de los flujos que pasan por cada una de las vueltas de la bobina, sumando tantas veces cuantas vueltas tenga dicha bobina, por lo que la Ley de Faraday se puede expresar:

$$V_E = N \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (1.30)$$

Para realizar el cálculo de un transformador real, podemos utilizar la siguiente imagen para su estudio.

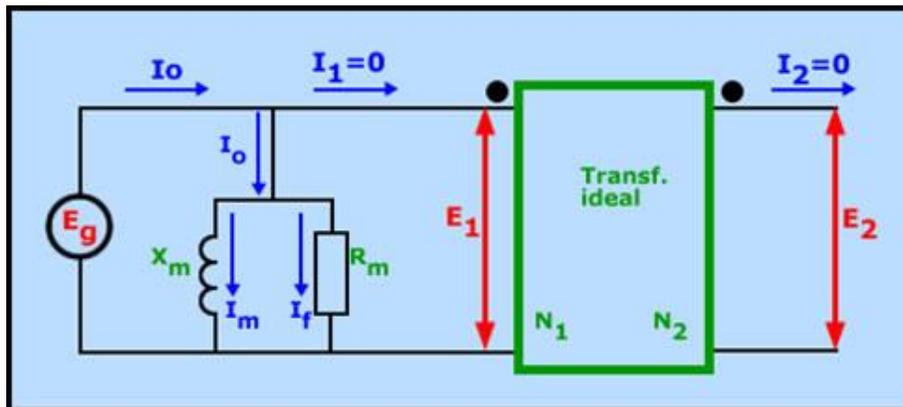


Figura 1-28. Representación de la reactancia y resistencia del transformador.

Como se puede ver en el dibujo la resistencia R_m y la reactancia X_m se han introducido para poder calcular las pérdidas del núcleo, el calor producido y la permeabilidad del núcleo. Para el caso de R_m , se representa el calor producido y las pérdidas en el núcleo ya que por dicha resistencia para una intensidad I_f que está en fase con E_1 .

Mientras tanto, para el caso de X_m , se usa para representar la permeabilidad que posee el núcleo, ya que por X_m circula una intensidad I_m que se encuentra con un retraso de 90° respecto a E_1 , esta intensidad es indispensable para conocer el flujo Φ_m en el núcleo de la bobina primaria.

$$R_m = \frac{E_1^2}{P_m} \quad (1.31)$$

Dónde:

R_m Es una resistencia y representa las pérdidas del núcleo.

E_1 Es el voltaje de la bobina primaria.

P_m Son las pérdidas del núcleo.

$$X_m = \frac{E_1^2}{Q_m} \quad (1.32)$$

Dónde:

X_m Es una reactancia y representa la permeabilidad del núcleo.

E_1 Es el voltaje de la bobina primaria.

Q_m Es la potencia reactiva necesaria para obtener el flujo Φ_m .

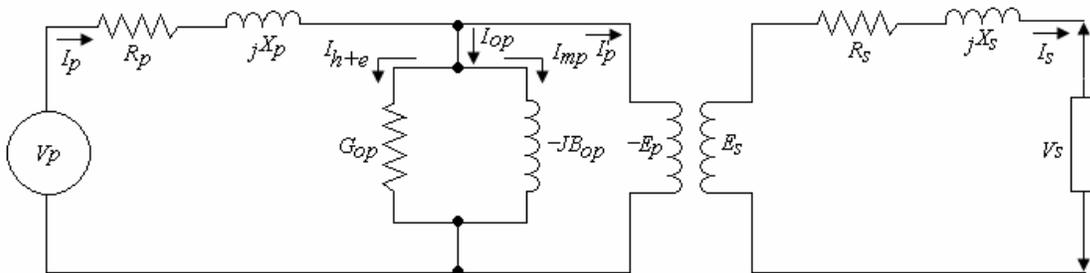
Retomando el circuito que está en la imagen anterior, también se puede observar que se dispone de una intensidad I_o , que representa la suma de las intensidades I_f e I_m ; dicha intensidad I_o es denominada intensidad de excitación porque es la necesaria para producir el flujo Φ_m y cuya ecuación es simplemente un despeje de la ecuación 1.28, quedando se la siguiente forma:

$$E_p = 4.44N_p f \theta_{max} \quad \rightarrow \quad E_1 = 4.44N_1 f \theta_m$$

$$\theta_m = \frac{E_1}{4.44N_1 f} \quad (1.33)$$

1.4.3.1 Diagrama fasorial de un transformador real.

Debido a la reactancia y la resistencia que posee el devanado primario, se toman en cuenta las caídas de tensión, el diagrama fasorial muestra cómo se comporta y con ello determina las magnitudes vectoriales.



Fuente: Trabajo profesional de especialidad "Ing. Adrián Hernández Zamorano". 2009

Figura 1-29. Circuito equivalente del transformador real.

La conductancia G_{op} y la susceptancia $-jB_{op}$ que el núcleo posee, se determinan en forma experimental en una prueba de vacío, los parámetros del secundario son considerados cuando se conecta la carga.

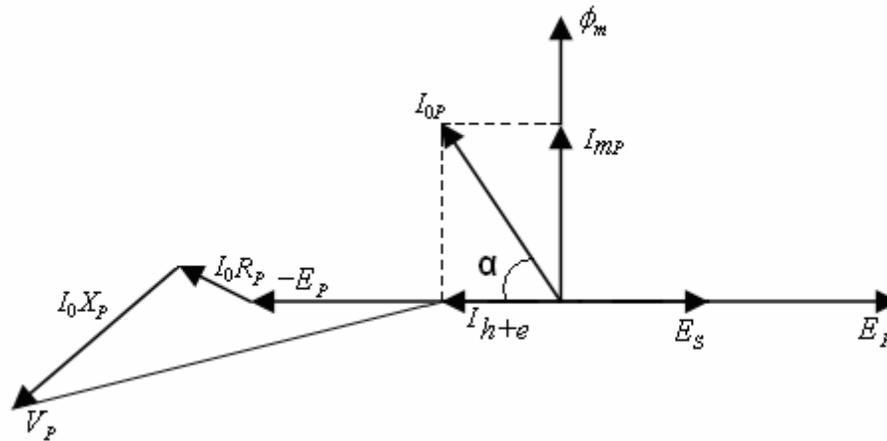


Figura 1-30. Diagrama fasorial de un transformador real.

1.4.4 Relaciones de transformación.

Las relaciones de transformación se representan con la letra griega alpha "α" estas indican el aumento o decremento que sufre la tensión de salida con respecto a la tensión de entrada, esto quiere decir, la relación entre la tensión de salida y la tensión de entrada.

Para poder deducirlas, se parte de la relación entre la fuerza magnetomotriz inductora F.M.M.1 aplicada al devanado primario y la fuerza magnetomotriz inducida F.M.M.2 obtenida del secundario, ya que ambas son las mismas.

$$F.M.M.1 = F.M.M.2 \quad (1.34)$$

Según la Ley de Maxwell-Ampere

$$F.M.M.1 = N * I_1 \quad (1.35)$$

$$F.M.M.2 = N * I_2 \quad (1.36)$$

Entonces la Ec. 1.31 quedaría de la siguiente forma

$$N_1 * I_1 = N_2 * I_2 \quad (1.37)$$

Despejando, tenemos

$$\alpha = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1} \quad (1.38)$$

Dónde:

N_1 Es el número de espiras del lado primario.

N_2 Es el número de espiras del lado secundario.

I_2 Es la corriente del lado primario.

I_1 Es la corriente del lado secundario.

La relación entre la tensión V_1 aplicada al lado primario del transformador y la tensión V_2 inducido sobre su lado secundario es:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} = \alpha \quad (1.39)$$

Por lo tanto, de forma general la relación de transformación entre la tensión, número de espiras y corriente tanto del lado primario (1) y lado secundario (2) quedara se la siguiente forma:

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1} = \frac{V_1}{V_2} = \alpha = \frac{E_1}{E_2} \quad (1.40)$$

1.4.5 La eficiencia de un transformador.

Los transformadores eléctricos como toda máquina eléctrica también se compara y valoran de acuerdo con su eficiencia o rendimiento, este se puede obtener por medio de la siguiente ecuación:

$$\eta = \frac{P_{salida}}{P_{entrada}} \times 100 \quad (1.41)$$

Sin embargo, la potencia de entrada es

$$P_{entrada} = P_{salida} + P_{perdida} \quad (1.42)$$

Entonces

$$\eta = \frac{P_{salida}}{P_{salida} + P_{perdida}} \times 100 \quad (1.43)$$

La ecuación 1.43 es aplicada para otros tipos de máquinas eléctricas, de igual forma a los transformadores. Los circuitos equivalentes de un transformador eléctrico facilitan mucho los cálculos de la eficiencia; existen tres tipos de pérdidas que se representan en los transformadores eléctricos y son los siguientes:

- Perdidas en el cobre.
- Perdidas por histéresis.
- Perdidas por corrientes parasitas.

Puesto que la potencia de salida de un transformador está dada por:

$$P_{salida} = V_2 I_2 \cos\varphi \quad (1.44)$$

La eficiencia de un transformador bajo alguna carga dada puede calcularse sumando las pérdidas de cada resistencia y aplicando la ecuación 1.43 y se denotaría por:

$$\eta = \frac{V_2 I_2 \cos\varphi}{V_2 I_2 \cos\varphi + (P_v + P_c)} \times 100 \quad (1.45)$$

Sin embargo, el término dentro del paréntesis representa las perdidas tanto fijas P_c como variables P_v que se tienen durante la transferencia de potencia; dichas perdidas fijas son las perdidas en el núcleo y las perdidas variables son las perdidas en el cobre.

$$\eta = \frac{V_2 I_2 \cos\varphi}{V_2 I_2 \cos\varphi + (P_{nucleo} + P_{cobre})} \times 100 \quad (1.46)$$

1.5 CONDICIONES DE OPERACIÓN DE UN TRANSFORMADOR ELECTRICO.

El transformador eléctrico es una máquina de gran rendimiento, dicha maquina se conecta a la red al comenzar su servicio y generalmente no se desconecta a menos de que sea por avería, maniobra o alguna necesidad concreta.

Esto ocurre pocas veces en la vida de la mayor parte de los transformadores eléctricos y algunos de ellos pueden no cumplir con esto y tener abundantes salidas de servicio de forma anormal.

En todas las maquinas eléctricas es necesario reducir las pérdidas, pero en el transformador eléctrico esto se hace más patente, sobre todo con las perdidas en el hierro que son constantes e independientes de la carga del secundario.

Todos los transformadores se comportan de forma diferente cuando operan si carga o con carga y por ello a continuación se describirá cada una de estas condiciones.

1.5.1 Transformadores sin carga.

También conocidos como transformadores en vacío, este tipo de máquinas presentan otro tipo de pérdidas debido al efecto Joule de la corriente al circular por el devanado primario, pero este valor es despreciable y en la práctica esta pérdida no se evalúa.

Si se le aplica una tensión V_1 al devanado primario, circulara una corriente i_o a la cual se le denominara corriente de vacío. Esta corriente que circula por las espiras primarias N_1 va a producir un flujo principal:

$$\phi = \Delta N_1 i_o \quad (1.47)$$

Dicho flujo varía senoidalmente e inducirá en el primario y en el secundario las fuerzas electromotrices.

$$E_1 = -N_1 \frac{d\phi}{dt} \quad (1.48)$$

$$E_2 = -N_2 \frac{d\phi}{dt} \quad (1.49)$$

Debido a el tipo de aislamiento, las espiras del devanado primario N_1 no pueden estar perfectamente unidas al núcleo, por esta pequeña separación pasaran líneas de campo que no son concatenadas por el secundario y cierran el aire, a las que llamaremos flujo disperso del primario ϕ_{d1} .

La fuerza electromotriz E_2 se puede medir en vacío por lo que también se le podrá llamar "tensión secundaria en vacío" $V_2 = E_2$.

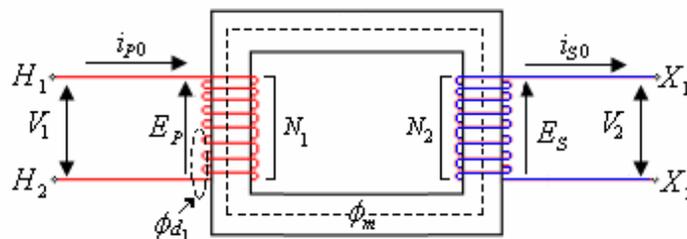


Figura 1-31. Transformador en vacío.

1.5.2 Transformadores con carga.

Al conectarse una carga en el devanado secundario, es recorrido por una corriente, que tendrá el valor y el desfase determinado por la naturaleza o tipo de receptor. Esta corriente y la que corresponde al devanado primario producen caídas de tensiones; también producen pérdidas en los devanados por efecto Joule.

Estas pérdidas y las pérdidas del núcleo, serán la diferencia entre la potencia absorbida de la red primaria y la suministrada en la red secundaria que es impuesta por el receptor.

Cuando el transformador se encuentra sin carga o en vacío y se le aplica una tensión V_1 al lado primario, se tiene en el lado secundario una tensión que prácticamente está con V_1 en la misma proporción dependiendo de la relación de espiras N ; sin embargo, cuando está conectado a una carga, al suministrar la tensión V_1 al lado primario, la tensión del lado secundario ya no será la misma debido a las caídas de tensión existentes.

La carga eléctrica que será conectada al transformador es de acuerdo a sus características con un factor de potencia determinado, ya sea en atraso o adelanto. La carga será para el lado secundario lo que condicione su operación y será reflejada en el lado primario, la corriente que demande la carga conectada obliga a tener una mayor cantidad de flujo que permita mantener la frecuencia entre ambos devanados.

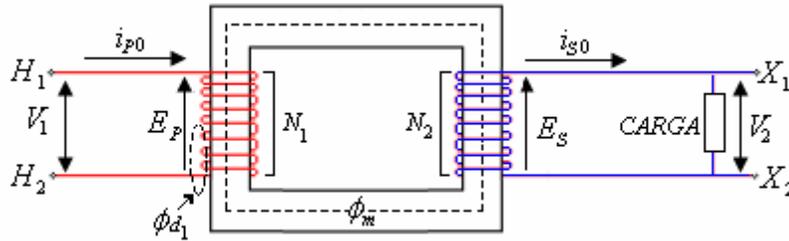


Figura 1-32. Transformador con carga.

1.5.3 Regulación de tensión de un transformador

Para obtener la regulación de tensión en un transformador se requiere entender las caídas de tensión que se producen en su interior.

El circuito equivalente del transformador real nos muestra los efectos de la rama de excitación en la regulación de tensión del transformador puede ignorarse, por tanto solamente las impedancias en serie deben tomarse en cuenta.

La regulación de tensión de un transformador depende tanto de la magnitud de estas impedancias como del ángulo fase de la corriente que circula por el transformador.

La regulación de tensión, es la variación de la tensión en el secundario, expresada en % de la tensión nominal del mismo, que se produce al conectar una carga y manteniendo constante la tensión aplicada al primario, luego entonces tenemos:

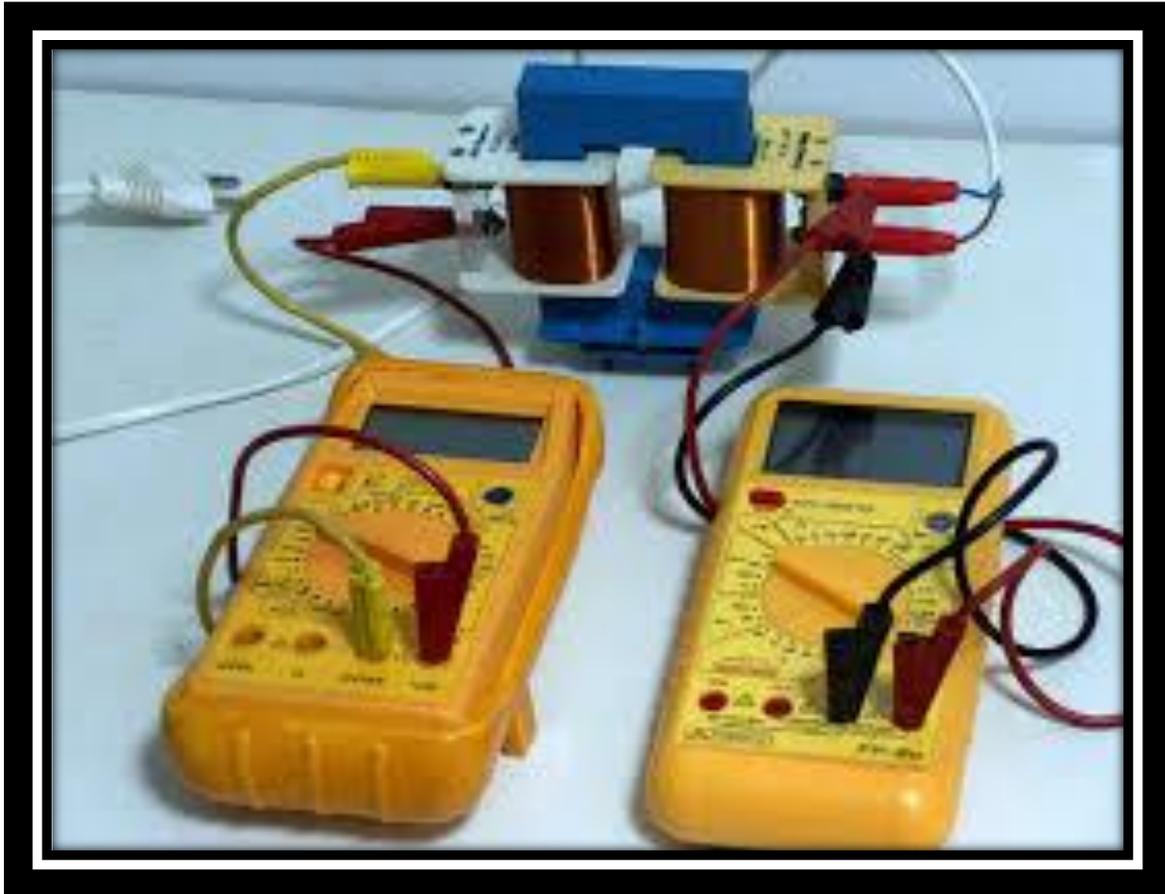
$$\% Reg = \frac{E_2 - V_2}{V_2} \times 100 \quad (1.50)$$

Dónde:

E_2 Es la tensión primaria nominal a plena carga.

V_2 Es la tensión secundaria sin carga.

CAPÍTULO 2



TIPOS, NORMAS Y CONEXIONES DE LOS TRANSFORMADORES ELÉCTRICOS.

2.1 INTRODUCCIÓN.

En el capítulo anterior se definieron algunos de los principales conceptos teóricos que rigen el funcionamiento de un transformador eléctrico, así mismo se realizó una clasificación y explicación de su funcionamiento, se mencionaron de igual forma sus partes constitutivas.

Recordando que el transformador eléctrico, es una maquina eléctrica que nos permite aumentar o reducir el nivel de tensión eléctrica que es suministrado; y está compuesta por dos bobinas una primaria y secundaria respectivamente de un material conductor al cual por un lado se le suministra una tensión y en el lado final obtendremos un valor específico deseado según su empleo.

En este apartado que se mencionarán algunos de los tipos de transformadores eléctricos existentes, además de las conexiones que se aplican a los transformadores eléctricos y la utilización de normas utilizadas en la CFE (Comisión Federal de Electricidad), PEMEX (Petróleos Mexicanos) y la extinta compañía de Luz y Fuerza del Centro debido a que los transformadores son máquinas pasivas, es difícil determinar el estado físico de uno en relación a otro y es necesario hacer una comparación de normas para poder obtener resultados satisfactorios en su funcionamiento.

2.2 TIPOS Y CLASIFICACIÓN DE TRANSFORMADORES ELÉCTRICOS.

Los transformadores eléctricos pueden estar destinados a diversas funciones según el tipo que se esté utilizando, algunos pueden transformar potencias de cierta consideración manteniendo frecuencias fijas u otros pueden ser previstos para trabajar con tensiones o frecuencias diversas e inclusive en funcionar como equipos de protección para algunos aparatos eléctricos.

Es por esa razón y por la gran cantidad de aplicaciones que puedan tener en la industria, que se han clasificado en diversos tipos según su nivel de voltaje o uso que puedan tener y a continuación hare mención de cada uno de ellos.

Clasificación de los transformadores eléctricos	
Según su funcionalidad:	- Transformadores de potencia.
	- Transformadores de comunicación.
	- Transformadores de medida y protección.
Según su sistema de tensión:	- Transformadores monofásicos.
	- Transformadores trifásicos.
	- Transformadores hexafasicos.
Según la tensión del secundario:	- Transformadores elevadores.
	- Transformadores reductores.

Según el medio ambiente de utilización:	- Transformadores para interiores.
	- Transformadores para exteriores.
Según su elemento refrigerante:	- Transformadores en seco.
	- Transformadores en baño de aceite.
	- Transformadores con Pyraleno.
Según su medio de refrigeración:	- Transformadores con refrigeración natural.
	- Transformadores con refrigeración forzada.

Fuente: Elaboración propia en base a investigación en sitios web y el libro de Transformadores de Potencia, Medida y Protección; Ed. Alfaomega.

Tabla 2-1. Muestra la clasificación de los transformadores en función de su utilización.

2.2.1 Transformadores según su funcionalidad.

- ✓ **Transformadores de Potencia:** tiene como finalidad principal facilitar el transporte de la energía eléctrica en alta tensión.

Generalmente estos transformadores están instalados en subestaciones para la distribución de la energía eléctrica, efectuando la tarea intermediadora entre las grandes centrales de generación y los usuarios domiciliarios o industriales; que consiste en reducir los altos niveles de voltaje con el cual es transmitida la energía a magnitudes de voltaje inferiores, que permiten derivar circuitos a los usuarios en medias o bajas tensiones.

También se da una aplicación similar, en las grandes centrales de generación, donde los transformadores de potencia, elevan los niveles de voltaje de la energía generada a magnitudes de voltaje superiores, con el objeto de transportar la energía eléctrica en las líneas de transmisión.

Las tasas de eficacia se encuentran normalmente por encima del 99% y se obtienen utilizando aleaciones especiales de acero para acoplar los campos magnéticos inducidos entre las bobinas primaria y secundaria.

Características Generales: Este tipo de transformadores se construye en potencias normalizadas que va desde 1.25 hasta 20 MVA, en tensiones de 132 kVA y frecuencias de 50 y 60 Hz.



Figura 2-1. Transformador de potencia.

- ✓ **Transformadores de comunicación.** “Son aquellos transformadores que son diseñados para trabajar con tensiones y frecuencias diversas y pueden usarse en circuitos de la técnica de la comunicación”¹¹.

Este tipo de transformadores diseñados para la comunicación, a su vez se subdividen en otros tipos que son los siguientes:

1. **Transformadores de frecuencia variable:** Son pequeños transformadores con un núcleo de hierro que funciona en la banda de auto frecuencias y a menudo son usados como dispositivos de acoplamiento en circuitos electrónicos para comunicaciones, medidas y control.

Sus principales funciones son las de elevar tensiones contribuyendo así a la ganancia total en amplificadores, y las de actuar como transformadores de impedancias para conseguir la relación óptima entre la impedancia aparente de una carga y la de su alimentador.



Figura 2-2. Transformador de frecuencia variable.

¹¹ Delta Transformadores. *Manual Técnico Delta. Monterrey México.*

2. Transformadores de energía: su principal función es consiste en modificar la tensión de una red doméstica 127 VCA a un nivel tal que, cuando se aplique y está, correctamente filtrada pueda emplearse para que los dispositivos de la radio sean alimentados.
3. Transformadores de entrada: Son aquellos transformadores que funcionan entre la fuente de tensión de corriente alterna C.A. y la primera válvula de vacío o transistor de amplificación del amplificador de audio.



Figura 2-3. Transformadores de entrada.

4. Transformadores de salida: Generalmente este tipo de transformadores para una etapa de salida tiene una relación reductora, debido a que la impedancia del altavoz es relativamente baja en comparación a la impedancia de un amplificador.



Figura 2-4. Transformadores de salida.

5. Transformadores de radiofrecuencia: este tipo de transformadores son muy especiales, puesto que son un tipo de transformadores que operan a una frecuencia muy superior a la gama del audio.

Además de eso, funcionan con potencias más inferiores que los transformadores de audio, generalmente siempre existe un condensador, formando un circuito sintonizado que puede atenuar cualquier frecuencia menos la deseada.



Fuente: Catalogo de venta de equipo electrónico STEREN (2008).

Figura 2-5. Transformador de radiofrecuencia.

- ✓ **Transformadores de Medida y Protección:** “Permiten principalmente facilitar la conexión adecuada de aparatos de medida o de protección como relés y contadores en los circuitos de alta tensión, reduciendo los valores elevados de tensión o intensidad a otros menores pero proporcionales para así poder realizar medidas”¹².

Son muy utilizados por las ventajas que trae ya que si se desea realizar mediciones a magnitudes grandes de corriente y tensión se requeriría de equipos robustos, muy costosos y a la vez peligrosos

¹² Delta Transformadores. *Manual Técnico Delta. Monterrey México.*

sabiendo que van a estar constantemente manipulados por las personas.

Características generales: Antes que nada es indispensable saber diferenciar cuales son los transformadores destinados a alimentar aparatos de medida y cuales a alimentar aparatos de protección, los aparatos de medida son destinados a medir corrientes normales sin que, ante valores anormales tengan que provocar respuestas correctoras y no suelen soportar valores muy grandes de intensidad; por lo tanto en los transformadores de medida desearemos que el Factor de Seguridad sea lo más pequeño posible y están destinados para los siguientes usos según su precisión:

Transformadores para medida	
Clase de precisión	Usos generales
0.1	- Mediciones de laboratorio (Más precisión).
0.2	- Contadores de precisión, en especial para grandes potencias de elevadas tensiones. - Casos que son de prever factores de seguridad bajos. - Mediciones de laboratorio. - Patrones portátiles.
0.5	- Contadores normales. - Aparatos de medida. - Reguladores sensibles.
1	- Amperímetros. - Voltímetros. - Fasímetros.

Fuente: Datos obtenidos en catálogo de pruebas realizadas a transformadores Delta, para determinar el uso final.

Tabla 2-2. Usos de transformadores de medida en base a su precisión.

Mientras tanto los aparatos de protección necesitan en todo momento un valor fidedigno de la magnitud de tensión para poder operar en todo momento, la relación de transformación debe ser siempre constante independientemente de la intensidad del bobinado primario y se logra con un núcleo magnético que no sea saturable; por lo tanto en los transformadores de protección desearíamos un Factor de seguridad lo más grande posible y sus usos más generales son los siguientes:

Transformadores para protección	
Clase de precisión	Usos generales
5p	<ul style="list-style-type: none"> - Relés diferenciales. - Relés de distancia. - Relés direccionales. - Relés de contacto a tierra. - En general todos aquellos equipos que afecte un error de ángulo.
10p	<ul style="list-style-type: none"> - Relés ordinarios de protección y otros. - En general aquellos equipos que no les afecte un error de ángulo.

Fuente: Datos obtenidos en catálogo de pruebas realizadas a transformadores Delta, para determinar el uso final.

Tabla 2-3. Usos de transformadores de protección en base a su precisión.



Fuente: Manual Técnico, Delta Transformadores. Monterrey México.

Figura 2-6. Transformadores con protección.

2.2.2 Transformadores según su sistema de tensión.

- ✓ **Transformadores monofásicos:** cuentan con una fase de entrada y otra de salida, este tipo de transformadores frecuentemente son empleados para suministrar energía eléctrica para alumbrado residencial, toma corrientes, acondicionamiento de aire, y calefacción.

Los transformadores monofásicos pueden ser todavía más versátiles si tienen tanto el devanado primario como el devanado secundario fabricados en dos partes iguales. Las dos partes de cualquiera de los devanados pueden entonces ser reconectadas en serie o en paralelo.

Características generales: son fabricados con un núcleo cerrado de acero al silicio, donde se pueden tener dos devanados o enrollados de alambre de cobre desnudo que es protegido por un barniz aislante, uno de ellos corresponde al devanado primario o de entrada y el otro al devanado secundario o de salida; ambos devanados pueden situarse juntos o separados y pueden usarse para 12, 24, 60, 110, 127 y 220 Volts respectivamente.

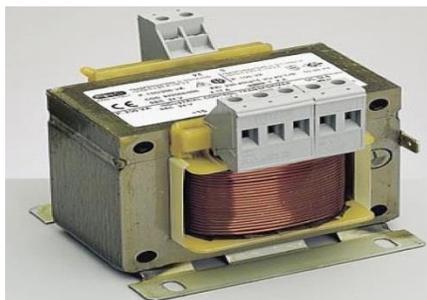


Figura 2-7. Transformador monofásico.

- ✓ **Transformadores trifásicos:** Este tipo de transformadores eléctricos es el de más extensa aplicación en los sistemas de transporte y distribución de energía eléctrica ya consta de tres devanados primarios y tres devanados secundarios; se construye para potencias nominales sumamente elevadas.

Se puede decir que este transformador está constituido por tres transformadores monofásicos montados en un mismo núcleo magnético común; mientras que los principios de operación impuestos en los sistemas monofásicos son aplicables también a los trifásicos, solo que ahora se aplicaran a casa una de las fases de los mismos.

Características generales: Este tipo de transformador es el más empleado, se le encuentra diseñado para pequeñas potencias que van de 10 kVA hasta muy grandes 150 MVA. Como elevadores de tensión en las centrales, reductores en las subestaciones, de distribución en ciudades, barrios, fábricas, etc.



Figura 2-8. Transformador trifásico seco.

- ✓ **Transformadores hexafasicos:** Este tipo de transformadores se le conoce como hexafasicos debido a que posee 6 fases en el lado secundario; se diferencia constructivamente del trifásico, en que tiene una derivación a la mitad de los devanados secundarios, y luego por supuesto, en la conexión entre ellos.

Características generales: Se utiliza para la rectificación industrial y en tracción eléctrica de subterráneos, tranvías, metro y son diseñados para un trabajo de operación con tensiones promedio de 13200/580 Volts.



Figura 2-9. Transformadores hexafasicos.

2.2.3 Transformadores según la tensión del secundario.

- ✓ **Transformadores elevadores:** este tipo de transformadores principalmente son empleados por empresas de generación eléctrica en las subestaciones de la red de transporte de energía eléctrica, con el fin de disminuir las pérdidas por efecto Joule.

Es decir, son elementos eléctricos a los cuales se les suministra un nivel de tensión en la entrada o devanado primario y se van a arrojar una tensión mucho más elevada en el lado secundario; debido a la elevada resistencia de los conductores, conviene transportar la energía eléctrica a tensiones elevadas.

Características generales: Este tipo de transformadores al estar en contacto con las subestaciones generadoras de energía eléctrica, operan con un nivel superior a los 1000 kVA.



Figura 2-10. Transformador elevador de tensión.

- ✓ **Transformadores reductores:** Como mencionamos, los transformadores elevadores, "se encargan para transportar la energía eléctrica, cuando esta llega a zonas residenciales o comercios es necesario reducirla nuevamente para adaptarla a

tensiones que puedan ser útiles, de ese trabajo se encargan los transformadores reductores¹³.

Sin embargo, ambos tipos de transformadores reductores y elevadores pueden operar de la misma forma a su vez, es decir, si se tiene un transformador 220/127 V y se conecta el lado primario a una tensión de 220 V por el lado secundario obtendremos un nivel de 127 V; pero si el lado secundario lo conectamos a una fuente de 127 V por el lado primario obtendremos 220 V a la salida.

Características generales: Este tipo de transformadores generalmente opera de 240/120 V, 480/240 V, 48/24 V, 32/16 V y 24/12 V.



Figura 2-11. Transformador reductor de tensión.

¹³ Gilberto Harper Enríquez. *Pruebas y mantenimiento a equipos eléctricos*. México DF. Editorial Limusa. 2005.

2.2.4 Transformadores según el medio ambiente de utilización.

- ✓ **Transformadores para interior:** Este no es un tipo de transformador con características específicas, puede ser tanto elevador o reductor; sin embargo únicamente está diseñado para operar en interiores.

Características generales: en la mayoría de los casi siempre va acompañado con un sistema de enfriamiento adicional como aceite o conjunto de ventiladores.



Figura 2-12. Transformador para interiores.

- ✓ **Transformadores para exteriores:** al igual que el caso anterior, puede ser un tipo no específico de transformadores, puede ser tanto elevador como reductor de voltaje y está diseñado para poder operar a la intemperie.

Características generales: Estos transformadores eléctricos en la mayoría de veces operan a un nivel máximo de 40 kVA y pueden contar con sistema de enfriamiento por aceite o simplemente por el aire del exterior.



Figura 2-13. Transformador para exteriores.

2.2.5 Transformadores según con su elemento refrigerante.

- ✓ **Transformadores en seco.** Para este tipo de transformadores el principal medio de enfriamiento es el aire de la intemperie, de ahí es donde parte el nombre "Seco" ya que no trabajan con ningún otro sistema de enfriamiento.

Estos transformadores son equipos totalmente diseñados para colocarse cerca de los centros de carga para mejorar la regulación del voltaje en instalaciones industriales, comerciales y residenciales; y obtener los más altos niveles de eficiencia.

“Los transformadores en seco se utilizan principalmente en sistemas de iluminación, aires acondicionados, ventilación y calefacción de plazas comerciales y hoteles, oficinas, desarrollos y conjuntos habitacionales, fábricas, minas, plantas petroquímicas entre otras aplicaciones”¹⁴.

Características principales: Se fabrican de acuerdo a los requisitos de la norma mexicana NMX-J-351, son creados para operar a temperatura ambiente entre 30° C y 40° C y un nivel de tensión en el devanado primario máximo de 480 VCA con gabinetes autoventilados de acero al carbón.



Fuente: Catalogo de transformadores comerciales de la compañía ABB (2007).

Figura 2-14. Transformadores tipo seco.

¹⁴ Nessler, Herbert, *Constitución y funcionamiento del transformador*, Barcelona España. Marcombo. Siemens Aktiengesellschaft. 1990.

- ✓ **Transformadores en baño de aceite:** Este tipo de transformadores está diseñado para operar acompañados de un sistema particular de enfriamiento que consiste en estar sumergidos en un tanque el cual contiene un aceite mineral que permite la disipación del calor producida en el núcleo del transformador y así disminuir las pérdidas por calentamiento.

Tiene ciertas ventajas respecto a los transformadores en seco, puesto que el costo unitario del mismo es mucho menor, casi a la mitad que uno en seco de la misma potencia y tensión, posee un nivel menor de ruido, tiene un mayor control de funcionamiento y una mayor resistencia a las sobretensiones y sobrecargas excesivamente prolongadas.

Características generales: este tipo de transformadores se construye en todas las potencias y tensiones, sin embargo para tensiones superiores a los transformadores de distribución siguen siendo con depósito o tanque conservador.



Figura 2-15. Transformadores con baño en aceite.

- ✓ **Transformadores con Pyraleno:** En este tipo de transformadores el principal medio de enfriamiento es un dieléctrico empleado al que se lo conoce como Askarel, sin embargo no es tan usual ya que es muy riesgoso el Pyraleno y debe estar alejado de las zonas de incendio. Actualmente este tipo de dieléctrico está siendo sustituido por otros medios de enfriamiento como lo es el aceite silicona o el LDP 138.

Características generales: el difenil policlorado o mejor conocido como Pyraleno en función a otros dieléctricos tiene menores ventajas como se compara en la siguiente tabla:

°C	Aceite mineral	Askarel	Aceite silicona	LDP 138
Temperatura de inflamación	150-175	Ninguna	343-360	310
Autoinflamacion	330	660	430	435

Fuente: Datos comparativos obtenidos del libro de Transformadores de potencia, medida y protección de Enrique Ras 7ma Edición.

Tabla 2-4. Comparación de las ventajas del Pyraleno.



Figura 2-16. Transformadores con enfriamiento tipo Pyraleno.

2.2.6 Transformadores según su modo de refrigeración.

- ✓ **Transformadores con refrigeración natural:** este tipo de transformadores lleva unas aletas que facilitan la disipación del calor asociado a las pérdidas, también la parte sumergida del transformador puede ir sumergida en aceite en un tanque o caja, esta caja puede tener una superficie considerable.

Características generales: Dicha caja debe ser construida con ondas, tubos o radiadores adosados que permitan eliminar el calor por convección y radiación.



Figura 2-17. Transformadores con refrigeración natural.

- ✓ **Transformadores con refrigeración forzada.** En este tipo de sistema de enfriamiento de transformadores se dispone de un sistema de ventiladores que activen la circulación del aire, es muy útil especialmente cuando se tiene radiadores para hacer más fácil la circulación del aire o del aceite, dependiendo de cuál sea el caso.

Características generales: Al integrarle un sistema de refrigeración forzado, puede ampliar su capacidad según sea "aire forzado" en un 150 % más y si es "aceite forzado" desde un 200 % más; cuando son sistemas combinados de ventilación y bombeo el transformador está en la capacidad de ampliar su eficiencia hasta un 200 % ya que logra disipar una gran cantidad de calorías por segundo (Cal/s).



Figura 2-18. Transformador con sistema de refrigeración forzada.

2.2.7 Otras clasificaciones de transformadores.

✓ **Transformadores secos encapsulados con resina epoxica.**

Este tipo de transformadores se emplean principalmente para distribuir energía eléctrica en media tensión en lugares con poco espacio, donde los requerimientos de seguridad no hacen posible la utilización de transformadores refrigerados por aire u aceite.

Se utilizan principalmente en grandes edificios como hospitales o centros comerciales, y toda actividad que requiera de la utilización intensiva de energía eléctrica.

Características generales: tiene una principal característica y es que son refrigerados en aire con aislación, usando resina epoxica como protección de los arrollamientos lo cual hace innecesario cualquier mantenimiento posterior a la instalación, se emplea en potencias normalizadas desde 2500 kVA.



Figura 2-19. Transformadores con resina epoxica.

- ✓ **Transformadores herméticos de llenado integral.** Este tipo de transformadores son empleador en la intemperie o interiores para la distribución de energía eléctrica, son sumamente útiles en los espacios reducidos.

Su aplicación principal es en zonas urbanas, minería, industrias petroleras y en general, en cualquier tipo de aplicación comercial que use una intensiva tensión eléctrica.

Características generales: este tipo de transformadores no lleva consigo un tanque de expansión de aceite por lo que no necesita mantenimiento, lo que favorece una fabricación más compacta del mismo y se emplea para potencias normalizadas desde 100 hasta los 1000 kVA y frecuencias de 50 y 60 Hz.

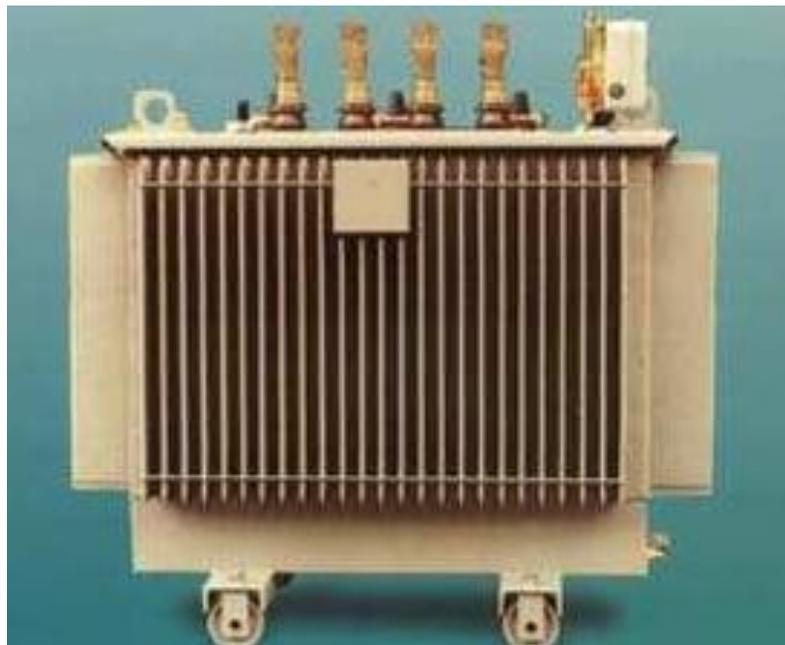


Figura 2-20. Transformador hermético.

- ✓ **Transformadores auto protegidos.** Este tipo de transformadores comprenden desde su etapa de diseño, elementos de protección contra sobrecargas, sobretensiones y elementos para aislarlo de la red en caso de fallas internas o externas; los elementos siguientes brindan protección y son:
- El pararrayo o DSP (Dispositivo de Protección contra Sobre tensiones Transitorias) que lo protege de descargas atmosféricas y/o maniobras de swicheo desviándolas a tierra.
 - Fusibles de protección "Link" que es un eslabón de aislamiento y opera para desconectar el transformador de servicio, en caso de falla interna este componente se funde y evita así futuras re-energizaciones.
 - Fusible de expulsión que actúa como una protección de sobre corriente aislando el transformador fallado de la red.
 - Interruptor que provee al transformador un grado de protección de sobrecargas y/o corto-circuitos externos, ya sea en el lado primario o secundario.

Características generales: se fabrican para potencias de 10 kVA a 75 kVA monofásicos y entre 30 kVA a 225 kVA trifásicos.

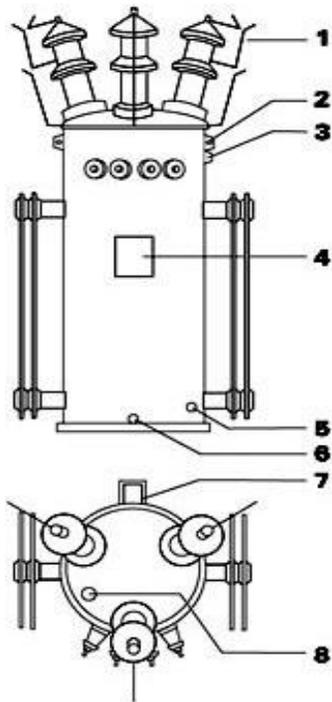


Figura 2-21. Transformador auto-protegido.

- ✓ **Transformadores rurales:** este tipo de transformadores están diseñado para ser utilizados en las redes de electrificación rural, son aptos para ser instalados a la intemperie, directamente sobre un poste de madera u hormigón. Están fabricados en baño de aceite mineral, herméticos, sin tanque de expansión ni secador de aire.

Características generales: su diseño es para redes suburbanas monofilares, bifilares y trifilares de 7.6, 13.2 y 15 kV, también pueden ser trifásicos trabajando a un máximo de 63 kVA.

Las partes que componen principalmente a este tipo de transformadores para uso rural, se muestran en el siguiente plano



1. Explosores
2. Cáncamos de elevación.
3. Conmutador de tensión.
4. Conector de puesta a tierra.
5. Chapa de características.
6. Tapón de desagote.
7. Bridas de sujeción a poste.
8. Tapa de llenado y toma de muestras.

Fuente: Tomada de la siguiente liga electrónica <http://www.weg.net/mx/Productos-y-Servicios/Generacion-Transmision-y-Distribucion-de-Energia/Transformadores>

Figura 2-22. Componentes del transformador rural.



Figura 2-23. Transformador rural.

- ✓ **Transformador subterráneo:** Este tipo de transformadores está diseñado en su forma de construcción para ser instalado en cámaras, en cualquier nivel, pudiendo ser utilizado donde haya posibilidad de inmersión de cualquier naturaleza.

Características generales: se diseñan para trabajar a una potencia que va de 150 a 2000 kVA máxima y a alta tensión de entre 15 y 24.2 kV.



Figura 2-24. Transformador subterráneo.

- ✓ **Los autotransformadores:** es una maquina eléctrica, de construcción y características similares a las de un transformador, sin embargo este posee un único devanado alrededor de un núcleo ferromagnético; este devanado debe tener al menos tres puntos de conexión eléctrica.

La fuente de tensión y la carga se conectan a dos de las tomas, mientras que la toma del extremo del devanado es una conexión común a ambos circuitos eléctricos de fuente y carga. La transferencia de potencia entre dos circuitos conectados a un autotransformador, ocurre a través de dos fenómenos: uno el acoplamiento magnético y la conexión galvánica.

Características generales: se usan a menudo en sistemas eléctricos de potencia a tensiones diferentes como 400 kV/230 kV ó 138 kV/66 kV). Y en la industria para conectar maquinas a 480 V 0 600 V de alimentación.



Figura 2-25. Autotransformador.

- ✓ **Transformadores de corriente TT/CC.** Este tipo de transformadores son muy especiales y se utilizan para tomar muestras de corriente de la línea y reducirla a un nivel seguro y medible, para las gamas normalizadas de instrumentos, aparatos de medida, u otros dispositivos de medida y control.

Ciertos tipos de transformadores de corriente protegen a los instrumentos al ocurrir corto circuitos.

Características generales: tienen un valor de carga nominal que va de los 2.4 a los 200 VA, dependiendo de su tamaño y función. La corriente nominal a que trabajan oscila entre 5 y 1 A en su lado secundario.



Figura 2-26. Transformador de corriente TT/CC.

- ✓ **Transformador de potencial TT/PP.** Este tipo de transformadores consta con un devanado primario de alto voltaje y uno secundario para la baja tensión, posee una potencia nominal muy baja y tiene como objetivo primordial el suministrar una muestra de voltaje del sistema de potencia, para que se mida con los instrumentos incorporados.

Otra particularidad que caracteriza a este transformador, además del muestreo de voltaje es que deberá ser particularmente preciso para no distorsionar los valores fidedignos.

Características generales: se diseñan este tipo de transformadores en diversos niveles de precisión, dependiendo de la aplicación que tenga cada uno de ellos.



Figura 2-27. Transformador de potencial TT/PP.

- ✓ **Transformador Flyback:** también conocido como transformador de líneas es un tipo de transformador que genera una alta tensión necesaria para hacer funcionar un tubo de rayos catódicos (CTR); produce un voltaje de unos 18 kV en corriente continua para los tubos monocromos y de unos 20 o 30 kV para tubos en color.

El voltaje elevado no siempre sale del Flyback, sino que en el circuito donde se encuentre conectado que lo use por ejemplo un monitor o televisor, puede incorporar un multiplicador de voltaje para poder satisfacer la alimentación del ánodo del CTR.

Características generales: este tipo de transformadores está diseñado para trabajar con frecuencias elevadas de 15625 Hz para un sistema de televisión PAL o a 15750 Hz para un sistema de televisión NTSC.

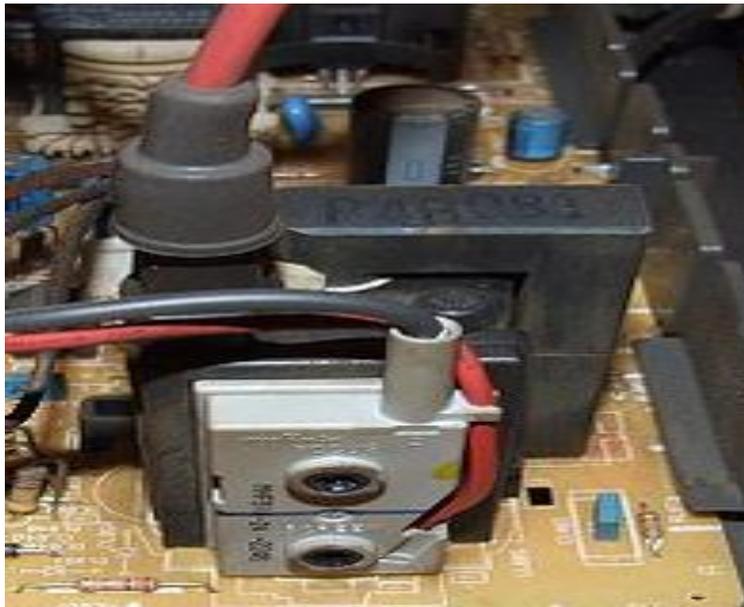


Figura 2-28. Transformador de línea o Flyback.

- ✓ **Transformador diferencial de variación lineal.** Es un transformador diseñado para medir desplazamientos lineales, se le conoce también como LVDT según sus siglas en inglés; dicho transformador eléctrico posee tres bobinas dispuestas extremo con extremo alrededor de un tubo.

La bobina central es el devanado primario y las externas son los secundarios, tiene un centro ferromagnético en forma cilíndrica, que está sujeto cuya posición desea ser medida. Son usados para la realimentación de posición en servomecanismos y para la medición automática en herramientas y otros usos industriales y científicos.

Características generales: Trabajan con una frecuencia aproximada que va de 1 a 10 Hz y son de inductancia variable, según el núcleo se vaya moviendo.

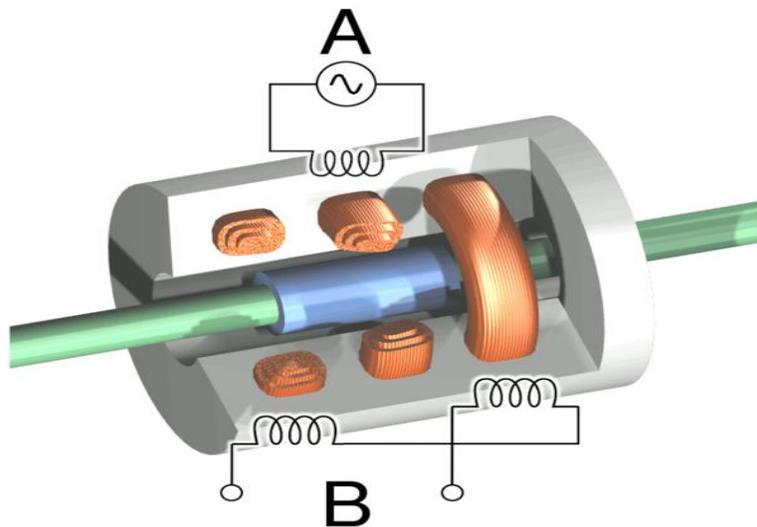


Figura 2-29. Transformador LVDT.

2.3 CONEXIONES EN LOS TRANSFORMADORES ELECTRICOS.

La energía eléctrica se genera, se transmite y se utiliza en una variedad de combinaciones distintas de voltaje, casi todo cambio necesario para unir el generador con la línea, o la línea con el usuario final, se lleva a cabo con uno o varios transformadores. En muchas de estas tareas participan equipos y los transformadores no son la excepción, es por esta razón que al trabajar tanto con transformadores trifásicos y monofásicos estudiaremos las conexiones posibles que estos puedan tener.

2.3.1 Conexiones de Transformadores monofásicos.

Es la conexión más simple, de la conexión de transformadores, y principalmente se hace para aumentar la potencia de dichos transformadores, se puede efectuar para transformadores concordantes y no concordantes en paralelo como se describirá en los siguientes párrafos.

2.3.1.1 Conexiones de transformadores en paralelo.

Para que los transformadores se puedan conectar en paralelo uno con otro de forma económica y satisfactoria; se deben seguir ciertas condiciones que son de vital importancia y a continuación se mencionan:

1. Los voltajes nominales de los devanados primarios y secundarios deben ser idénticos, por consiguiente, las relaciones de espiras de igual forma; son permisibles pequeñas diferencias si y solo si las corrientes de circulación resultantes se pueden tolerar.
2. Para transformadores con diferentes valores de kVA nominales, las impedancias equivalentes deben ser inversamente proporcionales a los kVA nominales individuales si se desea evitar las corrientes de circulación.
3. Las resistencias equivalentes y las reactancias equivalentes deben tener la misma relación para evitar corrientes de circulación y la operación a distintos factores de potencia.
4. Se deben observar las polaridades correctas en la interconexión.

La forma más fácil y correcta de satisfacer este modelo de conexión es poner en paralelo los transformadores con especificaciones similares, de preferencia que sean de la misma marca y modelo, tomando en cuenta los puntos anteriores 1, 2 y 4 para evitar que los valores de las corrientes de circulación sean indeseables.

2.3.1.2 Transformadores no concordantes en paralelo.

Para que este tipo de condición se cumpla y se pueda decir que un transformador concuerda con otro para propósitos de puesta en paralelo ambos:

- Deben ser verdaderamente idénticos.
- Sus factores de transformación deben ser idénticos, y sus reactancias, impedancias y resistencias equivalentes serán inversamente proporcionales a sus kVA nominales.

Cuando se tienen construcciones similares, si las impedancias, las resistencias y las reactancias concuerdan lo suficiente la hermandad será aceptable; mientras si una unidad fuera de construcción de núcleo y la otra de construcción de tipo acorazado, la probabilidad de una hermandad satisfactoria es mucho menos y se necesitaría de una prueba para obtener los datos requeridos.

La simple suma de impedancias sin ejecutar una relación de fasores de corriente es útil para saber si se trata de transformadores muy relacionados.

$$I_c = \frac{(V_{2a} - V_{2b})}{(Z_{e2a} - Z_{e2b})} \quad (2.0)$$

Dónde:

I_c Es la corriente de circulación.

V_{2a} Es el voltaje del lado secundario del transformador "a".

V_{2b} Es el voltaje del lado secundario del transformador "b".

Z_{e2a} Es la impedancia equivalente del lado secundario reflejada en el transformador "a".

Z_{e2b} Es la impedancia equivalente del lado secundario reflejada en el transformador "b".

2.3.1.3 Transformadores concordantes en paralelo.

Se dice que dos transformadores son concordantes en paralelo siempre y cuando el factor de transformación es similar y las impedancias del secundario son casi inversamente proporcionales a las cargas nominales del transformador.

Cuando los transformadores sufren solamente de una pequeña discordancia en cuanto a sus relaciones de voltajes, se tiene que usar la conexión en paralelo con mucha precaución, la compartición de carga en estas condiciones es una función tanto de sus relaciones de transformación como de sus impedancias reflejadas.

Estos casos son generalmente cuando los transformadores tienen una diferente regulación de voltaje, para este caso pueden tener la misma relación de voltajes a una carga y no a la otra.

2.3.2 Conexiones de transformadores trifásicos.

Siempre que se modifica el nivel de voltaje en una línea trifásica, se lleva a cabo con transformadores, existen cuando menos cinco combinaciones distintas de transformadores que se pueden utilizar, cada combinación tiene un campo de utilidad diferente y deben cumplir con los siguientes requerimientos para que los circuitos trifásicos sean satisfactorios.

1. Todos los transformadores de un banco de transformadores trifásicos deben tener relaciones de transformación similares y, por tanto, los mismos voltajes nominales en altas y en bajas.
2. Todos los transformadores deben tener los mismos kVA nominales.
3. Todos los transformadores deben tener el mismo tipo de construcción, ya sea de núcleo o tipo acorazado.
4. Todos los transformadores deben tener las mismas resistencias, reactancias e impedancias, y preferentemente de la misma marca y modelo.
5. Todos los transformadores deben etiquetarse y marcarse en cuanto a polaridad en forma similar, generalmente **H_1-H_2 y X_1-X_2** con los subíndices noes positivos, teniendo cuidado de una

inversión involuntaria de polaridades que podría causar problemas

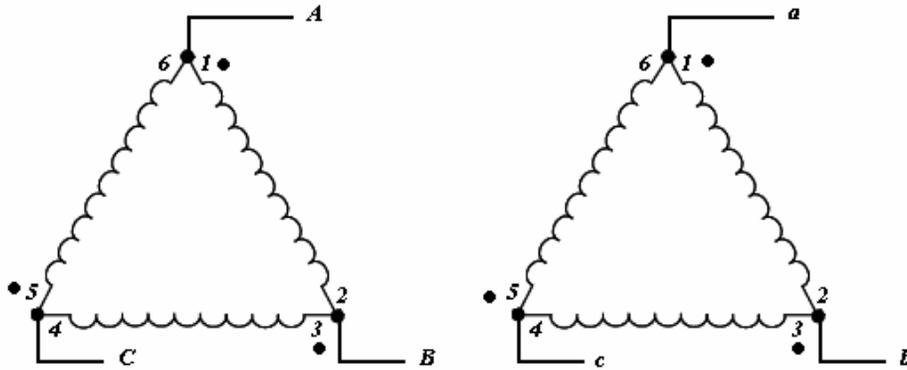
Cuando todas las condiciones anteriores se cumplen adecuadamente, el circuito trifásico puede componerse de tres transformadores idénticos pero separados o un solo transformador trifásico, ya que de cualquier forma habrá tres devanados de primario idénticos y tres devanados de secundario idénticos.

2.3.2.1 Conexiones DELTA-DELTA (Δ - Δ).

La conexión delta-delta en transformadores trifásicos se emplea normalmente en lugares donde existen tensiones relativamente bajas; en sistemas de distribución se utiliza para alimentar cargas trifásicas a 3 hilos.

Una ventaja de las conexiones delta-delta es que los voltajes del sistema son más estables con relación a una carga desbalanceada, además de que si un transformador falla se puede desconectar de la línea y continuar la operación a un nivel inferior de potencia.

Esta conexión presenta la desventaja de no tener hilo de retorno; en cambio tiene la ventaja de poder conectar los devanados primario y secundario sin desfaseamiento.



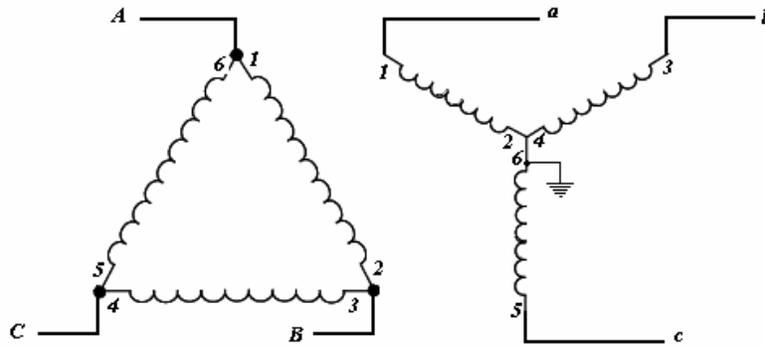
Fuente: Manual de pruebas a transformadores, elaborado por la ESIME-IPN Unidad Zacatenco en 2009.

Figura 2-30. Conexiones en DELTA-DELTA.

2.3.2.2 Conexiones DELTA-ESTRELLA (Δ -Y).

Esta conexión Δ -Y se emplea en los sistemas de transmisión en los que es necesario elevar las tensiones de generación. En sistemas de distribución es conveniente su uso debido a que se pueden tener 2 tensiones diferentes entre fase y neutro.

Cuando la conexión normal es elevadora, las conexiones del primario se hacen generalmente a las conexiones de la bobina **X** con las conexiones de la bobina **H₁** como líneas del secundario y las terminales **H₂** como el punto de estrella, la relación de fases es de 30° de primario a secundario.



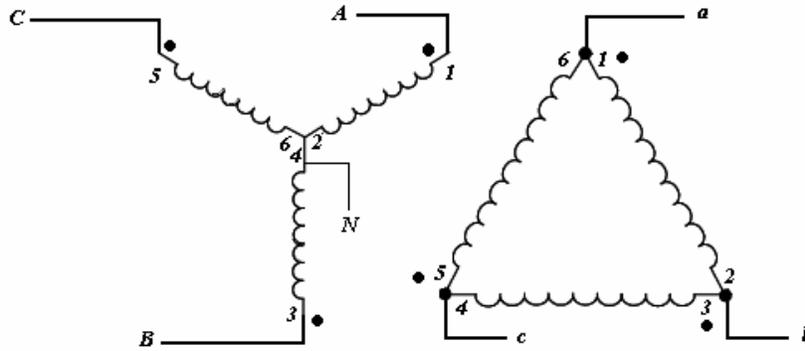
Fuente: Manual de pruebas a transformadores, elaborado por la ESIME-IPN Unidad Zacatenco en 2009.

Figura 2-31. Conexiones DELTA-ESTRELLA.

2.3.2.3 Conexiones ESTRELLA-DELTA (Y- Δ).

Se utiliza esta conexión en los sistemas de transmisión de las subestaciones receptoras cuya función es reducir las tensiones. En sistemas de distribución es poco usual, se emplea en algunas ocasiones para distribución rural a 20 kV.

Este tipo de conexión tiene un desfase entre los voltajes primario y secundario de 30° y esto quiere decir que un banco de transformadores estrella delta no se puede poner en paralelo ya que se causaría una corriente de circulación excesiva entre ambos bancos de transformadores.



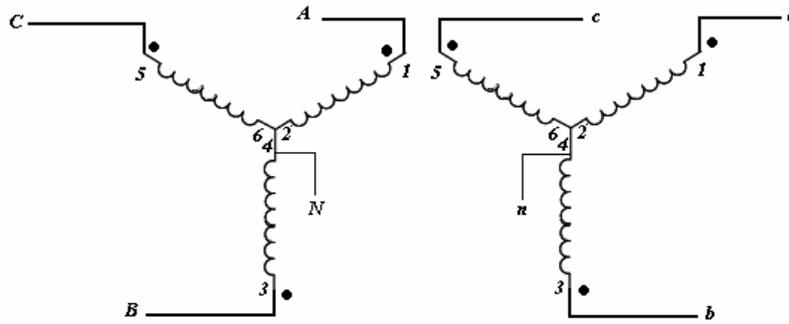
Fuente: Manual de pruebas a transformadores, elaborado por la ESIME-IPN Unidad Zacatenco en 2009.

Figura 2-32. Conexiones ESTRELLA-DELTA.

2.3.2.4 Conexiones ESTRELLA-ESTRELLA (Y-Y).

Esta conexión se emplea en tensiones muy elevadas, ya que se disminuye la cantidad de aislamiento. La combinación trifásica de 208/120 V es muy usual, gran cantidad de departamentos y negocios aprovechan los 208 V para sus hornos o calentadores, acondicionadores de aire o elevadores; de igual forma cualquier conexión monofásica de 120 V para iluminación.

Tiene la desventaja de no presentar oposición a las armónicas impares; en cambio puede conectarse a hilos de retorno; pero si se invierte involuntariamente uno de los devanados del transformador, los voltajes del secundario quedan muy desbalanceados. La puesta en paralelo con una fase invertida es imposible debido a los cortocircuitos.



Fuente: Manual de pruebas a transformadores, elaborado por la ESIME-IPN Unidad Zacatenco en 2009.

Figura 2-33. Conexión ESTRELLA-ESTRELLA.

2.3.2.5 Conexiones DELTA ABIERTA-DELTA ABIERTA.

Esta se puede considerarse como una conexión de emergencias en transformadores trifásicos, ya que si en un transformador se quema o sufre una avería cualquiera de sus fases, se puede seguir alimentando las cargas trifásicas operando el transformador o dos fases, solo que su capacidad disminuye un 58.8% aproximadamente.

Los transformadores trifásicos en V-V "se emplean en sistemas de baja capacidad y usualmente operan como auto transformadores; sin embargo introducen cierto desbalance de voltaje debido a la falta de simetría de los efectos de regulación de voltaje con carga"¹⁵.

¹⁵ M. E. El-Hawary. *Principles of Electric Machines with Power Electronic Applications*, Ed. Prentice-Hall, 1986.

2.4 NORMAS Y ESPECIFICACIONES DE APLICACIÓN A LOS TRANSFORMADORES ELECTRICOS.

La correcta elección de una norma para ser aplicada a los transformadores eléctricos no es una tarea que pueda ser tomada a la ligera, por lo que el conocimiento a fondo de esta máquina eléctrica es muy indispensable para todo ingeniero eléctrico.

Por otra parte, poner fuera de servicio a un transformador eléctrico de potencia representa un serio problema para las empresas que se ocupan de prestar el servicio de energía eléctrica a la sociedad, ya que trae como consecuencia un apagón prolongado de un sector poblacional.

Es por ello, que en este apartado se mencionaran de algunas de las normas más utilizadas en las pruebas de los transformadores eléctricos, en las cuales se hará una comparación de las mismas para saber cuál elegir y aplicar de forma correcta las condiciones iniciales que requiera cada una de las normas, para una correcta y buena interpretación de resultados.

Por tanto, se realizara una evaluación para el desarrollo de una buena metodología de mantenimiento para los transformadores eléctricos en campo, y así obtener un criterio propio de aceptación sobre su funcionamiento y corroborar que los resultados que arrojen las pruebas son los óptimos.

2.4.1 La Ley Federal sobre Metrología y Normalización.

Es una serie de normas cuyo objetivo es asegurar los valores, cantidades y características mínimas o máximas de diseño, producción de diversos equipos; existen dos grupos de normas en esta Ley Federal y son las Normas NOM o Normas Oficiales Mexicanas y las Normas NMX o Normas Mexicanas.

De este tipo de normas solo las Normas NOM son de uso obligatorio en la nación y las segundas solo expresan una recomendación o parámetros y procedimientos, aunque si son mencionadas como parte de una Norma NOM como de uso obligatorio su observancia es a su vez obligatoria.



Figura 2-34. Logo oficial de las Normas Mexicanas NOM.

Este logo siempre es colocado por los fabricantes en alguna parte del producto que se esté ofreciendo al sector poblacional o industrial, seguida de ciertos dígitos y letras por especificación.

Para el caso de los transformadores eléctricos, las normas que se tienen que evaluar son las siguientes:

2.4.2 Norma Mexicana ANCE Transformadores y Autotransformadores de Distribución y Potencia.

NMX-J-169-ANCE-2004. Esta norma fue emitida por la Asociación de Normalización y Certificación A.C. y aprobada por el Comité de Normalización CONANCE.

Esta norma tiene como objetivo principal establecer las pruebas y métodos de producción de transformadores y autotransformadores de distribución y potencia; se rige por el siguiente orden de aplicación:

1. Pruebas de prototipo: son esas pruebas aplicables a nuevos diseños, con el propósito de verificar que el producto a producir cumpla con lo específico en lo señalado por el usuario.
2. Pruebas de rutina: son pruebas que se llevan a cabo por el fabricante en los transformadores de acuerdo a métodos indicados en esta norma, para verificar si la producción se mantiene dentro de lo especificado por el usuario.

3. Pruebas opcionales: son las que se establecen entre el fabricante y el usuario, con el fin de verificar las características especiales del producto.

4. Pruebas de aceptación: son aquellas pruebas establecidas en un contrato entre el usuario y fabricante en donde se determina que el transformador cumple con las especificaciones correspondientes.

Los métodos principales de aplicación de la misma Norma Mexicana *NMX-J-169-ANCE-2004* son los siguientes:

- ✓ Método de Caída de Tensión: debe emplearse solamente si la corriente nominal del devanado del transformador es por lo menos de un ampere, las mediciones se efectúan con corriente continua y se toman las lecturas y las resistencias se calculan en base a las lecturas y utilizando la ley de Ohm.

Si la corriente continua se suministra por una máquina de conmutación, la aguja del voltámetro puede oscilar debido a variaciones de la tención producidas en el conmutador. En tales casos alguno de los devanados del transformador que no sea el devanado bajo prueba, debe ponerse en corto circuito para amortiguar las variaciones de la tensión.

Mientras tanto la corriente en el devanado que está bajo prueba debe ser prácticamente antes de poner otro devanado en corto

circuito, ya que de otra manera pueden obtenerse valores erróneos de resistencia; se sabe por definición que la estabilidad de una corriente continua se logra con mayor facilidad bajo condiciones de circuito abierto que de corto circuito.

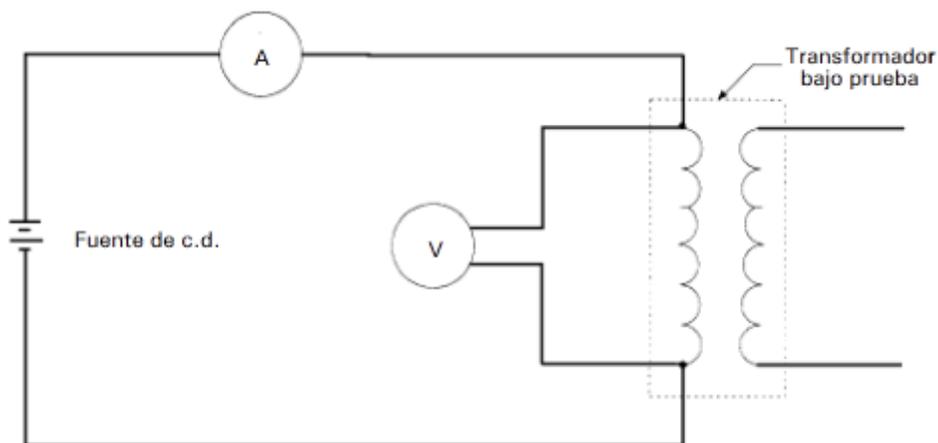


Figura 2-35. Conexiones para la medición por el método de caída de tensión.

- ✓ El método del Punteo: es aplicable a todos los casos de medición de resistencia y se prefiere en la mayoría de casos por la exactitud que el mismo posee, ya que trabaja con corrientes pequeñas que no alteran el valor de la resistencia por cambio de temperatura.

Este método es obligatorio en los casos en que la corriente nominal del devanado de prueba sea menor a un amperio, el método del puente es recomendable especialmente para las mediciones que se usen con el propósito de determinar la elevación de temperatura promedio de los devanados del transformador.

- ✓ El método de Impulso Inductivo con Corriente Continua: este consiste en conectar a la alta tensión una fuente de corriente directa de potencial adecuado para no exceder la corriente nominal del devanado y al mismo tiempo se intercala un voltímetro analógico de manera que se observe claramente la deflexión de la aguja.

Las terminales del voltímetro se transfieren a las terminales de baja tensión sin desconectar la fuente de corriente directa, teniendo sumo cuidado de conservar a la izquierda la terminal que estaba en la misma posición de alta tensión, y finalmente se desconecta rápidamente de la fuente de corriente directa y se observa la deflexión de la aguja del voltímetro causada por la descarga inductiva.

Se concluye finalmente que si la aguja deflexiona en la misma dirección que en el devanado de alta tensión, la polaridad es aditiva y si se deflexiona en sentido contrario, la polaridad es substractiva.

- ✓ El método con Tensión Alterna: consiste en conectar en un transformador monofásico las dos terminales adyacentes de alta y baja tensión y en las otras dos terminales adyacentes se conecta un voltímetro; se aplica una tensión de corriente alterna adecuada en el devanado de alta tensión y se toma la lectura correspondiente.

Si la lectura del voltímetro es mayor que la tensión aplicada, se dice que la polaridad es aditiva y si es menor se dice que la polaridad es substractiva; este método se usa únicamente en transformadores en los cuales la relación de transformación permite apreciar la diferencia entre las dos lecturas.

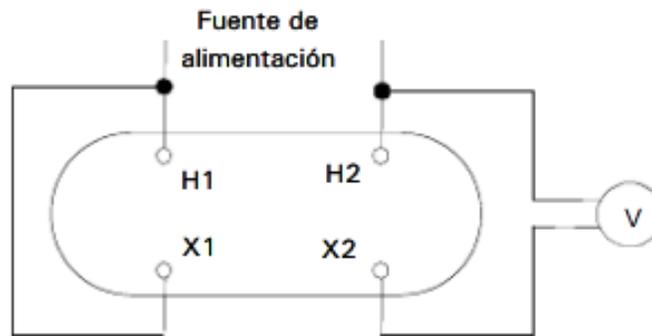


Figura 2-36. Diagrama para la prueba del método de tensión alterna.

✓ Método de Prueba de Relación de Transformación: para poder efectuar este método de prueba, existen tres maneras de llevarlo a cabo y son las siguientes:

- Por los dos voltímetros: se necesita de dos voltímetros, uno para medir la tensión del devanado primario y el otro para el devanado secundario, después deben leerse los dos voltímetros simultáneamente.

Para compensar los errores de los instrumentos, deben tomarse un segundo grupo de lecturas con los voltímetros intercambiados, mientras que la relación de transformación se determina con el promedio de las lecturas; cuando se usen transformadores de potencial, sus relaciones deben ser tales que se obtengan lecturas en los voltímetros

aproximadamente iguales. En caso contrario, deben aplicarse correcciones apropiadas a las lecturas de los voltímetros, es decir, se deben hacer 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; sino las pruebas deben repetirse con otros instrumentos.

- Por el transformador patrón: es más conveniente utilizar esta forma para medir con precisión la relación de transformación, el transformador que se proba se excita en paralelo con un transformador patrón de la misma relación nominal y los devanados de baja tensión se conectan en paralelo intercalándose un voltímetro o un detector entre las dos terminales de la misma polaridad. El transformador patrón puede ser un transformador de relación variable, como por ejemplo el TTR (Transformer Turn Ratio) la forma de conexión se puede apreciar en el diagrama que a continuación se muestra

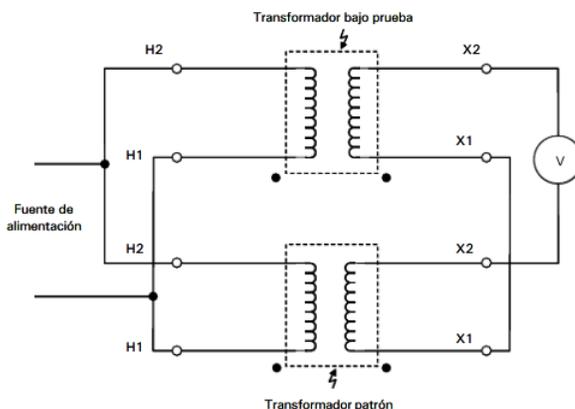


Figura 2-37. Transformador patrón.

- Por el puente de relación: puede utilizarse un potenciómetro apropiado, preferentemente graduado para dar lectura de relación de transformación, en esta prueba se varía la resistencia del potenciómetro hasta que el detector indique cero, es ahí cuando la relación de resistencias del potenciómetro R/R_1 es igual a la relación del transformador.

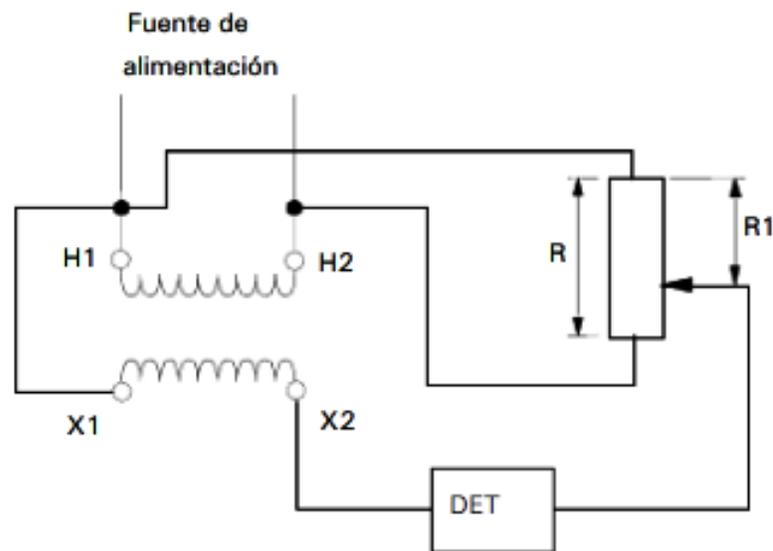


Figura 2-38. Cuando el detector DET esta balanceado, la relación de transformación es R/R_1 .

2.4.3 Norma Mexicana ANCE Transformadores tipo poste y tipo subestación.

NMX-J-116-ANCE-2005. Esta norma fue emitida por la Asociación de Normalización y Certificación A.C. y aprobada por el Comité de Normalización CONANCE.

El objetivo principal de esta Norma Mexicana establece que los requisitos que deben cumplir los transformadores de tipo poste y tipo subestación, sumergidos en liquido aislante y auto enfriados.

Para el propósito que esta Norma Mexicana tiene como fin, se establecen las siguientes definiciones:

1. Transformador: dispositivo eléctrico, que por inducción electromagnética transfiere energía eléctrica de uno o más circuitos, a uno o más circuitos de la misma frecuencia y transformando usualmente los valores de tensión y corriente.
2. Transformador de distribución: aquel que tiene la capacidad hasta de 500 kVA, con tensiones nominales máximas de 34 500 V en ambos devanados.
3. Transformadores de distribución tipo poste: aquel que está dispuesto para ser montado en un poste o alguna estructura similar.

4. Transformador de distribución tipo subestación: aquel que está dispuesto para ser instalado en una plataforma, cimentación o estructura similar.
5. Transformador de distribución tipo costa: aquel que está diseñado para utilizarse en zonas costeras y en climas cálidos.
6. Temperatura de referencia del transformador: suma de elevación de temperatura promedio del devanado más 20° C.

Las especificaciones que deben seguirse para efectuar esta Norma Mexicana, requiere de ciertas condiciones de servicio que son las siguientes:

- ✓ Frecuencia: La frecuencia de operación debe ser de 60 Hz \pm 0.5 Hz.
- ✓ Temperatura ambiente: Los transformadores amparados por esta norma, deben operar correctamente dentro de un ambiente de -5 °C hasta 40 °C, asimismo deben operar a su capacidad nominal siempre y cuando la temperatura máxima del ambiente no exceda de 40 °C y la temperatura promedio del ambiente durante cualquier período de 24 horas no exceda de 30° C.

A excepción de los transformadores tipo costa, donde la temperatura máxima del ambiente no exceda a los 50 °C y el promedio del ambiente durante cualquier periodo de 24 horas no exceda de 40 °C.; se recomienda

que la temperatura promedio del aire del medio ambiente, se calcule promediando las lecturas obtenidas durante 24 horas efectuando estas lecturas cada hora.

Puede usarse el promedio de temperatura máxima y mínima durante el día; por lo general, el valor obtenido en esta forma es ligeramente mayor que el promedio real diario, pero no es más de 0.25 °C.

- ✓ Altitud de operación sobre el nivel del mar: Los transformadores destinados a operar entre 0 m y 1 000 m deben diseñarse para una altitud de 1 000 m. Los transformadores destinados a operar en altitudes mayores a 1 000 m y hasta 2 300 m deben diseñarse para una altitud de 2 300 m.
- ✓ Efecto de la altitud sobre la elevación de temperatura: produce disminución en la densidad del aire, lo que a su vez incrementa la elevación de temperatura en los transformadores que dependen del aire para su disipación del calor.

Por lo tanto, debe tomarse en cuenta lo anterior para la operación de los transformadores en las formas que a continuación se indican:

a) Operación a capacidad nominal: Los transformadores construidos para alturas de 1 000 m.s.n.m. o 2 300 m.s.n.m. pueden operarse a capacidad nominal, a mayores altitudes, siempre que la temperatura ambiente promedio máxima no exceda de los valores indicados en la siguiente tabla:

ALTITUD m.s.n.m.	1000	2000	3000	4000
Temperatura ambiente permisible en un periodo de 24 horas máximo en °C.	30	28	25	23

Fuente: Datos tomados del Archivo electrónico sobre la norma ANCE J-116.

Tabla 2-5. Temperaturas permisibles a diferente altitud.

- b) Operación a capacidades reducidas: si la temperatura ambiente promedio máxima excede de los valores indicados en la tabla que se muestra anteriormente, pero sin exceder la temperatura promedio diaria, puede operarse a capacidad reducida de 0.4 % de la capacidad por cada 100 m en exceso a los 1 000 m.s.n.m. o 2 300 m.s.n.m.
- ✓ Operación a tensiones superiores a la nominal: Los transformadores deben operar correctamente bajo las condiciones que se enuncian a continuación:
- a) Con 5 % arriba de la tensión nominal del lado de baja tensión a capacidad nominal en kVA, sin exceder los límites de elevación de temperatura especificados en la tabla anterior, este requisito se aplica cuando el factor de potencia de la carga es de 80 % o mayor.
- b) Con 10 % arriba de la tensión nominal del lado de baja tensión en vacío, sin exceder los límites de elevación de temperatura especificados en la tabla anterior.

- ✓ Capacidad nominal: se refiere a los kVA que el devanado secundario debe suministrar en un tiempo determinado a su tensión y frecuencia nominales, sin exceder los límites ya establecidos

Las capacidades nominales expresadas en kVA para diversos tipos de transformadores son las siguientes:

a) Transformadores monofásicos: 5, 10, 15, 25, 37.5, 50, 75, 100, 167, 250, 333 y 500 kVA.

b) Transformadores trifásicos: 15, 30, 45, 75, 112.5, 150, 225, 300 y 500 kVA.

- ✓ Capacidad en las derivaciones: en cada una y todas las derivaciones deben obtenerse los kVA de la capacidad nominal.
- ✓ Corriente de excitación y su tolerancia: debe expresarse en porcentaje con respecto a la corriente nominal de alimentación, no debe ser mayor a 1.5 % para los transformadores monofásicos y para los transformadores trifásicos mayores a 45 kVA; para los transformadores trifásicos de hasta 45 kVA no debe ser superior al 2.0 %.
- ✓ Impedancia y su tolerancia: La impedancia debe expresarse en porcentaje referida a 75° C y 85°C. La tolerancia de la impedancia de un transformador de dos devanados y con impedancia de 2.5 %

o mayor es de \pm un 7.5 % de valor garantizado; cuando el valor de la impedancia es menos a 2.5 % la tolerancia será de \pm 10 %.

- ✓ Relación de transformación y su tolerancia: esta se basa en la relación de vueltas de los devanados y su tolerancia medida cuando el transformador esta sin carga debe ser \pm 0.5 % en todas sus derivaciones.
- ✓ Aislamiento de conductores: El aislamiento debe ser compatible con el líquido aislante del transformador, su clase térmica debe ser como mínimo 105 °C.
- ✓ Puntos de unión: todas las conexiones permanentes que lleven corriente, a excepción de las roscadas, deben unirse con soldadura o mediante conectadores de tipo compresión.
- ✓ Conexión del núcleo al tanque: este debe quedar conectado eléctricamente al tanque en un solo punto.
- ✓ Líquido aislante: tiene que ser libre de contaminantes y no ser toxico, para ello debe tener menos de 2 mg/kg de bifenilos policlorados (BPC).
- ✓ Construcción del tanque: debe ser construido para soportar 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 el 1.0 %, mientras que la deformación final es aquella que se presenta después de la liberación de la presión de los 50 kPa.

La medición de dicha deformación se hace con referencia a un segmento de pared del tanque, definiendo dicho segmento como la longitud total de la pared en medición. El cálculo final se debe llevar a cabo a través de la siguiente relación matemática:

$$\% Def = \frac{\textit{Distancia perpendicular a la pared media}}{\textit{Longitud de la pared en la direccion seleccionada}} \times 100 \quad (2.1)$$

2.4.4 Norma de Transformadores de Potencia.

NRF-144-PEMEX-2005. Tiene como objetivo principal establecer las especificaciones que deben cumplir los transformadores de potencia trifásicos y monofásicos.

Las principales características que persigue son el certificado de pruebas de fábrica, planos y diagramas, instructivos e información técnica necesaria para el embalaje, transporte, recepción, almacenamiento, montaje, instalación, interconexión, operación y mantenimiento.

Para los efectos de esta norma, se aplican los conceptos que se mencionaran a continuación:

1. Capacidad nominal: es aquella que suministra al transformador cuando circula por sus devanados la corriente nominal a la tensión y frecuencia nominales en forma continua, sin exceder los límites de elevación de temperatura.
2. Características nominales: valores numéricos asignados a los parámetros que definen la operación del transformador y en los que se basan las garantías del fabricante y pruebas de equipo: capacidad, tensión, corriente, factor de potencia, frecuencia nominal y altitud de operación.
3. Corriente de excitación: es la corriente que circula a través de las terminales de un devanado de un transformador cuando se aplica tensión y corriente nominal manteniéndose las terminales de los otros devanados en circuito abierto, se debe expresar en porcentaje con respecto a la corriente nominal del devanado bajo prueba.
4. Corriente nominal: corriente que fluye por los devanados del transformador cuando funciona a su capacidad, tensión, frecuencia y factor de potencia nominales.
5. Nivel básico de aislamiento al impulso: es la combinación de los valores de tensión a frecuencia nominal que caracteriza

su aislamiento de cada uno de los devanados y sus partes asociadas con respecto a su capacidad para soportar esfuerzos dieléctricos.

6. Núcleo: potencia activa que consume el transformador cuando se le aplica la tensión nominal, a frecuencia nominal, en las terminales del devanado primario, estando los otros en circuito abierto.
7. Rigidez dieléctrica: Propiedad de un dieléctrico por la que se opone una descarga disruptiva, se mide por la intensidad de campo eléctrico con la que se rompería el dieléctrico.
8. Tensión nominal: tensión a la cual se refieren las características de operación y funcionamiento del transformador.
9. Valores de garantía: Valores que presentan los fabricantes en sus ofertas y que se toman como base para el cálculo de la evaluación del transformador.

Para efectos de esta norma desarrollada por el Comité de Normalización de Petróleos Mexicanos y Órganos Subsidiarios se consideran a transformadores con potencia mayor a 500 kVA los cuales deben cumplir las siguientes condiciones:

- ✓ Devanados: los devanados del transformador deben ser de cobre electrolítico de 99.98 % de pureza y capaces de soportar las

pruebas dieléctricas correspondientes y los requerimientos en casos de corto circuito.

- ✓ Tensión de alimentación de equipo auxiliar del transformador: debe corresponder según su campo de uso; para fuerza de motores o ventiladores 480 V de corriente alterna a 3 fases, para el control y alumbrado 127 V de tensión alterna a 1 fase y finalmente para control y protección 125 V de tensión de corriente directa.
- ✓ Instrumentos de protección: los transformadores de 3.5 MVA, 13.8/4.16 kV y de valores mayores, deben contener un relevador mecánico sobre la presión con señal de alarma y disparo, relevador de temperatura de líquido aislante y un relevador de nivel de líquido aislante con señal de alarma.
- ✓ Sistema de aire forzado: los arrancadores para los motores de los ventiladores de aire forzado y los dispositivos de arranque automático deben ser instalados en caja de conexiones tipo 3R con motores trifásicos a 480 V.
- ✓ Sistema de tubería conduit: el sistema debe estar suministrado con tubería conduit para fuerza y control tipo pesado, desde los instrumentos hasta la caja de conexiones o tablero de control.
- ✓ Núcleo: debe ser diseñado de acuerdo al tipo y capacidad del transformador, en lámina de acero eléctrico al silicio.

- ✓ Devanados y aislamiento: deben soportar pruebas dieléctricas establecidas para el nivel de aislamiento asignado a cada devanado, cuyo factor de potencia contra tierra debe ser menor del 0.5 %.
- ✓ Tanques de acero y cubiertas: deben ser construidas con placa de acero ASTM A36, diseñados para ser soldados y de una construcción que resista sin daño alguno los esfuerzos inherentes al embarque, transporte, instalación, operación y pruebas. Soportando una presión de 102 kPa durante 6 horas sin presentar alguna deformación.
- ✓ Empaques: todos los empaques para boquillas, radiadores, válvulas y demás accesorios deben ser de material elastómero y fabricados en una sola pieza que sea compatible con el líquido aislante. Y deben garantizar la hermeticidad del transformador por los menos 15 años sin necesidad de cambiar ningún empaque.
- ✓ Acabados: las superficies interiores del tanque deben limpiarse con abrasivos a presión mientras que por el exterior, debe ser un proceso de acabado con un tratamiento de limpieza, un tratamiento anticorrosivo (primer) y las capas de pintura final.

2.4.5 Norma para Transformadores y autotransformadores de potencia para subestaciones de distribución.

CFE-k0000-06. Tiene como objetivo establecer características que deben tener los transformadores para subestaciones de distribución. Para el óptimo cumplimiento de esta norma se mencionan a continuación los siguientes requerimientos funcionales aplicables que utiliza CFE en subestaciones de distribución.

- ✓ Clases de enfriamiento: deben utilizarse los tipos de auto enfriado y enfriado por aire forzado ONAN/ONAF; pudiendo ser también auto enfriado y con dos pasos de enfriamiento por aire forzado ONAN/ONAF/ONAF.
- ✓ Numero de fases: Todos los transformadores deben de ser trifásicos.
- ✓ Numero de devanados: los transformadores deben ser de dos devanados. En el caso de autotransformadores se debe incluir un devanado terciario.
- ✓ Temperatura ambiente del lugar de instalación: Los transformadores sujetos a esta especificación deben ser capaces de operar a su capacidad plena siempre que la temperatura ambiente no exceda de 40 °C y la temperatura promedio del ambiente durante cualquier periodo de 24 horas, no exceda de 30 °C.

La elevación de temperatura de los devanados y punto más caliente a tensiones y frecuencias nominales y a capacidad plena, puede ser hasta de 55 °C y 65 °C respectivamente, medida por el método de resistencia sobre una temperatura ambiente máxima de 40 °C.

- ✓ Tipos de conexión: deben ser en delta en el devanado primario y estrella en el devanado secundario.
- ✓ Impedancia: los valores se indican en la siguiente tabla, y debe estar referida esta al devanado primario del transformador, a su capacidad de enfriamiento ONAN y a la tensión nominal.

Tensión nominal del devanado primario (kV)	Impedancia (%)
34.5 y menores	7.5
69	8.5
115	9
138	9.5

Fuente: Comparación entre valores de Tensión en lado primario e Impedancia, establecidos en Manual Técnico del Ingeniero CFE.

Tabla 2-6. Impedancia del devanado primario según la capacidad de enfriamiento.

Las normas mexicanas anteriores como lo señala la Ley Federal sobre Metrología y Normalización tiene como finalidad principal el establecer características y/o especificaciones que deban reunir los productos y procesos cuando estos puedan constituir un riesgo

para la seguridad de las personas o dañar la integridad humana, animal o vegetal de una región.

Durante el análisis de las pruebas se originan algunos inconvenientes y errores que dependen de la forma de aplicación, para lograr reducirlos se utilizan normas y especificaciones de cada una para tener un control de datos precisos y confiables de las pruebas a los transformadores eléctricos, con las que, para la misma industria representan pérdidas menores de eficiencia de estas máquinas eléctricas.

Por lo tanto, también las normas se enfocan en los productos utilizados como las materias primas o materiales usados en la fabricación y ensamble del transformador eléctrico, sujeto al cumplimiento de Normas Mexicanas en base a pruebas correspondientes.

Los requisitos de los transformadores y criterios específicos de cada prueba, no son parte de esta comparación, estos están contenidos en las normas del producto correspondiente ya que al realizar la comparación de normas se encuentran, las especificaciones y/o procedimientos de elaboración de las pruebas a los transformadores eléctricos, así como también las características que deben reunir los equipos, materiales y dispositivos, para evaluar el buen estado de los componentes del equipo.

La ubicación del lugar donde se lleven a cabo las pruebas, la distribución y el orden de los pasos a seguir de debe efectuar se forma sistemática sujeta a las normas correspondientes y los equipos necesarios para los diversos casos de aplicación; la ventaja número uno que pueda llegar a tener la aplicación de normas a cada una de las partes del transformador eléctrico y al ensamble del mismo radica en que se puede tener un mejor funcionamiento y eficiencia.

Para el caso del aislamiento eléctrico entre los devanados del transformador se refiere a la capacidad que posee el transformador de soportar diferencias de tensiones altas, sobre todo, entre el devanado primario y el devanado secundario ya que ahí es donde se produce el desgaste de los aislantes; la ventaja de disponer de un buen aislamiento es proporcionar una mayor seguridad en la operación del usuario y a equipos secundarios.

En cuanto a la comparación de normas se realiza una aplicación de pruebas y obtención de datos precisos para la interpretación de los resultados de las pruebas en los transformadores de potencia trifásicos y monofásicos sumergidos en un líquido dieléctrico.

2.4.6 Ventajas y Desventajas generales de la aplicación de pruebas a transformadores según las Normas Mexicanas NMX.

Las pruebas que se realizan a los equipos respecto a las normas que se mencionaron en párrafos anteriores, se colocan de dos formas principales en las que se manejan principalmente a los transformadores en puesta en servicio y en mantenimiento preventivo.

+ Prueba Punto de rocío:

Ventaja: Se conoce la temperatura a la cual la humedad presente empieza a condensarse sobre la superficie de contacto con el gas en el tanque del transformador.

Desventaja: No se conoce la humedad residual de los aislamientos del transformador que provocan óxidos y dañan a los mismos aislamientos.

+ Prueba Resistencia de Aislamiento:

Ventaja: Se conoce el aislamiento de los devanados individuales a tierra y/o devanados del transformador.

Desventaja: No se puede conocer la resistencia del aislamiento y puede existir un desgaste en los devanados provocando calor y pérdidas por efecto Joule.

+ Prueba Factor de Disipación:

Ventaja: Es una manera de poder conocer las condiciones del aislamiento de los devanados del transformador, pero además se pueden detectar problemas de humedad y suciedad de los mismos.

Desventaja: no se pueden detectar las condiciones del aislamiento de los devanados y puede existir un desgaste en los devanados provocando calor o pérdidas por efecto Joule.

+ Prueba Resistencia Óhmica de los devanados:

Ventaja: se pueden conocer las pérdidas $I \cdot R^2$ de los devanados, de igual forma la temperatura promedio de los devanados.

Desventaja: No se puede conocer la resistencia dieléctrica del aislante de los devanados y esto puede traer como consecuencia un corto circuito en los devanados y corrientes de fuga.

+ Prueba Rigidez Dieléctrica del Aceite:

Ventaja: Se puede conocer la contaminación con humedad del aceite y las impurezas que pueda tener.

Desventaja: No se puede conocer la tensión de ruptura del aceite, el cual ocasiona un nivel de conducción en el aceite debido a las impurezas y lodos creados por burbujas.

Prueba Relación de Transformación:

Ventaja: es sumamente importante ya que permite determinar las condiciones reales del transformador, en general se conoce la identificación de espiras en corto circuito.

Desventaja: No se conocen los parámetros reales del transformador y esto ocasiona variaciones en los datos y fallas debido al corto circuito en las espiras del transformador.

Prueba Corriente de Excitación:

Ventaja: es una de las pruebas que se realizan con mayor frecuencia ya que permite conocer los defectos en la estructura magnética del núcleo, el desplazamiento angular de los devanados y las fallas presentes en el aislamiento entre las vueltas o algún problema que pueda tener el cambiador de derivaciones.

Desventajas: De igual forma como cualquier prueba tiene desventajas porque no permite conocer los niveles de corriente para hacer funcionar el transformador, debido a que el núcleo del transformador puede tener algún magnetismo residual presente como resultado de la desconexión del sistema de potencia; o como frecuentemente ocurre, por resultado de las mediciones de la resistencia Óhmica de los devanados primario y secundario en los que se utiliza la corriente directa C.D.

CAPÍTULO 3



APLICACIÓN Y PRUEBAS DE LOS TRANSFORMADORES ELÉCTRICOS.

3.1 INTRODUCCIÓN.

Los transformadores eléctricos, se usan extensivamente en una gran cantidad de formas en los sistemas eléctricos ya sean de distribución o de potencia para reducir o elevar en nivel de tensión de dichos sistemas.

Se pueden utilizar también para aislar un circuito de otro y para prevenir corrientes excesivas que pueden dañar algún motor de arranque u otro dispositivo eléctrico, etc.

Aun cuando los transformadores eléctricos no son máquinas rotativas, es decir, no tienen partes en movimiento, es necesario llevar a cabo una inspección para verificar los calentamientos excesivos debido a sobrecargas, cortocircuitos internos y señales de deterioro en el sistema de aislamiento; es por ello que se hacen distintos tipos de pruebas que tienen diversos propósitos, ya que algunas son para verificación o determinación de parámetros de fábrica; mientras tanto las otras pruebas son más comunes ya que permiten determinar o verificar los parámetros equivalentes del transformador.

A través de esos parámetros se puede conocer el rendimiento y porcentaje de eficiencia del transformador; hay otros tipos de pruebas que se denominan "Pruebas de Mantenimiento" y

generalmente se efectúan en el sitio, es decir, en el mismo lugar donde se encuentran conectados los transformadores, ya sea la subestación o dentro de las instalaciones eléctricas, generalmente este tipo de pruebas determina las condiciones en primer término de los estados de aislamiento y se realizan con equipos de tipo portátil la mayor parte de las veces.

3.2 APLICACIÓN DE LOS TRANSFORMADORES ELECTRICOS.

Los transformadores eléctricos “son máquinas que tienen innumerables usos tanto en materia de electricidad industrial y comercial, de igual forma en la radiotelefonía, telefonía, televisión y electrónica en general; puede referirse al transformador como un elemento indispensable, especialmente en todo lo referente a corrientes alternas de baja y alta frecuencia”¹⁶.

Una aplicación relevante de los transformadores es su uso en los sistemas de potencia, en los cuales desempeña un papel funcional de gran importancia, ya que hace posible que la generación, transporte y consumo de la energía eléctrica se realice a las tensiones más rentables según su utilización final.

El transporte de energía eléctrica resulta más económico cuanto más alto sea el nivel de tensión, ya que la corriente y la sección de

➤ ¹⁶ Avelino Pérez Pedro. *Transformadores de Distribución, Teoría, Cálculo, Construcción y Pruebas*. 2da Edición. Editorial Reverte S.A. México D.F. 2001.

los conductores son menores, provocando así pérdidas menores por efecto Joule.

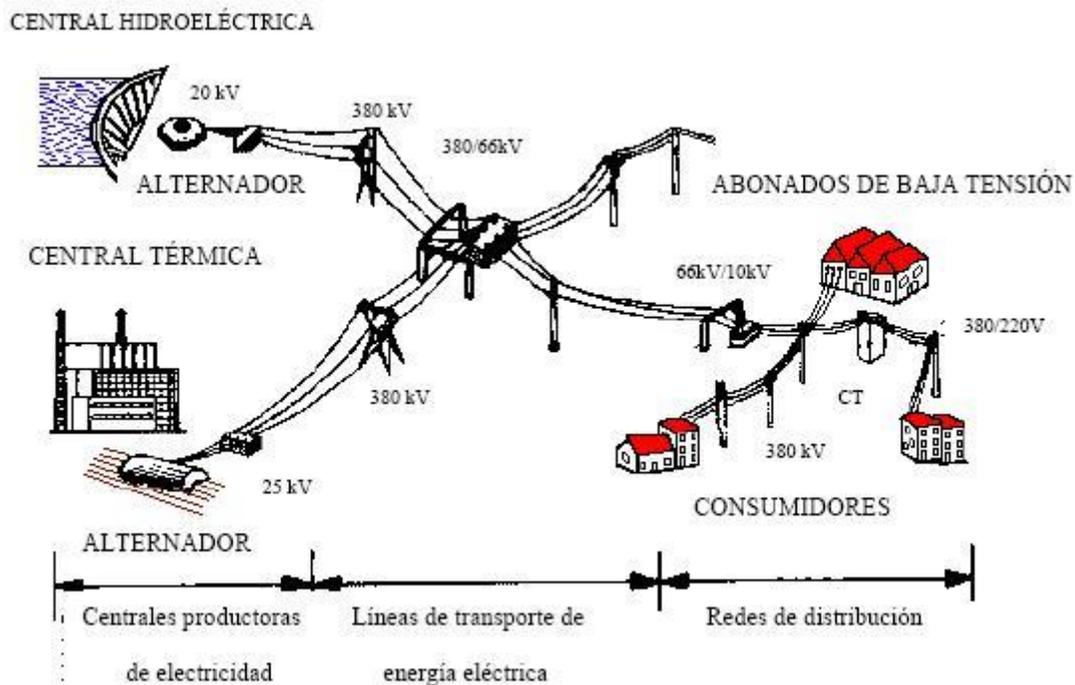


Figura 3-1. Estructura de un sistema eléctrico de potencia controlado por transformadores.

Las usinas que se encargan de generar la energía eléctrica usan al transformador como un elemento de transporte de potencia eléctrica con el mínimo de pérdidas posibles; se emplean grandes transformadores eléctricos elevadores de tensión, trabajándose con tensiones de entre 6000 y 250000 voltios para el transporte a distancias considerablemente grandes.

Sin embargo, también se usan transformadores eléctricos reductores para bajar las tensiones de transporte, a valores de

tensiones de uso que generalmente son 127, 220 y 380 volts; estos cambios de tensión se deben a que se busca minimizar las pérdidas de potencia en las líneas de transmisión por efecto de calentamiento en la resistencia eléctrica propia de las mismas, que son menores cuando el transporte se hace con elevadas tensiones y corrientes menores.

El transporte de energía eléctrica, desde donde se produce hasta el lugar de consumo, conlleva pérdidas energéticas que se originan por el conocido efecto Joule en los cables conductores, es decir, la potencia disipada en un conductor de resistencia **R** a través del cual circula una corriente alterna de intensidad **I** y es expresado como:

$$P = I^2 * R \quad (3.0)$$

Si se requiere disminuir las pérdidas energéticas, puede elegirse entre dos opciones que son:

- Disminuir la resistencia del conductor que transporta la corriente.
- Disminuir la intensidad de corriente **I** que circula por el conductor.

Con la primera opción uno la puede mejorar, cambiando el material constructivo de las líneas de distribución, sin embargo, es una alternativa difícil ya que representa utilizar materiales más

conductores y por tanto un incremento de los costes; el aumentar la sección del conductor implica también un aumento del coste de instalación y al incrementar la cantidad de metal a utilizar, sería mayor el peso que tendrían que soportar las torres metálicas o postes de suspensión.

La segunda opción, que consiste en reducir la intensidad de corriente que circula por las líneas, puede lograrse aumentando la diferencia de potencial en las líneas de conducción, ya que la potencia que transporta una corriente eléctrica es:

$$P = V * I \quad (3.1)$$

De tal forma que para un valor de potencia, cuando más grande sea el nivel de tensión V , más pequeña será la intensidad de corriente y se conseguirá una disminución de la potencia disipada:

$$I = \frac{P}{V} \quad (3.2)$$

La facilidad con que se puede modificar el nivel de tensión de la corriente alterna C.A. sin sufrir grandes pérdidas, frente a las dificultades de hacer lo mismo con corrientes continuas C.D, fue una de las principales razones por las que se impuso el uso de la corriente alterna.

El transformador eléctrico es una máquina de inducción mutua, diseñado para modificar la tensión de una corriente alterna, conservando el mismo valor de su frecuencia; y específicamente

los transformadores de distribución tiene dos aplicaciones básicas que son:

- Transporte de energía eléctrica: gracias a la capacidad que poseen de modificar los parámetros de intensidad y tensión, minimizando las pérdidas por calentamiento y efecto joule.
- Interconexión de líneas eléctricas a diferentes niveles de tensión: por la capacidad que tiene para transformar los niveles de tensión, los transformadores son ideales para interconectar líneas a diferente nivel de tensión dando para todas ellas una salida común.

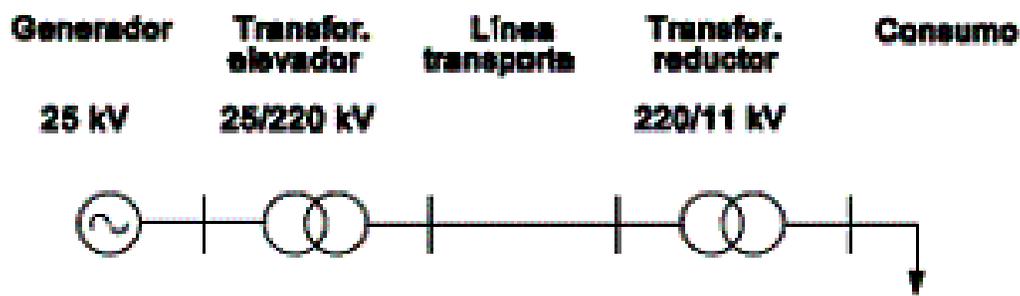


Figura 3-2. Uso de los transformadores en el consumo de energía.

Sin embargo, el transformador eléctrico también se emplea en circuitos de baja tensión para otras aplicaciones como lo son:

- Igualación de impedancias de carga.
- Fuente para tener máxima transferencia de potencia.
- Aislamiento de circuitos.

- Aislamiento frente a la corriente continua.
- Dispositivo auxiliar de aparatos de medida.

También son muy utilizados los transformadores en la soldadura eléctrica y hornos eléctricos, empleándose como unidades reductoras con pocas espiras en el primario y un lado secundario que se constituye por un solo conductor de cobre de gran sección.

Otra aplicación de los transformadores es en la audiofrecuencia, es decir, transformadores usados para la reproducción de sonido, el cálculo y diseño de este tipo de transformadores origina una mayor cantidad de problemas de los que podrían presentarse en la construcción de transformadores destinados al transporte y generación de energía.

En este tipo de transformadores, la frecuencia de operación es normalmente de 50 o 60 Hertz, sin embargo, en audio las frecuencias van desde los 35 hasta los 12000 Hz e incluso en ocasiones con valores superiores, además de que se trabaja con señales con formas de onda complejas y variables que requieren conservar la alta fidelidad; por ello la construcción de estos transformadores dependerá de factores secundarios que no son considerados en lo referente a la electricidad industrial.

3.3 PRUEBAS DE CIRCUITO ABIERTO A TRANSFORMADORES.

A esta prueba también se le conoce como "Prueba de Vacío" en el transformador, tiene como finalidad principal el determinar las pérdidas magnéticas y se desarrolla con uno de los devanados en circuito abierto, mientras que en el otro devanado se alimenta con voltaje nominal.

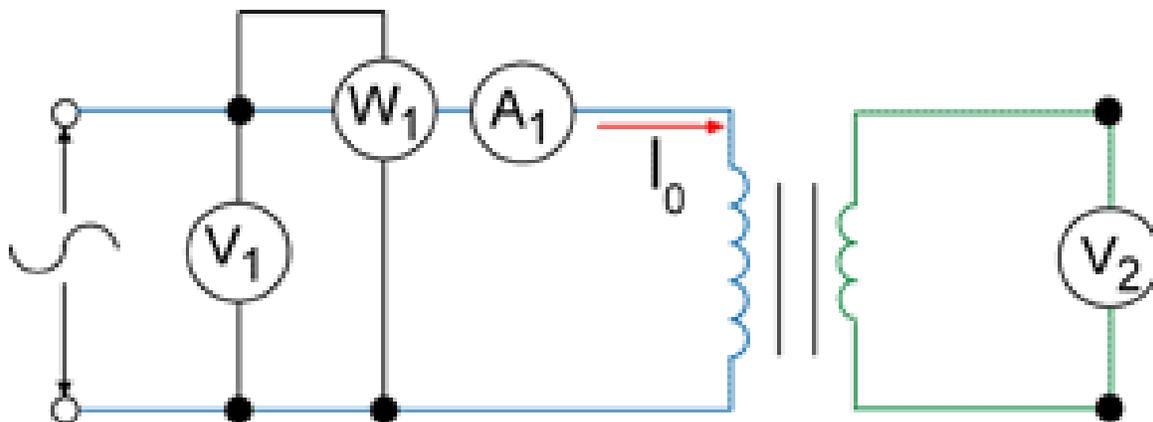
Cuando el transformador está sin carga, la corriente que circula por el devanado que se alimenta resulta ser muy pequeña, debido a esto, en estas condiciones las pérdidas en los devanados se consideran despreciables.

La corriente de vacío tiene dos componentes principales, una que produce el flujo en el núcleo y la otra que alimenta las llamadas pérdidas por histéresis y por corrientes circulantes; cuando este procedimiento se emplea con fines prácticos se recomienda colocar un wattmetro en el circuito de alimentación al transformador para poder medir las pérdidas en vacío.

Este tipo de pruebas en vacío, nos permite determinar los siguientes parámetros:

- Pérdidas de potencia en el hierro.
- Corriente magnetizante y de pérdidas.

- Relación de transformación.
- Factor de potencia en vacío.



Fuente: Manual de Pruebas a Transformadores ESIME-IPN 2009.

Figura 3-3. Conexiones para el ensayo en vacío.

Aun cuando para los propósitos de la prueba, no resulta importante de qué lado se alimente al transformador, sin embargo, por cuestiones de seguridad es recomendable que se alimente por el devanado de bajo voltaje.

Las pérdidas por histéresis son directamente proporcionales al flujo y al número de cambios del flujo por segundo, cuando se anda trabajando con corriente alterna C.A. para la onda senoidal.

El uso de aceros de muy alta calidad, minimiza las pérdidas por histéresis; de la teoría se ha llegado a la siguiente formula empírica para calcular este valor y es la siguiente:

$$P_h = K_h f B_m^n \quad \ll \text{Watts} \gg \quad (3.3)$$

Dónde:

K_h Es la constante que depende del volumen del núcleo y de la calidad del acero.

B_m Es la densidad de flujo máximo en el núcleo.

f Es la frecuencia de suministro de la línea de alimentación a la prueba ya sea de 50 o 60 Hz.

n Es la constante de Steinmetz, cuyo valor varia de 1.5 para aceros viejos a 2 para aceros nuevos.

Mientras tanto, las pérdidas por corrientes circulantes o también llamadas perdidas de Eddy, son de naturaleza electromagnética y se producen por el flujo local de las corrientes en las laminaciones de hierro.

Se crean exactamente de la misma forma que las pérdidas óhmicas en los devanados del transformador; estas dependen únicamente del valor máximo del flujo y son por lo tanto constantes para un transformador dado e independiente de la carga. Las pérdidas por corrientes circulantes se pueden controlar de forma efectiva laminando el núcleo con placas lo más delgadas posibles; la expresión matemática correspondiente a este tipo de pérdidas es la siguiente:

$$P_e = K_e f^2 B_m^2 t^2 \quad (3.4)$$

Dónde:

K_e Es la constante que depende del volumen del acero del núcleo y la resistividad del acero.

t Es el grueso de las laminaciones del núcleo.

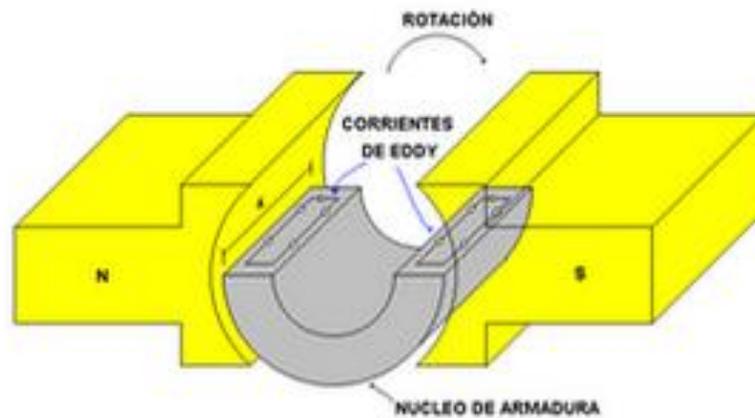


Figura 3-4. Corrientes circulantes para núcleo de armadura no laminada.

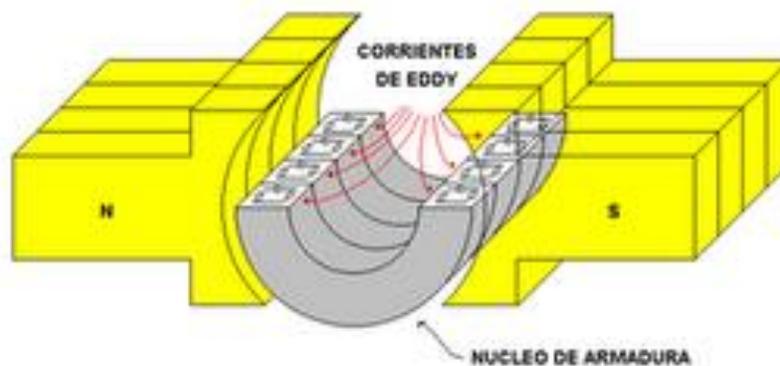


Figura 3-5. Corrientes circulantes para núcleo de armadura parcialmente laminado.

Por lo tanto para calcular las pérdidas totales en un ensayo en vacío, será la suma correspondiente a las perdidas por histéresis más las perdidas Eddy.

$$P_o = P_h + P_e \quad (3.5)$$

Quedando de la siguiente forma:

$$P_o = K_h f B_m^n + K_e f^2 B_m^2 t^2 \quad (3.6)$$

3.4 PRUEBAS DE CORTO CIRCUITO A TRANSFORMADORES.

En los transformadores, al igual que en cualquier dispositivo eléctrico, se producen perdidas de potencia, una parte de estas se producen ya en vacío y se mantienen constantes e invariables de carga.

Para poder simular lo que realmente ocurre en un transformador eléctrico, lo primero que hay que considerar para realizar el ensayo en corto circuito, es la elaboración de un protocolo de ensayo para seguir un orden determinado y denotar ahí los valores encontrados en la realización del ensayo.

PROTOCOLO DE ENSAYO DE TRANSFORMADORES							
Tipo de ensayo	ENSAYO EN CORTO CIRCUITO						
Características el transformador	P_1 ____ (VA)	V_2 ____ (V)	F ____ (Hz)				
	P_2 ____ (VA)	I_1 ____ (A)					
	V_1 ____ (V)	I_2 ____ (A)					
Objetivo del ensayo	Determinar las perdidas en el transformador						
Esquema de montaje							
Instrumentos de medidas y regulación a utilizar							
Tabla de valores de las medidas realizadas a diferentes valores de la tensión	V_1	V_2	I_1	I_2	W_1	W_2	Relación de transformación.
Cálculos definitivos de la potencia perdida.							

Fuente: Obtenida del Manual "Ensayo de Transformadores en Vacío y Corto Circuito". McGraw-Hill (2005).

Tabla 3-1. Muestra cómo se debe realizar un protocolo de ensayo.

En el ensayo en cortocircuito un devanado del transformador, generalmente el del lado de baja tensión, se cortocircuita. En el otro extremo se aplica una tensión inferior a la nominal aproximada entre 5% y 15 %, tal que haga pasar por el devanado en cortocircuito la corriente nominal del devanado conectado a la fuente de alimentación.

La determinación del valor de las pérdidas adicionales son necesarias para el cálculo del rendimiento, las pérdidas óhmicas pueden estar exactamente definidas como aquellas debidas al valor de la resistencia de los devanados y a la corriente que circula por ellos.

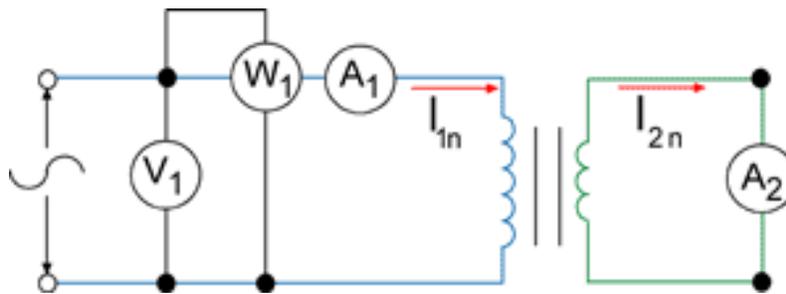
El valor de las pérdidas óhmicas que es proporcional al valor de la resistencia y al cuadrado de la corriente, como lo marca la ley de Joule; varia al cambiar la temperatura, en tanto es independiente del valor de la frecuencia.

Las pérdidas adicionales o parasitas dependen de la no uniformidad con la que la corriente alterna se distribuye en la sección de los conductores, y no son producto del flujo disperso ligado a la circulación de la corriente.

En ensayo en corto circuito de un transformador eléctrico se lleva a cabo para conocer principalmente las siguientes características que son:

- Pérdidas en el cobre.
- Tensión en cortocircuito.
- Impedancia.

- Resistencia.
- Inductancia.
- Intensidad de cortocircuito.
- Factor de potencia.
- Caídas de tensión activa y reactiva.
- Rendimiento.



Fuente: Manual de Pruebas a Transformadores ESIME-IPN 2009.

Figura 3-6. Conexiones para el ensayo en corto circuito.

El ensayo de cortocircuito, cuando hablamos de transformadores de potencia de dos devanados, se efectúa alimentando un devanado con tensión variable a la frecuencia nominal; mientras tanto el otro devanado, se conecta en corto circuito.

La selección del devanado a alimentar es indistinta y depende en gran parte únicamente de la facilidad de medición, por ejemplo si se usa un transformador con relación de 440/220 V es conveniente alimentar el devanado de alta tensión y cortocircuitar el de baja tensión.

Con un autotransformador regulable e iniciando desde cero, se va aplicando progresivamente la tensión, que se incremente voltio a voltio, hasta conseguir las intensidades nominales en los dos bobinados.

La tensión aplicada, una vez alcanzada la intensidad nominal en el secundario, recibe el nombre de tensión de cortocircuito V_{cc} , que supone debe tener un valor más bajo con respecto a la tensión nominal aplicada al transformador cuando está en carga; de igual forma, es necesario medir la frecuencia F , la corriente de cortocircuito I_{cc} , la potencia absorbida P_{cc} y la temperatura de los devanados.

Si los transformadores son enfriados por aire, la temperatura se mide directamente con los termómetros sobre los devanados, mientras que para las maquinas con enfriamiento por aire y aceite, se obtiene dicho valor de temperatura poniendo un contacto con el aceite a través de un tubo o elemento de contacto al termómetro.

Para obtener los resultados más confiables, dicha prueba debe realizarse con la mayor rapidez posible, para evitar calentamiento excesivo en los conductores de los devanados, cuyo valor de resistencia se debe mantener constante durante la prueba.

La impedancia equivalente referida al bobinado primario es:

$$Z_{eq} = \frac{V_{cc}}{I_{cc}} \quad (3.7)$$

La resistencia equivalente referida al bobinado primario es:

$$R_{eq} = \frac{P_{cc}}{I_{cc}^2} \quad (3.8)$$

La reactancia equivalente referida al bobinado primario es:

$$X_{eq} = \sqrt{Z_{eq}^2 - R_{eq}^2} \quad (3.9)$$

Cuando estamos hablando de un ensayo a cortocircuito, las pérdidas a plena carga en los devanados se obtienen como:

$$P_{cc} = I_{cc}^2 R_1 \quad (3.10)$$

Dónde:

R_1 Es el valor de la resistencia referida al devanado de alimentación.

Por lo que la ecuación 3.10, empleada para encontrar el valor de la resistencia del devanado de alimentación es:

$$R_1 = \frac{P_{cc}}{I_{cc}^2} \quad (3.11)$$

La impedancia de alimentación referida al devanado de alimentación se calcula de la siguiente forma:

$$Z_1 = \frac{V_{cc}}{I_{cc}} \quad (3.12)$$

De la ecuación anterior 3.12, la reactancia referida a devanado de alimentación se puede calcular como:

$$X_1 = \sqrt{(Z_1)^2 - (R_1)^2} \quad (3.13)$$

La eficiencia del transformador se puede calcular como:

$$\eta = \frac{\text{Potencia de salida}}{\text{Potencia de salida} + \text{Perdidas}} \quad (3.14)$$

Por lo que según lo anterior, obtendríamos la siguiente expresión:

$$\eta = \frac{\text{Potencia de salida}}{\text{Pot. de salida} + \text{Perdidas en hierro} + \text{Perdidas en devanados}} \quad (3.15)$$

La potencia de salida, puede escribirse también como:

$$P_s = V_s I_s \cos\phi \quad (3.16)$$

Dónde:

V_s Es el voltaje en el secundario o lado de la carga.

I_s Es la corriente en el secundario o lado de la carga.

Mientras tanto, las pérdidas en el núcleo P_o tienen un valor constante en forma independiente a los valores de carga.

En cambio, las pérdidas en los devanados varían con la carga, es decir, el valor de las pérdidas a un valor X de la carga se da por la siguiente tabla:

Perdidas en los devanados	
Condición	Expresión
A "X" carga	$X^2 P_{CC}$
A plena carga	$X=1$

Fuente: Manual de Diseño de Subestaciones. Luz y Fuerza del Centro. México (2005).

Tabla 3-2. Perdida en los devanados según el % de carga.

Por lo que la ecuación 3.14 de la eficiencia del transformador, quedaría finalmente como:

$$\eta = \frac{V_s I_s \cos\phi}{V_s I_s \cos\phi + P_o + X^2 P_{CC}} \quad (3.17)$$

Utilizando los datos de la prueba, se puede calcular también la regulación de voltaje del transformador como:

$$\% Reg = \frac{I_s R_s \cos\phi \pm I_s X_s \text{Sen}\phi}{\text{Voltaje en vacio}} \quad (3.18)$$

Dónde:

R_s Es la resistencia equivalente del transformador referida al lado secundario.

X_s Es la reactancia equivalente del transformador referida al lado secundario.

No hay que olvidar que el signo positivo (+) es empleado cuando hay carga inductiva; por lo tanto la ecuación 3.18 será de la siguiente forma:

$$\% Reg = \frac{I_s R_s \cos\phi + I_s X_s \text{Sen}\phi}{E_s} \quad (3.19)$$

Y el signo negativo (-) es empleado cuando hay carga capacitiva, modificando la ecuación original 3.18 de la siguiente forma:

$$\% Reg = \frac{I_s R_s \cos\phi - I_s X_s \text{Sen}\phi}{E_s} \quad (3.20)$$

CAPÍTULO 4



MANTENIMIENTO DEL TRANSFORMADOR ELÉCTRICO.

4.1 INTRODUCCION.

Es sabido por la mayoría de los ingenieros eléctricos que los transformadores son máquinas eléctricas que requieren de un menor cuidado, en cuanto a mantenimiento se refiere en comparación a otros equipos eléctricos.

El grado de inspección y mantenimiento necesarios para el buen funcionamiento de un transformador eléctrico depende en gran parte de su capacidad, de la importancia que este tenga dentro del sistema eléctrico, del lugar de instalación en el sistema, de las condiciones climatológicas y ambientales.

En general, hablamos de las condiciones de operación a las que esté sometido el transformador para saber qué tan importante debe ser su mantenimiento, su revisión debe efectuarse con la periodicidad establecida en base a la instalación o normas correspondientes.

Un transformador de alta, baja o mediana tensión con un buen sistema de aislamiento adecuadamente mantenido, será capaz de soportar de una mejor forma problemas como: sobre voltajes debido a maniobras o descargas atmosféricas, corto circuitos internos, entre otros problemas.

Para poder llevar a cabo un buen mantenimiento general de un transformador eléctrico, hay que basarse en unas normas básicas previas a la realización del mismo, las cuales detallan consejos básicos y generales que son los siguientes:

1. Primeramente, planificar el trabajo con anticipación a la parada y desconexión del transformador de la red eléctrica, solicitando los permisos previos y efectuando todos los avisos que sean necesarios.
2. Recopilar la información técnica necesaria relativa al transformador eléctrico y a sus equipos auxiliares como ventiladores, sistemas de control, etc.
3. Revisar el protocolo de seguridad necesario, incluyendo los equipos necesarios como las puestas a tierra o señalizaciones existentes.
4. Seleccionar al personal necesario y debidamente capacitado para realizar las tareas de mantenimiento, de igual forma los materiales y herramientas adecuada.

Por lo anterior, al mantenimiento del transformador eléctrico se considera en términos de los siguientes puntos:

- Factores que influyen en el deterioro del sistema de aislamiento del transformador.

- Las actividades y pruebas de rutina que nos permitan emitir un dictamen sobre el estado actual del transformador.
- El significado de los resultados obtenidos en las pruebas de diagnóstico realizadas.
- Con que frecuencia se deben realizar las pruebas de diagnóstico.
- Las medidas correctivas que se deberán tomar en caso que se presente alguna anomalía en el mantenimiento preventivo periódico.

4.2 DEFINICIONES Y TIPOS DE MANTENIMIENTO.

En ingeniería especialmente, así como en las telecomunicaciones la importancia del mantenimiento es muy grande, ya que de él depende que cualquier actividad se pueda efectuar en condiciones adecuadas; es por eso que el mantenimiento definido como un conjunto de operaciones para que un equipo reúna las condiciones para el propósito por el que fue construido se divide en tres tipos que a continuación se describen:

- ✓ Mantenimiento Preventivo: "es el que está destinado a la conservación de equipos o instalaciones mediante la inspección, realización de pruebas, ajustes, reparaciones, toma de muestras, etc. que garanticen su buen

funcionamiento y fiabilidad, minimizando su degradación y pérdida de vida útil¹⁷.

- ✓ Mantenimiento Predictivo: “es una técnica no destructiva que está destinada a monitorear regularmente, es decir, más seguido que el mantenimiento preventivo, los parámetros “claves” de un equipo en operación con el objetivo de detectar y corregir a tiempo un problema potencial antes de que se produzca una falla en el equipo”¹⁸.
- ✓ Mantenimiento correctivo: es aquel que corrige los defectos y fallas observados en equipos o instalaciones cuando se detecta que su desempeño comienza a disminuir, para evitar que el problema se agrave.

4.3 MANTENIMIENTO PREVENTIVO DEL TRANSFORMADOR ELECTRICO EN SECO.

Los transformadores encapsulados en seco, son prácticamente libre de mantenimiento, su única fuente de enfriamiento es el aire de la intemperie; sin embargo precisan una serie de atenciones de suma importancia para su normal funcionamiento y son las siguientes:

¹⁷ Gilberto Harper Enríquez. *Pruebas y mantenimiento a equipos eléctricos*. México DF. Editorial Limusa. 2005.

¹⁸ Gilberto Harper Enríquez. *El libro practico de los generadores, transformadores y motores eléctricos*. México DF. Editorial Limusa 2005.

- El polvo que se deposita en gran cantidad en las partes del transformador juega un papel de aislante térmico, por lo que la temperatura del equipo aumenta, por tal motivo es necesario realizar limpiezas de forma regular utilizando solventes dieléctricos y con artefactos de aspiración y no soplado.
- Control de las termocuplas que miden las temperaturas del núcleo y de los arrollamientos.
- Verificar el funcionamiento de la ventilación forzada.
- Ajustar de forma general al transformador, principalmente el sistema de sujeción de los bobinados y bornes, tanto de alta como baja tensión.
- Medición y análisis de posibles fallas mediante termografía infrarroja.
- Control de la no presencia de humedad.

Los transformadores secos se destacan, pues son ecológicamente insuperables, debido a la total ausencia de líquidos aislantes, no representan riesgo alguno de explosión o de contaminación, además del hecho de ser fabricados únicamente con materiales que no atacan el medio ambiente.

Además estos transformadores requieren de inspecciones periódicas para confirmar su óptimo estado de funcionamiento a continuación se enlistan:

1. Inspecciones periódicas:

Los registros operacionales deben obtenerse a través de lecturas de los instrumentos indicadores, de las ocurrencias extraordinarias envolviendo el transformador, así como cada evento relacionado, o no, con la operación del sistema eléctrico, que pueda afectar el desempeño y/o características intrínsecas del equipo.

2. Inspección Termográfica:

Estas inspecciones deben realizarse periódicamente en las instalaciones, particularmente para detectar calentamiento anormal en los conectadores.

3. Inspecciones Visuales:

Estas deben hacerse, siguiéndose un itinerario previamente establecido, lo cual debe abarcar todos los puntos cubiertos.

En la siguiente tabla se pueden apreciar algunas anomalías que se presentan en los transformadores eléctricos, incluso sus posibles causas y la solución sugerida a cada una de ellas.

ITEM	ANORMALIDADES	POSIBLES CAUSAS	SOLUCION SUGERIDA
1	Sobrecalentamiento en las terminales de VOLTAJE ALTO, VOLTAJE BAJO y puntos de conexión y panel de conmutación.	Mal contacto.	<ul style="list-style-type: none">- Limpieza de las áreas de contacto.- Apretar tuercas y tornillos.

2	Sobrecalentamiento del transformador	Sobrecarga arriba de la prevista.	<ul style="list-style-type: none"> - Disminuir la carga. - Aumentar la refrigeración.
		Circulación de aire de refrigeración insuficiente.	<ul style="list-style-type: none"> - Limpiar canales de aire de refrigeración del transformador. - Inspeccionar conductos y aperturas por circulación de aire de refrigeración, con respecto a dimensiones apropiadas y obstrucciones indeseadas.
		Temperatura del aire de refrigeración arriba de la temperatura prevista.	<ul style="list-style-type: none"> - Disminuir la carga. - Aumentar la circulación del aire de refrigeración.
3	Actuación del relevador de protección (alarma y/o detenimiento)	Sobrecalentamiento del transformador.	- Según ítem 2.
		Falta de voltaje de alimentación del interruptor electromagnético.	<ul style="list-style-type: none"> - Asegurarse que exista voltaje de alimentación en el relevador. - Verificar el correcto funcionamiento del relevador.
4	Descarga entre terminales de VOLTAJE ALTO. Descarga entre VOLTAJE ALTO y masa.	Reducción de la resistividad superficial del material aislante debido a la existencia de cuerpos extraños.	- Limpieza general con la remoción de los cuerpos extraños depositados en la superficie.
	Descarga entre voltaje alto/ voltaje bajo. Descarga entre voltaje bajo/masa.	Destrucción del material aislante debido a sobre voltaje, sobrecalentamiento o esfuerzos mecánicos mayores que el previsto.	- Reemplazar o reparar la pieza dañada.

5	Ruido excesivo.	<p>Voltaje más alto que lo previsto.</p> <p>Asentamiento desigual de la base del transformador.</p> <p>Resonancia con las superficies alrededor del equipo.</p>	<p>- Verificar el voltaje correcto y ajustar a la derivación más adecuada.</p> <p>- Verificar la existencia de superficies metálicas como paneles, armarios, conductos o puertas que puedan causar vibraciones.</p>
		<p>Resonancias transmitidas por las ligaciones.</p>	<p>- Instalación de elementos flexibles entre las terminales del transformador y los conductores de la instalación.</p>

Fuente: Guía para el mantenimiento de transformadores de potencia, por el Ing. Gustavo Bermúdez.

Tabla 4-1. Identificación de problemas y sus posibles soluciones.

4. Limpieza:

Es un factor muy importante para lograr el mejor funcionamiento del transformador eléctrico, la limpieza debe ser constante y eficiente para que no ocurra perjuicio de características importantes del transformador.

Por ese motivo, a continuación se enlistan los cuatro procedimientos usados con mayor frecuencia en la limpieza de transformadores secos y son los siguientes:

a). Con el uso de un aspirador de polvo, plumero y paño seco, remover el polvo depositado encima del transformador. Enseguida usar aire comprimido para remover los residuos faltantes y limpiar los canales de ventilación de las bobinas y entre la bobina y el núcleo.

La inyección de aire en los canales de ventilación debe hacerse de abajo hacia arriba, mientras que la presión del aire debe no ser mayor a las 5 atm; para finalizar, se usa el paño seco y limpio para remover residuos que aún permanecen en las bobinas, generalmente alrededor de las terminales.

b). Con ayuda de un paño humedecido con benzina, remover las impurezas del núcleo, herraje y bobinas, repetir este paso con un paño seco y limpio. Asegurarse de que los canales han sido desobstruidos totalmente y si las impurezas en los canales están secas, se debe adoptar el procedimiento "a)" para esta operación de limpieza.

c). Con el uso de un paño humedecido en una pequeña concentración de amoníaco o alcohol, se deben remover impurezas del transformador. La limpieza puede ser complementada usando alguno de los procedimientos anteriores, dependiendo del tipo de suciedad que deba ser removida.

d). La finalización deberá hacerse siempre con un paño limpio y seco para limpiar toda la superficie, particularmente en la región de las terminales del transformador.

En base a los procedimientos de limpieza para transformadores descritos con anterioridad, según el tipo de suciedad encontrada se debe emplear algún método de limpieza como lo indica la siguiente tabla:

Tipo de suciedad encontrada	Procedimiento utilizado
Polvo seco en general	A y D
Polvo húmedo	C y D
Salinidad del mar	A y D
Polvo metálico (polvo industrial)	A y D
Aceites en general	B, C y D
Grafita o similares	A y D

Fuente: Manual Técnico de Mantenimiento Delta Transformadores. Monterrey.

Tabla 4-2. Procedimientos de limpieza para transformadores secos.

4.4 MANTENIMIENTO PREVENTIVO DEL TRANSFORMADOR ELECTRICO EN ACEITE.

Este tipo de mantenimiento en el caso de los transformadores eléctricos representa una herramienta clave en la gestión de redes de transmisión y distribución de energía eléctrica.

Los sistemas eléctricos requieren de máxima confiabilidad y aunque el riesgo de falla en un transformador eléctrico es muy bajo, cuando la falla se presenta, es inevitable incurrir a altos costos de reparación y largos periodos de espera; por otra parte, los transformadores eléctricos son equipos de costoso reemplazo, por lo que se debe contar con un adecuado programa de mantenimiento para un buen funcionamiento y prolongar su vida útil.

Hay una gran cantidad de opiniones que manifiestan que la primera clave en el mantenimiento preventivo del transformador eléctrico, es un análisis de su aceite, con el propósito de señalar la condición de su sistema de aislamiento para que se evite la formación de lodos en el interior del mismo.

Sin embargo, la aplicación de revisiones programadas de los componentes y parámetros de operación del transformador eléctrico, hará más saludable la vida útil del equipo; no hay que olvidar que el mantenimiento y las revisiones conllevan un trabajo peligroso, por ello debe diseñarse un programa que contenga los

pasos necesarios y medidas de seguridad adecuadas poniendo especial atención en las personas y equipo.

Para la buena aplicación del mantenimiento preventivo del transformador, es muy importante que se registren las lecturas de los medidores instalados en él, por qué arrojan datos de gran utilidad; cuando las lecturas sean muy diferentes a las obtenidas en condiciones normales, se debe realizar una cuidadosa verificación de las mismas.

Adicionalmente, se debe prestar mucha atención a otros fenómenos anormales tales como ruido, cambio de color u olor que sean fácilmente detectables a través de los sentidos; a continuación se hará mención de algunos puntos críticos que se deben de considerar a la hora de llevar a cabo las inspecciones y el programa de mantenimiento preventivo del transformador:

1. Temperatura del transformador:

Esta característica está directamente relacionada con la vida de los materiales del sistema de aislamiento del transformador eléctrico.

En el caso de los transformadores eléctricos construidos bajo supervisión de las normas ANSI (American National Standard Institute) la temperatura máxima permitida para el aceite es de 90 °C y para el punto más caliente es de 110 °C.

Todas las lecturas de la temperatura del aceite deberán ser registradas y comparadas frecuentemente con la carga del transformador, los indicadores de temperatura máxima en los medidores del transformador deberán ser regresados hasta la lectura de temperatura de operación al momento de la inspección, una vez que las lecturas hayan sido tomadas.

2. Nivel de aceite:

Esta cualidad es sumamente importante, el nivel de aceite tiene que ser revisado desde el punto de vista de su aislamiento y de la refrigeración.

El nivel de aceite variara con la temperatura, por ende las lecturas de temperatura deben ser consideradas cuando se tomen los datos de nivel de aceite; cuando el nivel de aceite fluctuó notoriamente en relación con la temperatura, se debe detectar la causa para tomar medidas correspondientes de manera oportuna.

En caso de que los pasatapas sean equipados con mirillas o tengan medidores de nivel de aceite, dicho nivel deberá ser verificado con el fin de detectar alguna fuga del mismo en el pasatapas.

3. Nivel de ruido:

En algunos casos se puede percibir algún ruido anormal, cuando se está familiarizado con el sonido que el transformador produce en condiciones de operación normales, lo cual nos puede ayudar a detectar alguna anomalía presente.

Pueden ser una gran cantidad de razones las causantes de un ruido anormal en el transformador eléctrico, a continuación se mencionan las más importantes:

- a).- Un defecto en el mecanismo de ajuste del núcleo.
- b).- El aflojamiento de piezas.
- c).- Resonancia del tanque y los radiadores debido a cambios de frecuencia en la fuente de potencia.
- d).- Ruido por descarga estática, debido a partes metálicas que carezcan de tierra o alguna imperfección en la puesta a tierra.
- e).- Algún defecto en la estructura central, probablemente se encuentren flojos los pernos de las piezas de sujeción de las bridas.

No hay que olvidar que un transformador eléctrico no es un equipo completamente simétrico, por lo tanto, es ilógico tomar una lectura de nivel de ruido con ayuda de algún aparato para el efecto y llamar así a esa lectura "Nivel de ruido de transformador".

Para obtener el nivel de ruido fidedigno de un transformador es necesario tomar varias lecturas alrededor del mismo y promediarlas de forma que el resultado sea el ruido del transformador, se recomienda basar los resultados con los estándares de las normas ANSI C57-12-90 y NEMA TRI-2-068-1954.

4. Fugas de aceite:

Estas pueden ser causadas por el deterioro del tanque de almacenamiento o alguna empaquetadura dañada por la variación y constante incremento de la temperatura de calentamiento, por ende, deben verificarse minuciosamente las válvulas y empaques.

5. Aflojamiento de las piezas de fijación y válvulas:

Cuando se detectan las terminales de tierra flojas, se debe desenergizar al transformador para poder apretarlos enseguida, los pernos de los cimientos que están sujetos a grandes cargas, deben ser reapretados fuertemente para evitar el desplazamiento del transformador.

6. Presión del nitrógeno.

Cuando estamos trabajando con transformadores eléctricos del tipo sellado, una lectura de cero en el medidor de presión/vacío por una extensión de tiempo determinada, indica que existe alguna fuga en el sistema de sellado.

El medidor de presión/vacío siempre debe arrojar una lectura de presión positiva mayor a 2 lbf/plg² o de lo contrario, humedad y contaminantes ajenos pueden ingresar al interior del transformador.

7. Ventiladores:

Estos deberán ser accionados de forma manual o electrónica a través de sensores, cuando la temperatura se vea incrementada para asegurar un buen funcionamiento del transformador.

8. Superficie del tanque:

Es de gran importancia detectar la presencia de algún tipo de corrosión o herrumbre en la superficie del tanque del transformador eléctrico, en caso de que se presenten manchas de aceite deberán ser consideradas como sinónimo de existencia de fugas hasta que se demuestre que no es así.

9. Respiradores de sílica gel:

Solo para transformadores eléctricos provistos con respiradores de sílica gel, estos deberán ser revisados periódicamente con el fin de detectar si existe alguna decoloración de azul a rosado o blanco, que pueda ser una señal indicativa de saturación de humedad y contaminantes en el respirador.

4.4.1 Mantenimiento e inspección del aceite.

Dentro de los elementos constitutivos del transformador, el sistema de aislamiento es el componente más importante y es al que se le debe cuidar en mayor grado, existen cuatro factores que afectan al sistema de aislamiento de un transformador en aceite y son:

1.- La humedad: puede presentarse en el interior del transformador en forma disuelta o como emulsión agua/aceite, en estado libre al fondo del tanque y en forma de hielo en el fondo del tanque siempre y cuando la gravedad específica del aceite sea mayor a 0.9 o de lo contrario el hielo flotara.

2.- El oxígeno: puede reaccionar con el aceite formando ácidos orgánicos, agua y lodo.

3.- El calor: este presenta problemas con el paso el tiempo, ya que las elevadas temperaturas causan un envejecimiento del aislamiento.

4.- Los contaminantes externos: provienen del proceso de manufactura del transformador y no fueron eliminados debidamente.

La ATSM posee un listado que contiene 33 pruebas realizables a los aceites dieléctricos, sin embargo las pruebas más útiles para diagnosticar el estado de un transformador y su aceite dieléctrico son 9 y a continuación se mencionan:

- Rigidez dieléctrica (D877-D1816).
- Número de neutralización (D974).
- Tensión interfacial (D971-D2285).
- Color (D1500).
- Contenido de agua (D1533).

- Densidad relativa (D1298).
- Factor de potencia (D924).
- Inspección visual (D1524).
- Cromatografía de gases (D3612).

Cuando se realiza un monitoreo anual del aceite basado en las pruebas descritas anteriormente, la presencia de contaminantes se detecta mucho antes de que se empiecen a formar lodos.



Figura 4-1. Inspección de las condiciones del aceite de un transformador.

Si no se realiza este monitoreo, los lodos que lleguen a formarse se van a depositar en el sistema de aislamiento sin ser detectados y se reducirá en gran porcentaje la vida del mismo.

4.4.2 Mantenimiento e inspección de los pasatapas.

Hay una gran cantidad de actividades que se deben considerar a la hora de realizar un mantenimiento periódico a los pasatapas, tanto de alta como de baja tensión del transformador eléctrico.

Estas actividades deberán ser realizadas periódicamente de una manera efectiva, ya que es la única forma en que se puede determinar cuando el aislador constituye un riesgo inminente para la continuidad del transformador en servicio; es por ello que se mencionan a continuación:

1. Revisión de la temperatura:

Esta se hace en las terminales de los pasatapas, ya que podría existir algún tipo de sobrecalentamiento en esta parte si los aprietes no se encuentran perfectamente ajustados.

2. Limpieza completa:

Cuando exista mucho polvo o cualquier otra impureza ambiental, el pasatapas debe limpiarse con agua, amoníaco, tetracloruro de carbono o ácido diluido 40 o más veces en agua.

En caso de que se necesiten emplear soluciones químicas para la limpieza del pasatapas, deberá tenerse sumo cuidado de no tocar ninguna parte metálica con ellas; adicionalmente después de la limpieza, las partes de porcelana tendrán que neutralizarse con

agua que contenga bicarbonato de sodio $NaHCO_3$ en proporción de 30 gr/l de agua.

3. Verificación de la existencia de daños menores:

Revisar minuciosamente alguna fisura o algún chisporroteo. Cuando se tenga expuesta al medio ambiente la parte áspera de la porcelana, dicha parte se deberá sellar con un barniz para evitar el ingreso de humedad; cuando exista alguna fisura, el pasatapas deberá ser repuesto por uno nuevo. En caso de que se presente chisporroteo es necesario hacer pruebas de factor de potencia y resistencia del aislamiento para verificar si el pasatapas deberá cambiarse o no según la eficiencia de los resultados obtenidos.

4. Evaluación del estado del sistema de aislamiento:

Son varios los métodos usados para detectar el deterioro del aislamiento como la medición de la resistencia de aislamiento y el factor de potencia del aislamiento.

El poder efectuar estos métodos, no es una tarea sencilla debido a que el pasatapas y los devanados del transformador deben independizarse para el efecto; no obstante la medición se deberá realizar lo mejor posible.



Figura 4-2. Revisión periódica de pasatapas de un transformador.

4.4.3 Mantenimiento e inspección del sistema de ventilación.

Esta parte se puede considerar como la más importante dentro del funcionamiento normal del transformador eléctrico, ya que los ventiladores permiten sobrecargar el transformador sin que este experimente sobre calentamientos, es decir, mantiene los calentamientos del transformador por debajo de los límites normalizados y permitiendo así incrementar su potencia sin disminuir su vida útil.

Para lograr una inspección satisfactoria, se debe verificar la existencia de alguna fuga de aceite en los tubos colectores o en las aletas de los radiadores; de igual forma el estado de la pintura es

importante. Se debe realizar la limpieza del polvo y suciedad que se pueda acumular entre ellos, especialmente en la unión entre aletas y tubos colectores.

La remoción de dicha suciedad es importante, ya que esta resta eficiencia a la acción del radiador y con el tiempo puede dar origen a un proceso de oxidación del metal; en caso de que los radiadores sean de tipo desmontable se debe revisar que las válvulas se abran correctamente.

Cuando el transformador tenga ventiladores y bombas de circulación se recomienda revisar la temperatura, vibración, ruido, oxidación y estado de la pintura; también es recomendable, que anualmente se desmonten los rodamientos del motor que los acciona y se remplace la grasa vieja de los mismos.



Figura 4-3. Inspección del sistema de ventilación de un transformador a través de cámaras termografías.

4.4.4 Mantenimiento e inspección de los medidores de temperatura.

Verificar la temperatura del transformador es muy importante, sobre todo cuando se encuentra en operación, ya que esto es indicativo de las condiciones de funcionamiento del mismo. Para que esto se pueda lograr, deberán revisarse y mantenerse en buen estado los medidores de temperatura de manera que sean confiables las lecturas que nos estén proporcionando.

La mayoría de los transformadores modernos tienen medidores de temperatura tipo reloj, los cuales son un tipo de medidor de presión con un bulbo de Bourdon que tienen un líquido o gas especial conectado a un tubo muy fino; dicho tubo mueve la aguja por expansión o contracción del fluido. Sin embargo con el paso del tiempo, el bulbo se desgasta, al igual que el soporte y el piñón, por lo que pueden darse indicaciones de temperatura erróneas.

Se puede comprobar la calibración del medidor de temperatura y para eso hay que desmontarlo del transformador, una vez desmontado, se deberá colocar el bulbo en agua hirviendo aproximadamente a 100 °C o en un baño de agua con temperatura homogénea y usando un termómetro de mercurio confiable para comparar las temperaturas obtenidas.

Solo en caso que la diferencia de temperaturas sea menor a 5° C, se reajustara la aguja del medidor tipo reloj girando con cuidado el

perno de la misma; si el error de lectura es superior a 5° C es necesario contactar al fabricante o proveedor para adquirir un nuevo medidor de temperatura.

Cuando el cristal de protección del medidor de temperatura esta empañado por humedad, solo basta con destaparlo y limpiarlo con un paño seco y cambiar el empaque para un mejor sellado.



Figura 4-4. Reemplazo de medidor de temperatura de un transformador eléctrico.

4.4.5 Mantenimiento e inspección de los medidores de nivel de aceite.

El medidor de nivel de aceite requiere el mismo cuidado que el indicador de temperatura. Además, como es un indicador que posee un flotador metálico, requiere atención especial cuando ay una indicación incorrecta debida a la penetración del aceite al flotador causada por las vibraciones o por funcionamiento de tiempo prolongado.

Lo que se debe hacer primeramente para revisar el medidor de aceite de un transformador, es retirar el mecanismo exterior del medidor sin necesidad de reducir el nivel de aceite, posteriormente de haber removido la parte exterior, se procede a sostener con un imán la parte posterior del mecanismo y hacerlo rotar; si el indicador no se mueve junto con la rotación del imán, podría existir un mal funcionamiento del medidor.

En algunos casos, es posible que exista un circuito de control que haga sonar una alarma o produzca la desconexión del transformador cuando el nivel de aceite se encuentra por debajo del nivel predeterminado. Dicho circuito, deberá ser probado con un ohmímetro con el objeto de determinar su estado. Además, los circuitos de alarma deberán ser probados para ver si las respuestas de desconexión son obtenidas.

4.4.6 Mantenimiento e inspección del relevador de buchholz.

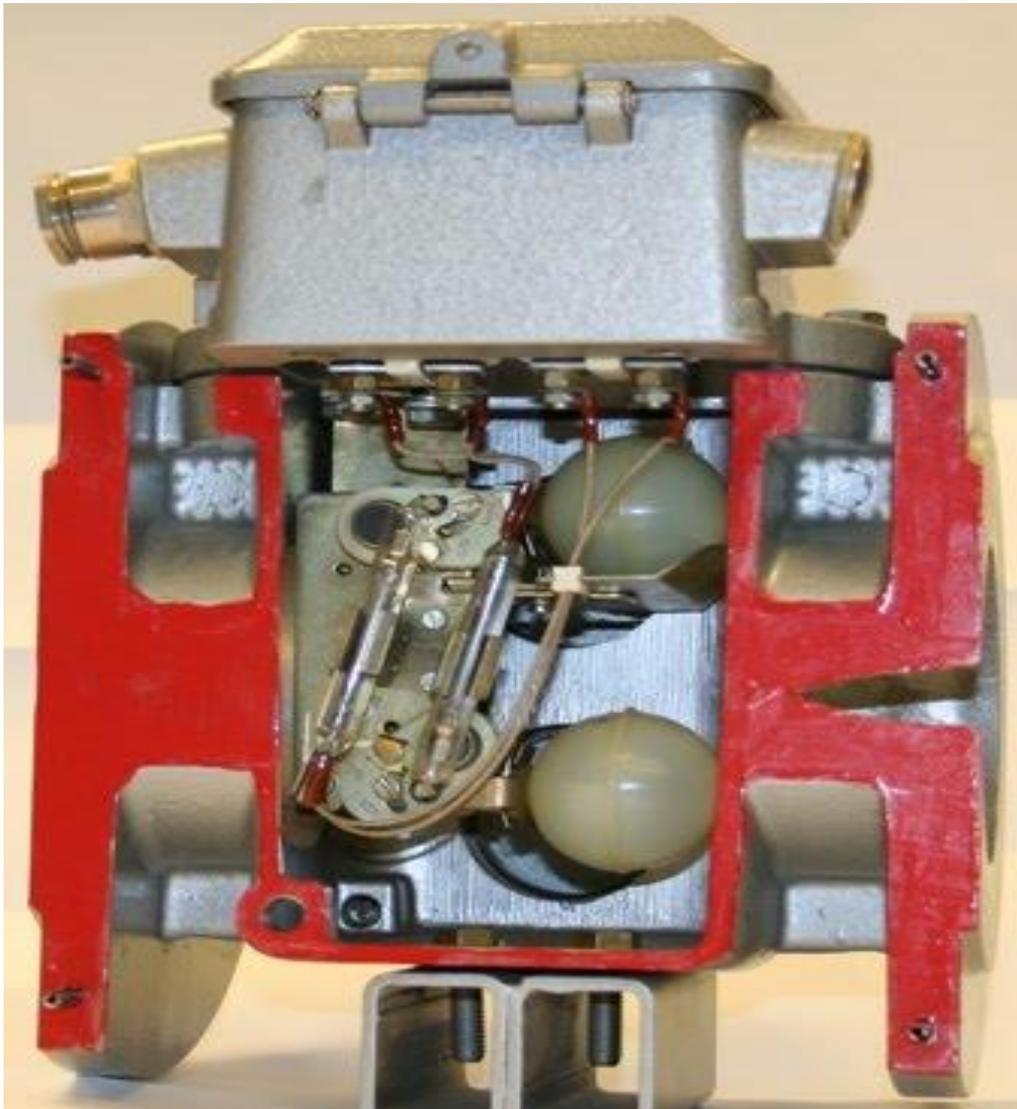
El relevador es un dispositivo de seguridad montado sobre algunos transformadores que tengan un sistema de refrigeración mediante aceite.

El relevador de Buchholz es usado como un dispositivo de protección sensible al efecto de fallas dieléctricas o térmicas dentro del equipo eléctrico, razón por la cual su mantenimiento debe realizarse siempre que el transformador se encuentre desenergizado; al efectuarse el mantenimiento se debe considerar también el funcionamiento óptimo de los flotadores y un nivel de aceite adecuado.

Con el fin de verificar que los flotadores funcionen adecuadamente, se bomba a aire a través de la válvula de evacuación de gases, ya sea por medio de una manguera con aire comprimido o una bomba manual; la acción anterior deberá bajar el nivel de aceite en el relevador y podrá ser controlado por las mirillas que posee el relevador para su efecto.

Cuando se envía el aire al interior del relevador el flotador superior o de alarma desciende, debiéndose en ese momento activar la alarma; una vez finalizada la inspección se deberá dejar escapar el aire del relevador Buchholz y cerrar la válvula de evacuación; el flotador inferior y el circuito de desconexión no pueden ser

inspeccionado a través de la inyección de aire a presión al relevador, dependiendo el tipo de relevador se provee de una varilla que permita activar ambos flotadores hasta que el circuito de disparo sea activado.



Fuente: Tomada de Manual de Laboratorio de Equipo Eléctrico, UTVM Hidalgo.

Figura 4-5. Estructura interna del relevador Buchholz.

4.4.7 Mantenimiento e inspección de la válvula de sobrepresión.

El mantenimiento principal que se le brinda a la válvula de sobrepresión del transformador eléctrico es el cambio del diafragma de vidrio, en caso de que este se rompiera accidentalmente o por un aumento de presión en el transformador deberá ser remplazado inmediatamente por otro del mismo espesor y con las mismas dimensiones, ya que un diafragma dañado permite el ingreso de oxígeno y humedad al transformador.

Para saber si la válvula se ha activado, se debe observar un indicador de color amarillo o azul con una superficie aproximada de 2 pulgadas sobre el nivel de la parte superior de la válvula de sobrepresión. Generalmente, cada 3 a 5 años se debe hacer una revisión alrededor de la válvula de sobrepresión para ver que no existan manchas de aceite en la periferia de la misma, en caso contrario la empaquetadura deberá ser remplazada con urgencia.

4.4.8. Mantenimiento e inspección del tanque.

El tanque del transformador eléctrico es una de las partes que requiere de un mantenimiento mínimo, en comparación a otras partes que lo constituyen, por lo que cada vez que el transformador se encuentre desenergizado se deberán inspeccionar los siguientes componentes:

- a) Verificación y limpieza de los puntos de puesta a tierra del tanque.
- b) Revisión del estado de la pintura del tanque en la totalidad de su superficie, especialmente en las esquinas y cordones de soldadura; de encontrarse anomalías se deberá programar en el próximo paro del transformador la aplicación de una nueva capa protectora de pintura para evitar el avance de la corrosión.
- c) Revisar las uniones que tienen las empaquetaduras en sus juntas con la finalidad de observar si no existen fugas en ellas; en caso de que se presente una fuga, los pernos de ajuste deberán ser apretados nuevamente y en el último de los casos las empaquetaduras tendrán que remplazarse en su totalidad.



Figura 4-6. Repintado y cambio de empaquetaduras en tanque de transformador eléctrico.

4.4.9 Mantenimiento e inspección del cambiador de taps.

Es un mecanismo del transformador que permite seleccionar el número de espiras de este, así se consigue que el transformador con el número de espiras variable, permita la regulación de voltaje en el devanado secundario; generalmente las tomas son hechas en los devanados de alto voltaje para minimizar los requerimientos de los contactos en el manejo de niveles de corriente; existen dos tipos de cambiador de taps unos trabajan sin tensión y los otros bajo carga.

El cambiador de taps diseñado para trabajar sin voltaje requiere de un mantenimiento mínimo, por no decir que prácticamente es nulo; sin embargo, es recomendable que cada vez que se realice un mantenimiento preventivo general del transformador se verifique su correcto funcionamiento.

Cuando estamos hablando de un cambiador de taps diseñado para operar bajo carga se deben considerar ciertos factores en su mantenimiento que son:

- El número de operaciones del cambiador.
- La magnitud de la corriente de carga a la que está sometido.

El aceite que contiene el cambiador de taps en sus compartimentos deberá ser revisado anualmente, si la rigidez dieléctrica del mismo se encuentra por debajo de los 22 KV habrá

que remplazarlo por aceite nuevo; cuando el aceite sea retirado al cambiador se deben tomar ciertas precauciones por recomendación y son las siguientes:

1. Estar seguro de que los tanques donde se colocara el aceite se encuentren libres e impurezas y completamente secos.
2. Estar seguro de que el aceite sea nuevo antes de ingresarlo a los compartimentos del cambiador.
3. Revisar antes de introducir el aceite, que se encuentre limpio de partículas de carbón.
4. Después de que este llenado con aceite el cambiador de taps y antes de energizar al transformador, realizar nuevamente la prueba de rigidez dieléctrica y el resultado deberá ser superior a los 28 KV.
5. El cambiador de taps no deberá ser energizado si la prueba arroja valores inferiores a los 22 KV o 26 KV para transformadores que operan a tensiones extra elevadas.

Dentro de las operaciones de mantenimiento del cambiador de taps deberán también revisarse los contactos que no tengan picaduras; en caso de existir, tendrán que ser cepilladas para garantizar un buen contacto y una buena conducción.



Figura 4-7. Medición de nivel de tensión, para verificar el buen funcionamiento del cambiador de TAPS.

4.4.10 Mantenimiento e inspección del respirador silica gel.

El único mantenimiento que requiere el respirador de silica gel, una vez que se ha detectado un cambio en su coloración, es la regeneración de la silica gel, donde se eliminara la humedad absorbida por ella. Para regenerarla, se deberá colocar la silica gel en una cubeta o recipiente limpio y agitarlo mientras se calienta a una temperatura de entre 100 y 140 °C hasta que el color rosado cambie a color azul; posteriormente se deberá revisar la empaquetadura existente entre el recipiente y las partes metálicas de fijación del respirador estén en buen estado y correctamente sujetas, de manera que se evite que el transformador tenga una fuente de aire que no sea la de la parte inferior del recipiente del respirador.

CONCLUSIONES

Una vez finalizada la realización de este trabajo para titulación que lleva por nombre "Descripción, Selección y Aplicación de los Transformador Eléctricos" se concluye que los transformadores son una de las maquinas eléctricas fijas con mayor porcentaje de eficiencia en los sistemas de producción y distribución de energía eléctrica.

Además de ser los puntos principales entre el sistema de distribución y los centros de consumo de energía, por lo que se requiere de su correcta operación la cual se garantiza, mediante la aplicación de una serie de pruebas de rutina por las cuales se deben someter una vez terminada su construcción.

Es de vital importancia que se realice un control anual de las condiciones operáticas del transformador, ya que, si bien es cierto que la resistencia del aislamiento junto con los valores del factor de potencia del aislamiento son satisfactorios, los índices de absorción y polarización no lo son, sugiriendo lo anterior a un deterioro del aislamiento del transformador como producto del envejecimiento o falta de mantenimiento.

BIBLIOGRAFIA.

- Castro Artigas Pedro, *Transformadores*, Madrid España. Tebar Flores, 1996. 131 páginas.
- Avelino Pérez Pedro, *Transformadores de distribución: teoría, cálculo, construcción y pruebas*. México DF. Editorial Alfaomega, 2009. 236 páginas.
- Ras i Oliva, Enric, *Transformadores de Potencia y medida de protección*. Barcelona España. Morcombo, 1975. 280 páginas.
- Álvarez Pulido Manuel, *Transformadores: calculo fácil de transformadores y autotransformadores, monofásicos y trifásicos de baja tensión*. México DF. Editorial Alfaomega, 2009. 236 páginas.
- Nessler, Herbert, *Constitución y funcionamiento del transformador*, Barcelona España. Marcombo. Siemens Aktiengesellschaft. 1990. 60 páginas.
- Massachusetts Institute Of Technology, Electrical Engineering Staff M.I.T. *Circuitos Magnéticos y Transformadores: Estudio amplio de las características físicas de los circuitos magnéticos y de su aplicación al cálculo y diseño de los mismos y de los*

transformadores. Barcelona España. Ed. Reverte. 1955. 697 páginas.

- Chapman, Stephen J. *Maquinas Eléctricas*. México DF. Editorial McGraw-Hill Interamericana. 2005. 746 páginas.
- Delta Transformadores. *Manual Técnico Delta. Monterrey México. 92 páginas*.
- Gilberto Harper Enríquez. *El libro practico de los generadores, transformadores y motores eléctricos*. México DF. Editorial Limusa 2005. 252 páginas.
- Megger (2012) *Nuevas Tecnologías de Evaluación de la Condición de Transformadores de Potencia*. Buenos Aires, Argentina.
- Avelino Pérez Pedro. *Transformadores de Distribución, Teoría, Cálculo, Construcción y Pruebas*. 2da Edición. Editorial Reverte S.A. México D.F. 2001.
- M. E. El-Hawary. *Principles of Electric Machines with Power Electronic Applications*, Ed. Prentice-Hall, 1986.
- Gilberto Harper Enríquez. *Pruebas y mantenimiento a equipos eléctricos*. México DF. Editorial Limusa. 2005. 521 páginas.
- <http://www.weg.net/mx/Productos-y-Servicios/Generacion-Transmision-y-Distribucion-de-Energia/Transformadores>