



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO.**

FES - ARAGÓN.

“DETECCIÓN Y MEDICIÓN DE DESCARGAS
PARCIALES EN TRANSFORMADORES Y
REACTORES EN DERIVACIÓN DE POTENCIA”.

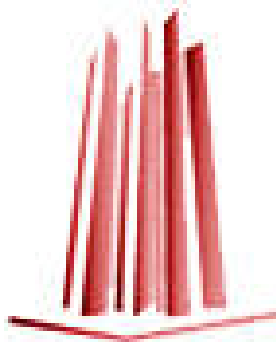
T E S I S P R O F E S I O N A L

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

P R E S E N T A:

DIONICIO URBINA DOMINGUEZ.



MÉXICO, D. F.

2006



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).

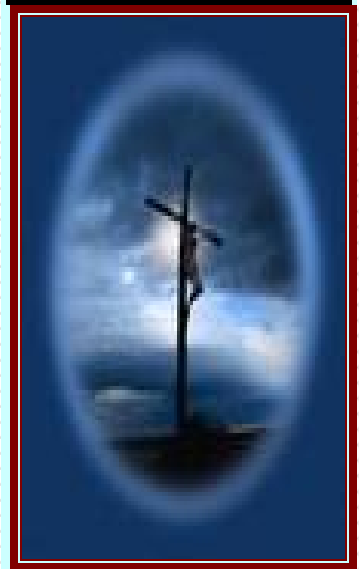
El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición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

AGRADECIMIENTOS.

Quando los sentimientos son de gran magnitud son difíciles de manifestar, porque ninguna palabra es suficiente para expresar todo lo que siento por ustedes, ya que representan lo mas hermoso que llena a mi vida; por lo cual, les dedico con mucho cariño, amor, admiración y respeto estas palabras.

Todo lo que diga resulta poco para describir lo fundamental e importante que eres en mi vida, ya que se has dado cosas maravillosas a mi existir, gracias por ser el alimento de mi alma, por permitirme vivir, porque tú representas mi guía, esperanza, fortaleza, bondad, humildad, perdón, paz, alegría, vida y amor. Hoy te agradezco por no apartarte nunca de mi vida, por estar ahí en los momentos más difíciles, por mostrarme la inmensidad de tu amor en cada paso que doy, porque cuando mi rumbo era incierto extendiste tu mano mostrándome el camino, por todas las bendiciones que se has regalado a mi existir, por permitirme alcanzar esta meta que representa la oportunidad de crecer como ser humano. Infinitamente gracias porque sé que a pesar de mis errores siempre estarás conmigo.

A DIOS



A MI FAMILIA

Con la mayor gratitud para mi familia, por los esfuerzos realizados a lo largo de mi vida para que lograra terminar mi carrera profesional, siendo para mí la mejor herencia.

Mis gracias por los consejos, palabras de aliento y confianza que me han dado, por los valores que me han heredado y por entregarme todo su cariño, amor y comprensión. A ustedes que durante todo este tiempo han estado conmigo en los momentos de alegría y de tristeza que han marcado mi vida, de tal forma que lo que he logrado hoy es parte de ustedes y que no es más que una forma de agradecerles todas sus enseñanzas, todos sus desvelos y preocupaciones; por lo cual viviré eternamente agradecido con Dios por haberme dado estos seres maravillosos que son ustedes mi familia.

GRACIAS: Por dejarme creer y poder descubrir las experiencias que la vida nos tiene preparadas con el paso del tiempo.

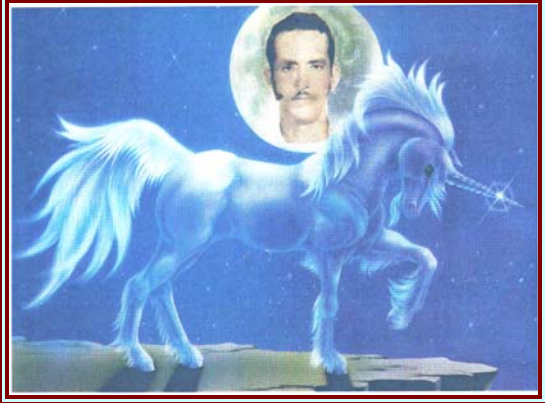
GRACIAS: Por todas y cada una de esas ocasiones que se preocuparon por mí, pensando en si sería feliz.

Papa, el tiempo que te disfruté no fue lo que hubiera deseado, pero si lo suficiente para saber cuanto nos amabas. Hoy quiero decirte que te extraño mucho y que me has hecho mucha falta. No te imaginas cuanto daría por tenerte conmigo y poder disfrutar juntos este momento. A pesar de que no puedes estar conmigo físicamente, lo estas espiritualmente y se lo orgulloso que debes de sentirte de verme concluir esta importante etapa de mi vida.

Quiero agradecerte las bases que dejaste en mí para poder ser día con día una mejor persona. En donde quiera que estés quiero decirte que:

"TE QUÉREO MUCHO".

EN MEMORIA A MI PADRE.



A MI MADRE.



Por ser la persona que me ha cuidado, enseñado, guiado y querido desde antes de nacer, con todo mi amor, admiración, respeto y cariño, te doy las gracias por escucharme, alentarme, comprenderme, por tu dedicación y preocupación, por todas las enseñanzas y consejos que me has dado.

Porque a pesar de las dificultades que pasamos juntos siempre nos protegiste.

Porque sin ti yo no estaría aquí y no sería lo que soy.

Porque eres un ejemplo de fortaleza.

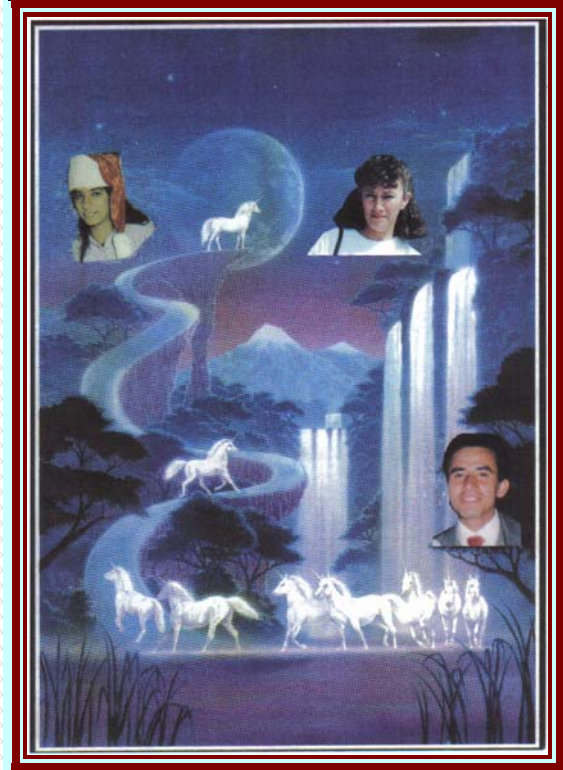
*Se que un gracias es muy poco para recompensarte todo lo que te sacrificaste por tu familia, por todo esto y más quiero decirte que:
TE AMO MUCHO MAMÁ,
que Dios te bendiga.*

A mis hermanos, que no les demuestro cuanto los amo y admiro, les agradezco el compartir conmigo todas las cosas maravillosas que pasamos juntos en cada una de las etapas de nuestras vidas.

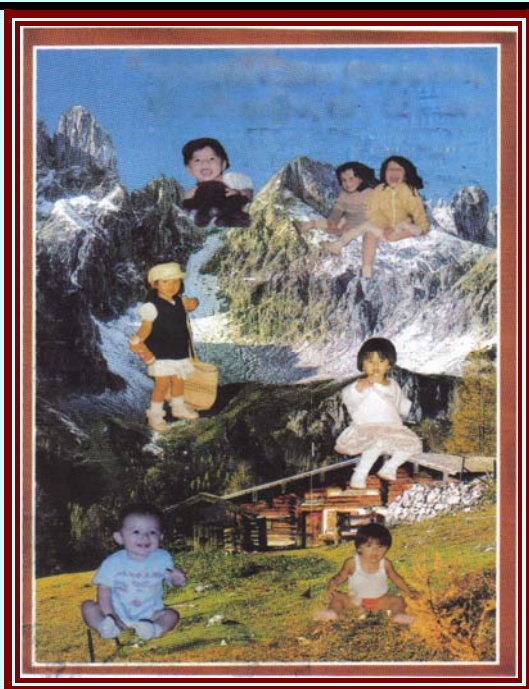
Les agradezco el apoyo incondicional que me han brindado a lo largo de estos años que he compartido con ustedes y que a pesar de las dificultades siempre hemos estado unidos. Solo quiero decirles que los quiero mucho y le pido a dios que los proteja, los bendiga, que les de mucha salud y que nos ayude a mantenernos siempre juntos.

*MIL GRACIAS POR SU
APOYO.*

A MIS HERMANOS.



A MIS SOBRINOS.



Gracias por los momentos de alegría, de felicidad y amor que hemos compartido juntos. Espero que este trabajo sea un ejemplo para ustedes y que a pesar de las dificultades que se les presenten en sus vidas, siempre luchen por alcanzar sus sueños y sus metas. Valoren todo lo que dios les da, valoren a sus padres, porque en ellos siempre encontraran a sus mejores amigos que los apoyaran con amor, ternura, comprensión y sin ningún interés más que el bienestar de ustedes.

Recuerden que siempre estaré ahí para apoyarlos y ayudarlos.

LOS AMO SOBRINOS.

A mi bebe que representa lo mas bello, tierno y hermoso que ha transformado mi vida. Por ser el angelito que se dio vida a este trabajo, porque el saber que pronto estarás conmigo, llenas a mi vida de color y de una inmensa felicidad. Quiero decirte que ya te extraño y que te espero con mucho amor.

*"TE QUIERO MUCHO
BEBE".*

A MI BEBE.



A ELIZABETH.

Quiero darte las gracias por ser paciente, por confiar en mí, por quererme tanto, por las palabras de aliento cuando más las necesitaba, por compartir conmigo los sueños que poco a poco se van realizando. Por la cantidad de veces que interrumpiste mi trabajo para compartir tu tiempo conmigo, por ser la madre de mi bebe.

*"TE QUIERO MUCHO
PÁNZA".*

A EDGAR GARDUÑO GAYTAN.

Mil gracias Gaytan por tu colaboración en este trabajo, por tu tiempo empleado en la elaboración de los dibujos y por tenerme paciencia, recuerda que las cosas buenas cuestan mucho trabajo.

A MI ASesor

M. en C. RODRIGO OCON VALDEZ.

Agradezco infinitamente tu apoyo incondicional y por cederme parte de tu tiempo en la realización de este trabajo. Por ilustrarme y adentrarme en este interesante tema de las Descargas Parciales.

Gracias por tus recomendaciones y tus valiosas sugerencias e información proporcionadas en la asesoría de este trabajo.

Gracias por ser mi amigo, eres un ejemplo de sencillez, profesionalismo y dedicación. Mil gracias por todo tu apoyo.
"QUE DIOS TE BENDIGA".

A MIS SIRODALES.

Gracias por dedicar su valioso tiempo en revisar, corregir y enriquecer con sus aportaciones este trabajo.

Porque sin mi dedicación, paciencia y decisión no habría nunca alcanzado esta meta, que representa el crecimiento personal y profesional. Además de reconocer que cada día tengo la oportunidad de aprender.

A MI MISMO.



ÍNDICE.

INTRODUCCIÓN.

i

Antecedentes	i
Descripción del Problema	ii
Objetivos	ii
Objetivo General	ii
Objetivos Particulares	ii
Justificación	ii
Alcances y Limitaciones	iii
Organización de la Tesis	iii
Capítulo Primero	iii
Capítulo Segundo	iv
Capítulo Tercero	iv
Capítulo Cuarto	iv
Capítulo Quinto	iv

CAPITULO I

CONCEPTOS BÁSICOS.

1

I.0 Generalidades	2
I.1 Principio de Funcionamiento del Transformador	2
I.1.1 Transformador Ideal en Vacío	3
I.1.2 Transformador Ideal con Carga	4
I.1.3 Transformador Real en Vacío	5
I.1.4 Transformador Real con Carga	7
I.1.5 Diagramas Vectoriales del Transformador Real	8
I.2 Determinación de las Constantes del Transformador	9
I.2.1 Ensayo en Vacío	9
I.2.2 Ensayo en Corto-Circuito	10

I.3	Circuito Equivalente	12
I.4	Caída de Tensión del Transformador	14
I.5	Potencia del Transformador	14
I.5.1	Potencia Suministrada	15
I.5.2	Pérdidas en el Hierro	15
I.5.3	Pérdidas en el Cobre	15
I.6	Rendimiento del Transformador	16
I.7	Transformadores Trifásicos	16
I.7.1	Normalización de Terminales	17
I.7.2	Conexión de Transformadores en Paralelo	17
I.7.3	Pruebas de polaridad, desplazamiento Angular y Secuencia de Fase.....	18
I.7.4	Conexión de Transformadores Trifásicos	21
I.7.5	Transformación Trifásica Mediante dos Transformadores Monofásico	25
1.8	Reactores	29
1.8.1	Aplicaciones de los Reactores	30
1.8.2	Reactores Limitadores de Corriente	31
1.8.3	Reactores en Derivación (Compensación Reactiva Fija).....	32

CAPÍTULO II	CONSTRUCCIÓN DE TRANSFORMADORES Y REACTORES.	35
--------------------	---	-----------

II.0	Generalidades	36
II.1	Construcción del Núcleo	36
II.2	Devanados de los Transformadores	37
II.2.1	Características de Diseño	38
II.2.2	Fuerzas que Actúan Sobre los Devanados	39
II.2.2.1	Devanado para Transformadores Tipo Columna	39
II.2.2.2	Devanado para Transformadores Tipo Acorazado	41
II.3	Transformador tipo Columna (Core)	42
II.3.1	Diseño por Computadora	46
II.3.2	Comportamiento Mecánico	46

II.3.3	Comportamiento Térmico	46
II.3.4	Comportamiento Químico	47
II.3.5	Comportamiento Dieléctrico	47
II.4	Transformador tipo Acorazado (Shell)	48
II.4.1	Características de Diseño	49
II.4.2	Comportamiento Mecánico	51
II.4.3	Comportamiento Térmico	52
II.4.4	Características Dieléctricas	54
II.5	Comparación Técnica entre un Transformador tipo Columna y otro tipo Acorazado	57
II.5.1	Capacidad para Resistir una Falla	57
II.6	Reactores en Derivación (Shunt Reactor)	58
II.6.1	Reactor en Derivación tipo Columna	58
II.6.1.1	Características	59
II.6.2	Reactores en Derivación tipo Acorazado	60
II.6.2.1	Ventajas de los Reactores en Derivación tipo Acorazado	62
CAPÍTULO III	DESCARGAS PARCIALES.	63
III.0	Generalidades	64
III.1	Naturaleza del Fenómeno	64
III.2	Clasificación de las Descargas Parciales	66
III.2.1	Descargas Parciales Internas	66
III.2.2	Descargas Parciales Superficiales	67
III.2.3	Descargas Corona	67
III.3	Modelación del Fenómeno	68
III.4	Magnitudes Eléctricas Relacionadas con las DPs	71
III.5	Análisis de la Forma de Onda de las DPs para la Evaluación de la Degradación	73
III.5.1	DPs. Asociadas a condiciones de Sobre-tensión	74
III.5.2	Descargas Parciales Asociadas a la Degradación	75
III.6	Nocividad de las Descargas Parciales	76
III.7	Perturbación Eléctrica Producida por las DPs	77

CAPÍTULO IV	DETECCIÓN Y MEDICIÓN DE DPS. EN TRANSFORMADORES Y REACTORES EN DERIVACIÓN DE POTENCIA.	78
IV.0	Generalidades	79
IV.1	Detección de Descargas Parciales en el Aislamiento de Transformadores y Reactores	80
IV.2	Método Químico (Análisis Cromatográfico)	80
IV.2.1	Fallas que Originan Gases Combustibles	80
IV.2.2	Concentraciones Límites Seguras, en PPM de Gases Disueltos en Aceite	85
IV.3	Detección Eléctrica de Descargas Parciales	85
IV.3.1	Principio de Medición de Descargas Parciales	85
IV.3.2	Medición de DP's en Transformadores y Reactores	88
IV.3.2.1	Normas IEC	89
IV.3.2.2	Normas IEEE	91
IV.3.3	Calibración del Circuito de Medición	92
IV.3.4	Sensibilidad de la Medición de DP's.	93
IV.3.5	Procedimiento de Medición de DP's	94
IV.4	Detección Acústica de Señales de DP's	98
IV.4.1	Procedimiento de Medición	100
IV.4.2	Sensibilidad de la Medición	103
IV.5	Procedimiento para Investigación de Fuentes de DP's	104
IV.5.1	Investigación de Fuentes Externas de DP's	104
IV.5.2	Investigación del tipo de Fuente de DP's	104
IV.6	Investigación Detallada de Fuentes de DP's	110
IV.6.1	Investigación De la Fuente de DP's	110
IV.6.2	Localización de la Fuente de DP's	111
IV.6.3	Análisis de los Impulsos de Corriente de DP's en el Dominio de la Frecuencia	111
IV.6.4	Análisis de los Impulsos de Corriente de DP's en el Dominio del Tiempo	113
IV.6.5	Análisis Final de los Resultados	114

CAPÍTULO V	EJEMPLO DE APLICACIÓN.	116
V.0	Procedimiento de Medición	117
V.1	Procedimiento para Localizar la Fuente de Descargas Parciales	118
V.2	Conclusiones	120
CONCLUSIONES		121
BIBLIOGRAFÍA.		122

INTRODUCCIÓN.

En este trabajo se presenta una introducción al problema que se abordará. Para ello se exponen: Antecedentes, descripción del problema, objetivos, justificación, alcances y limitaciones y finalmente un resumen del contenido de cada capítulo.

ANTECEDENTES.

Los transformadores son los elementos principales que se encuentran invariablemente en un sistema eléctrico, estos equipos han contribuido de manera muy importante al desarrollo de la industria eléctrica. Debido a que es posible la transformación de los parámetros tensión y corriente, se tiene la posibilidad de transmitir a grandes distancias, grandes volúmenes de energía eléctrica.

El mayor problema de los transformadores de potencia es la degradación de su aislamiento dieléctrico. Este aislamiento, en equipos de mediana y alta potencia, tiene un tiempo de vida para su funcionamiento aceptable y su degradación durante su periodo de servicio se debe a la acumulación de efectos mecánicos, térmicos y eléctricos.

Las descargas parciales son el fenómeno eléctrico causante de una gran parte de las fallas en el aislamiento. Producen transferencias rápidas de cargas en áreas localizadas y por consiguiente, crean una distorsión eléctrica de alta frecuencia que se propaga a través del circuito eléctrico.

Aunque hace medio siglo que se conocen a las descargas parciales (DPs) como causa de deterioro de los materiales aislantes, este fenómeno había recibido poca atención porque el deterioro era muy lento, debido a que los materiales aislantes trabajaban con esfuerzos dieléctricos bajos y el diseño y la concepción de los aparatos eran tales que, muy raramente, había posibilidad de encontrar estas descargas en algún lugar realmente de peligro. Además, en el caso de que las descargas fueran peligrosas, éstas aparecían con una magnitud tan fuerte que se podían detectar con facilidad por los medios clásicos (por el oído o bien por medición de las pérdidas).

La aparición de los aislantes con materias coladas ó extruídas, creó problemas de homogeneidad, tales como la posible existencia de pequeñas cavidades en el aislamiento. Estas cavidades no dan lugar a pérdidas fácilmente apreciables y medibles, por lo contrario, son una causa de grave debilitamiento del aislamiento y solo un método de medición que esté bien adaptado permite la detección de estas pequeñas cavidades.

Estos métodos de medición perfeccionados, permiten el control del tratamiento a que son sometidos los aislamientos tradicionales y que se utilizan en la actualidad para poder emplear al máximo las características dieléctricas del material, es decir, aumentar la calidad del conjunto y contribuir al incremento de potencia útil por unidad de volumen en todo el equipo eléctrico de alta tensión, como son: los transformadores, reactores, cables, etc.

DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.

Uno de los principales problemas de cualquier equipo eléctrico es la degradación del sistema aislante. Una de las causas que aceleran la degradación, son las descargas parciales; por lo cual es importante medirlas y localizarlas lo más pronto posible.

OBJETIVOS.

OBJETIVO GENERAL.

Realizar un estudio sobre la detección, medición y localización de las fuentes de descargas parciales en transformadores de potencia y reactores en derivación.

OBJETIVOS PARTICULARES.

- Proporcionar los elementos teórico-prácticos que permitan conocer el fenómeno de DP's y sus efectos sobre el sistema aislante.
- Realizar una comparación entre las diferentes técnicas de detección, medición y localización de las descargas parciales.
- Presentar un ejemplo de la prueba de medición de descargas parciales de un transformador, mostrando la metodología utilizada para la localización de las descargas por el método acústico.

JUSTIFICACIÓN.

En los sistemas eléctricos, los transformadores de potencia y los reactores en derivación son componentes costosos y vitales. Su comportamiento duradero y confiable es la clave para una generación y transmisión de energía rentables, por lo que cualquier falla inesperada afecta el suministro de energía eléctrica con fuertes repercusiones económicas.

La necesidad permanente de mejorar la calidad y continuidad del servicio en los sistemas eléctricos han propiciado el desarrollo de metodologías que permitan detectar oportunamente la posible existencia de fallas incipientes en los elementos que integran los equipos eléctricos con el fin de reducir los riesgos de fallas.

El desarrollo y la aplicación de técnicas para el diagnóstico de la condición del sistema aislante del equipo de potencia, permite detectar y localizar áreas dentro del transformador y reactor que estén expuestas a esfuerzos elevados, los cuales pueden ser perjudiciales para la operación segura del equipo.

Con el apoyo de las técnicas de medición de DP, podemos detectar las fallas y su evolución para disminuir sustancialmente el riesgo de fallas catastróficas y salidas de operación no planeadas debido a la presencia de DP en el interior del equipo. Lo cual, nos permite tomar la decisión de sacar de operación un transformador para su inspección visual y posterior reparación con un alto grado de confianza en la predicción de la falla, al confinar a una zona muy definida el trabajo, logrando con esto disminuir los costos de reparación o mantenimiento e incrementando la confiabilidad del sistema.

ALCANCES Y LIMITACIONES.

En este trabajo se presentan las bases teórico-prácticas de las diferentes técnicas para determinar y localizar lo más pronto posible las fuentes de descargas parciales en los transformadores y reactores. Además se presentan los valores límites de carga aparente según la norma IEC, los cuales sirven como referencia para los casos prácticos.

A pesar de que el trabajo muestra los aspectos fundamentales de los métodos de detección, medición y localización de las fuentes de descargas parciales, no es posible determinar fielmente la ubicación de la fuente de DP. Solamente nos permite obtener una aproximación de la posible localización; por lo cual, se requiere que la persona encargada de la investigación tenga una amplia experiencia en este tipo de fallas y conocimiento de la construcción del transformador, para así poder localizar la causa verdadera de la fuente de DP y tomar las acciones correspondientes, en caso de ser requeridas.

ORGANIZACIÓN DE LA TESIS.

El presente trabajo se encuentra estructurado en forma de capítulos secuenciales, los cuales integran el cuerpo formal de la investigación.

CAPÍTULO PRIMERO. Conceptos Básicos.

Se presentan los principios de funcionamiento del transformador tanto en vacío como con carga y sus respectivos diagramas vectoriales, la determinación de las constantes del ensayo en vacío y en corto-circuito, se presenta la corriente de corto circuito accidental y la caída de tensión, se analiza la potencia del transformador, las pérdidas en el hierro y en el cobre y su rendimiento. Posteriormente, se mencionan los transformadores trifásicos, su conexión en paralelo, su normalización de terminales, las pruebas de polaridad, su desplazamiento angular y secuencia de fases. Además, se presentan los tipos de conexiones de transformadores trifásicos y la transformación trifásica a través de dos transformadores monofásicos. Finalmente se da un panorama general de los reactores, como son: su aplicación, los reactores limitadores de corriente y de los reactores en derivación.

CAPÍTULO SEGUNDO. Construcción de Transformadores y Reactores.

En este capítulo se estudia los componentes principales del transformador como son el núcleo y los devanados. Además, se analizan las características tanto del núcleo tipo columnas como las del tipo acorazado, en lo que se refiere a: resistencia mecánica, capacidad térmica y dieléctrica. Posteriormente se realiza una comparación técnica entre los dos tipos de transformadores. Finalmente, se da un panorama de la construcción de los reactores en derivación tipo columna y tipo acorazado, analizando sus características y ventajas.

CAPÍTULO TERCERO. Descargas Parciales.

Se presenta una descripción de la naturaleza del fenómeno de descargas parciales, se realiza una clasificación de las mismas y se genera un circuito equivalente que modele las características del fenómeno. Después se determinan las magnitudes eléctricas relacionadas con dichas descargas. Posteriormente se analiza la forma de onda de la DP para la evaluación de la degradación, se analizan las descargas parciales asociadas a condiciones de sobre-tensión y finalmente se estudia la perturbación eléctrica de las DPs y su nocividad.

CAPÍTULO CUARTO. Métodos de detección y Medición de DPs. en Transformadores y Reactores en Derivación de Potencia.

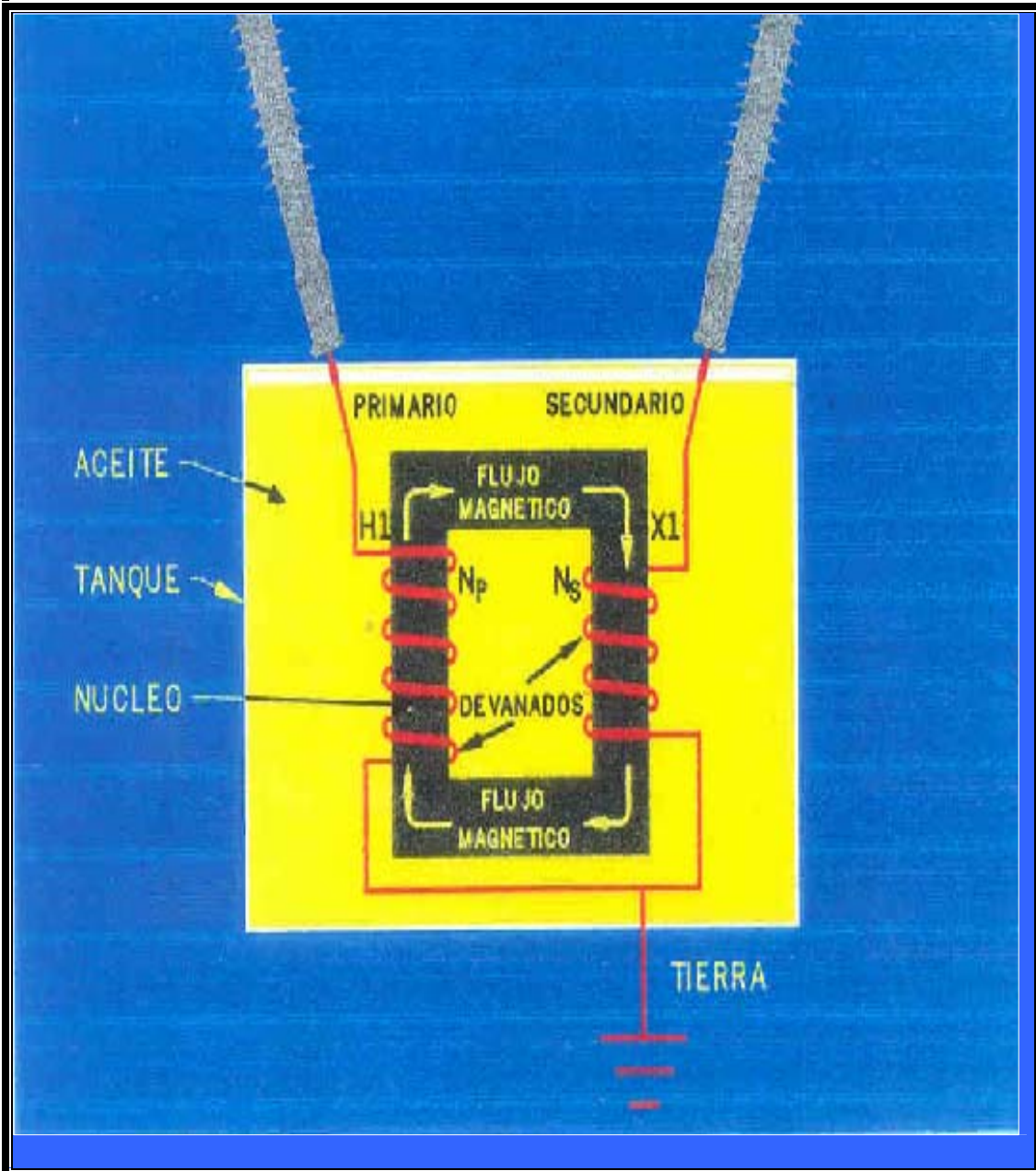
La localización de las Dps en el aislamiento de transformadores y reactores se realiza a través del estudio de los diferentes métodos de medición: En el método químico, se revisan las concentraciones límites en PPM de gases disueltos en el aceite, en el método eléctrico se analiza: el principio de medición, la medición, se revisan las normas IEC e IEEE, la calibración del circuito de medición, la sensibilidad de la medición, el procedimiento de medición, se analiza el procedimiento de investigación de la fuente de DPs, se determina como eliminar fuentes externas y la investigación del tipo de fuente. Se localiza la fuente haciendo uso del método acústico, el cual incluye; procedimiento de medición, sensibilidad de la medición y Finalmente se presenta una investigación detallada de la fuente de Dps, su localización en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia y un análisis final de los resultados.

CAPÍTULO QUINTO. Ejemplo de Aplicación.

En este capítulo se proporciona un ejemplo de un transformador de potencia de 860 MVA, en donde se detectó la existencia de Descargas Parciales. En este ejemplo, se muestra la secuencia de cómo se realiza la localización de la falla y las medidas correctivas para resolver dicho problema.

CAPITULO PRIMERO.

CONCEPTOS BÁSICOS.



CAPITULO PRIMERO.

CONCEPTOS BÁSICOS.

1.0 GENERALIDADES.

Los transformadores son los equipos eléctricos más eficientes, ya que al no tener partes en movimiento, no existen pérdidas por fricción o rozamiento, es capaz de cambiar los valores de tensión y corriente sin alterar la frecuencia ni la potencia de una forma significativa.

Una de las principales razones por las que se emplea la corriente alterna y no la corriente continua en la producción, transporte, distribución y consumo de la electricidad es que este tipo de corriente es muy fácil de elevar y reducir su tensión mediante el transformador. Gracias a los transformadores se puede aumentar la tensión antes de transportar la energía a grandes distancias por las líneas de alta tensión, con el fin de reducir la intensidad y con ella las pérdidas que se dan en los conductores por efecto Joule. Con ellos también se puede reducir la tensión, con el fin de poder distribuirla y consumirla en las industrias y viviendas.

Aparte de estas aplicaciones, los transformadores también se utilizan para separar eléctricamente dos circuitos, alimentar con pequeñas tensiones circuitos de mando de sistemas neumáticos, alimentar todo tipo de aparatos electrónicos, adaptar aparatos eléctricos a la tensión de red cuando ésta es superior o inferior a la nominal de los mismos, acondicionar grandes tensiones y corrientes para poder ser medidas sin dificultad.

1.1 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DEL TRANSFORMADOR.

Un transformador esta constituido por un núcleo de material magnético, el cual forma un circuito magnético cerrado y sobre cuyas columnas o piernas se localizan dos devanados, uno denominado primario, que toma la energía eléctrica de la alimentación de la corriente alterna y el otro devanado secundario, que recibe la energía por inducción electromagnética, el cual alimenta a la carga.

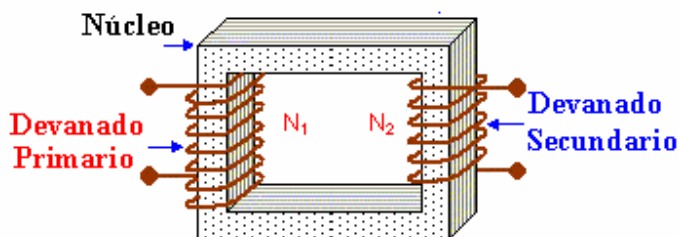


Figura 1.1: Transformador monofásico.

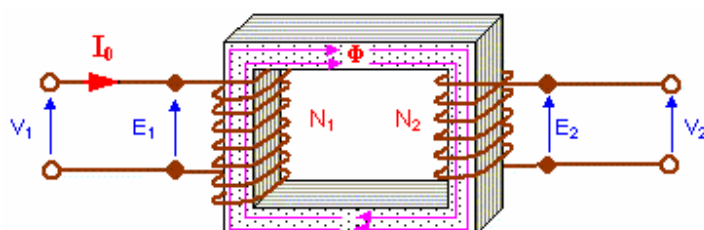
Al conectar el bobinado primario de N_1 espiras, a una tensión alterna senoidal V_1 , aparece una pequeña corriente por dicho bobinado que produce en el núcleo magnético un flujo variable (Φ) también de carácter senoidal. Este flujo variable se cierra por todo el núcleo magnético y corta los conductores del bobinado secundario, por lo que se induce una fuerza electromotriz en el secundario que dependerá del número de espiras del mismo.

De esta forma, la transferencia de energía eléctrica se hace a través del campo magnético variable que aparece en el núcleo del transformador, no siendo necesario la conexión eléctrica entre ambos bobinados, por lo que se puede decir que un transformador aísla eléctricamente el circuito primario del secundario (la bobina del primario convierte la energía eléctrica en energía en forma de campo magnético variable; la bobina del secundario se comporta como un generador y transforma dicho campo variable otra vez en energía eléctrica gracias a la inducción electromagnética).

1.1.1 TRANSFORMADOR IDEAL EN VACÍO.

Con el secundario abierto, al aplicar tensión al primario aparece una corriente de vacío I_0 , de carácter senoidal, que al recorrer los conductores de la bobina produce, a su vez, un flujo alterno senoidal común a ambos bobinados. Al cortar este flujo a la bobina primaria, se induce una fuerza electromotriz en el primario E_1 , cuyo valor instantáneo dependerá del número de espiras del primario y de lo rápido que varíe el flujo, es decir:

$$e_1 = N_1 \frac{d\phi}{dt} \quad (1.1)$$



IDEAL: Los arrollamientos no tienen resistencia y no hay flujo de dispersión.

EN VACÍO: El circuito del secundario está abierto, es decir, sin carga.

Figura 1.1.1: Transformador ideal en vacío.

De acuerdo a la ley de Lenz, esta f.e.m. se opone en todo momento a la causa que la produce, es decir, a la tensión V_1 aplicada al primario. Como no hay ningún tipo de pérdidas, los valores instantáneos de V_1 y E_1 son iguales y de signos opuestos.

Partiendo de la expresión general de inducción electromagnética (ley de Faraday), para una corriente alterna senoidal y tomando en cuenta que el mismo flujo atraviesa tanto al devanado primario como al secundario, la fuerza electromotriz inducida por espira es la misma en ambos:

$$E_1 = 4.44fN_1 \Phi_{\max} \quad (1.2)$$

$$E_2 = 4.44fN_2 \Phi_{\max} \quad (1.2a)$$

Donde:

E_1, E_2 = f.e.m. eficaz inducida en el primario y en el secundario (Volts).

N_1, N_2 = Número de espiras del primario y secundario del transformador.

f = Frecuencia (Hz).

$\Phi_{\max}$ = Flujo máximo (Wb).

Como la frecuencia y el flujo son comunes, dividiendo las expresiones de las fuerzas electromotrices obtendremos:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (1.3)$$

Como no existe resistencias en el circuito, la tensión $V_1 = E_1$ y $V_2 = E_2$. Por lo tanto:

$$m = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{V_1}{V_2} \quad (1.3a)$$

Donde: m = Relación de transformación.

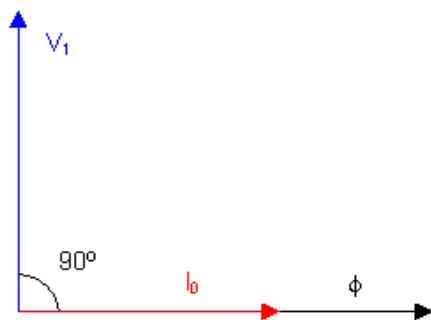


Figura 1.1.1a: Diagrama vectorial del transformador en vacío.

El arrollamiento primario se comportará como una autoinducción. La corriente en el primario que es pequeña, está retrasada 90° respecto a la tensión del primario.

Se denomina corriente de vacío y crea el flujo en el núcleo por lo que también se denomina magnetizante.

El flujo del núcleo está en fase con la corriente del primario.

1.1.2 TRANSFORMADOR IDEAL CON CARGA.

Al conectar el secundario del transformador a una carga, se produce en el mismo una corriente I_2 como consecuencia de la fem. Según la ley de Lenz, la corriente I_2 tiende a debilitar el flujo que circula por el núcleo, disminuyendo la fem E_1 y aumentando I_1 hasta que se restablezca el flujo total que circula por el núcleo a su valor inicial, el flujo resultante en el núcleo continua siendo el mismo que con el transformador en vacío y depende exclusivamente de la tensión V_1 aplicada al primario (ver figura 1.1.2).

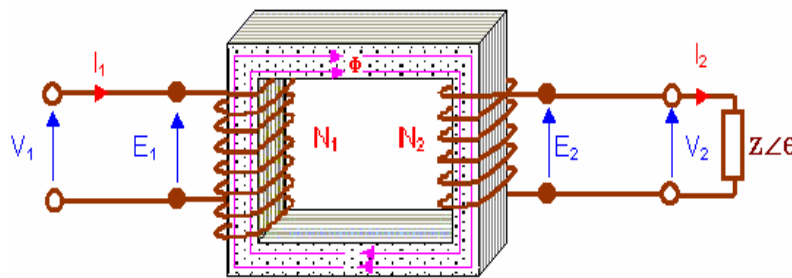


Figura 1.1.2: Transformador ideal con carga.

IDEAL: Los arrollamientos no tienen resistencia y no hay flujo de dispersión.

EN CARGA: El circuito del secundario tiene conectada una impedancia.

Como el transformador es ideal y no tiene pérdidas, la potencia en el primario y en el secundario serán iguales. Por lo tanto; las potencias activas, reactivas y aparentes absorbidas por el primario son iguales que las suministradas por el secundario. Para una determinada potencia aparente, si crece la tensión disminuye la intensidad y viceversa.

$$V_1 I_1 \cos \theta_1 = V_2 I_2 \cos \theta_2$$

$$V_1 I_1 \sin \theta_1 = V_2 I_2 \sin \theta_2$$

$$V_1 I_1 = V_2 I_2$$

$$m = \frac{V_1}{V_2} = \frac{I_2}{I_1} \quad (1.3b)$$

1.1.3 TRANSFORMADOR REAL EN VACÍO.

A diferencia del transformador ideal, el transformador real presenta una serie de pérdidas que podemos resumir en:

- Dispersión del flujo en los devanados primario y secundario: Estas pérdidas tienen un valor equivalente a las provocadas por dos reactancias inductivas X_{d1} y X_{d2} en serie con los devanados.
- Resistencia de los devanados: Provocan pérdidas por efecto Joule y caídas de tensión. Equivalen a dos resistencias en serie con el circuito.
- Pérdidas en el hierro: Son debidas a pérdidas por histéresis y por corrientes parásitas o de Foucault. Provocan pérdidas de potencia que se suman a las de Joule.

En el transformador real el flujo circula no solo por el núcleo ferromagnético; hay una parte que se dispersa en el aire atravesando solo a la bobina que lo produce y que provoca una fcm en la misma. El resultado de esta dispersión de flujo se puede representar mediante las reactancias X_{d1} y X_{d2} .

Debido a que no circula corriente por el devanado secundario, el primario se puede considerar como una bobina con una reactancia de valor elevado debido al núcleo de hierro. Por lo cual, la corriente de vacío se atrasa casi 90° con respecto al voltaje V_1 .

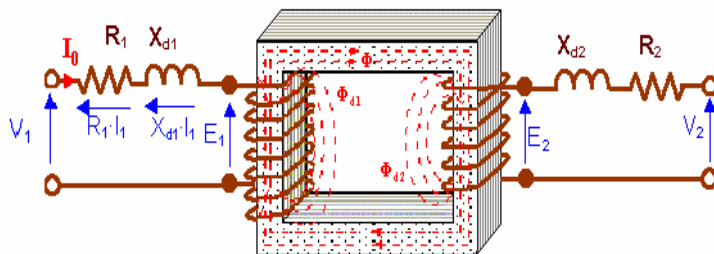


Figura 1.1.3: Diagrama esquemático del transformador real en vacío.

El hecho de que el desplazamiento no sea de 90° , se debe a la corriente I_{h+e} , la cual origina las pérdidas en el núcleo.

Debido a la resistencia del cobre del devanado, se tiene una caída de voltaje $I_0 R_1$, la cual se encuentra en fase con I_0 y a 90° delante de $I_0 X_{d1}$, misma que es originada por el flujo Φ_{d1} , que solo afecta a este devanado.

Al conectar el primario a una tensión de red V_1 aparece una corriente de vacío I_0 , que es la encargada de producir el flujo magnético común del transformador. Esta corriente de vacío está formada por dos componentes:

- La componente magnetizante (**I_m**): Que es la parte de la corriente de vacío que genera el flujo.
- La componente de pérdidas (**I_{h+e}**): Toma en consideración las pérdidas por histéresis y corrientes de foucault (corrientes parásitas) en el núcleo. Esta corriente multiplicada por V_1 da la potencia de pérdidas en el hierro.

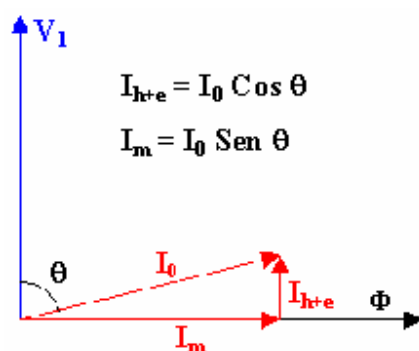


Figura 1.1.3a: Diagrama vectorial del transformador real sin carga.

Donde:

V_1 = Voltaje aplicado al devanado primario.

I_0 = Corriente de vacío.

I_{h+e} = Corriente de Pérdidas.

I_m = Corriente de magnetización.

Φ = Flujo mutuo.

θ = Factor de potencia de vacío.

1.1.4 TRANSFORMADOR REAL CON CARGA.

Cuando se energiza el primario del transformador y el secundario se encuentra en vacío, aparece una fem E_2 en las terminales del secundario; en el momento que se aplica una carga al secundario, el voltaje en las terminales del secundario ira variando de acuerdo con las características de la carga y la impedancia propia del transformador.

En un transformador real, la tensión producida en el secundario disminuye al aumentar la carga; es decir, la intensidad que entrega (si aumenta la intensidad de carga es porque ha disminuido la impedancia de la carga).

Al aumentar I_2 con la carga, la corriente del primario I_1 también aumenta y con ellas las caídas de tensión en las resistencias (R) e inductancias (X_d) del primario y secundario.

En el transformador real el flujo circula no solo por el núcleo ferromagnético; hay una parte que se dispersa en el aire atravesando solo a la bobina que lo produce y que provoca una fem en la misma. El resultado de esta dispersión de flujo se puede representar en el esquema equivalente mediante las reactancias X_{d1} y X_{d2} .

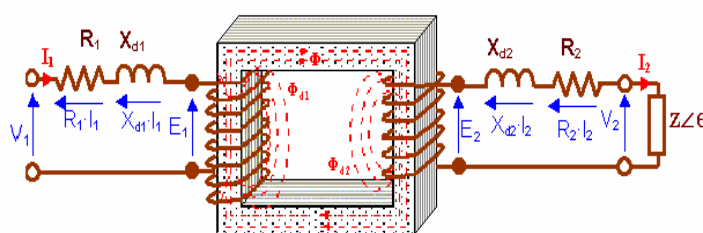


Figura 1.1.4: Circuito equivalente del transformador real con carga.

Del circuito anterior, por aplicación de las leyes de Kirchoff al primario y al secundario, se deducen las siguientes ecuaciones vectoriales de tensiones:

$$\vec{V}_1 = \vec{R}_1 I_1 + \vec{X}_{d1} I_1 + \vec{E}_1$$

$$\vec{E}_2 = \vec{R}_2 I_2 + \vec{X}_{d2} I_2 + \vec{V}_2$$

Al conectar la carga en el secundario, aparece una fem $N_2 I_2$ que cambia el valor del flujo común (aumenta o disminuye según el sentido de I_2), esa variación del flujo hace que la fem e_1 varíe también:

$$e_1 = N_1 \frac{d\phi}{dt}$$

Como en el primario V_1 es constante, al variar e_1 , aparece una corriente I_1 que provoca otra fuerza contraelectromotriz que compensa a la del secundario:

$$N_1 I_0 = N_1 I_1 + N_2 I_2.$$

A plena carga I_0 es despreciable comparada con I_1 e I_2 , por lo que podemos considerar que: $N_1 I_1 = N_2 I_2$, por lo tanto:

$$m = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1} \quad (1.3c)$$

1.1.5 DIAGRAMAS VECTORIALES DEL TRANSFORMADOR REAL.

Conocidos o medidos los valores de tensión, corriente de la carga, su desfase su relación de transformación, sus resistencias y sus reactancias (V_2 , I_2 , θ_2 , R_1 , X_{d1} , R_2 , X_{d2} , m), podemos construir los diagramas vectoriales a partir de las ecuaciones vectoriales. Tomamos como referencia las intensidades, teniendo en cuenta que las caídas de tensión en las resistencias están en fase con ellas y las caídas en las reactancias a 90° en adelante.

Diagrama vectorial del secundario:

$$\vec{E}_2 = \vec{R}_2 I_2 + \vec{X}_{d2} I_2 + \vec{V}_2$$

Se construye a partir de los datos de la carga en módulo y ángulo, sumando vectorialmente las caídas de tensión en la resistencia y la reactancia del secundario, a 0° y a 90° de la intensidad respectivamente, para calcular el módulo y ángulo de la f.e.m. del secundario.

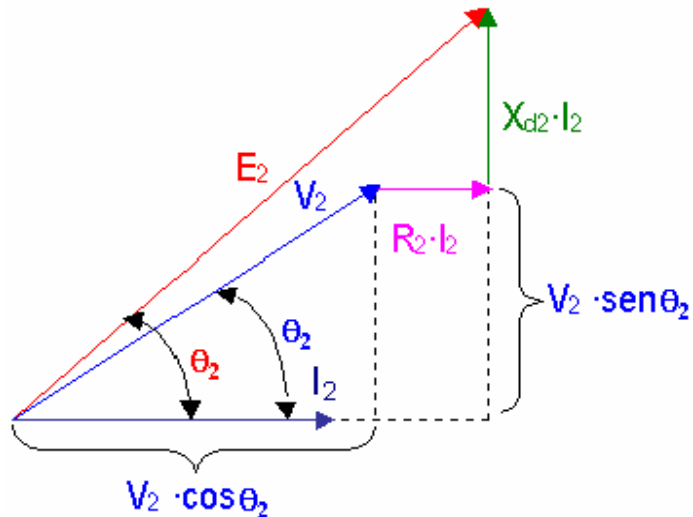
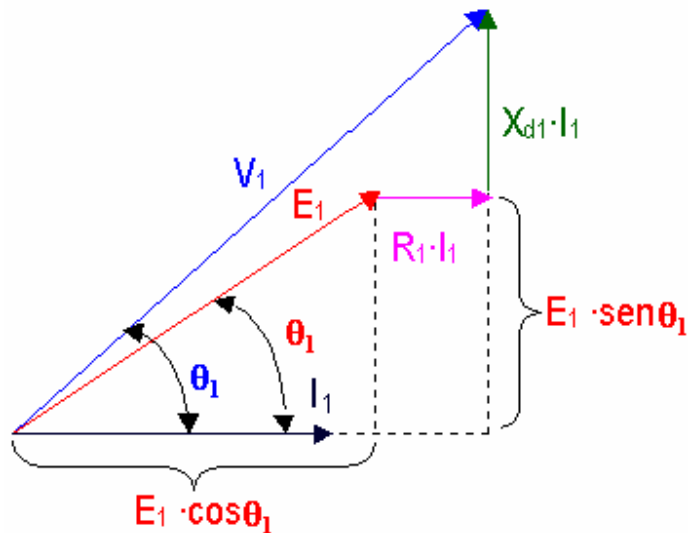


Diagrama vectorial del primario:

$$\vec{V}_1 = \vec{R}_1 I_1 + \vec{X}_{d1} I_1 + \vec{E}_1$$

Se construye a partir de la f.e.m. y de la intensidad del primario con su desfase, sumando vectorialmente las caídas de tensión en la resistencia y en la reactancia del primario, a 0° y a 90° de la intensidad respectivamente, para calcular la tensión del primario en módulo y ángulo.



Paso del diagrama vectorial del secundario al primario:

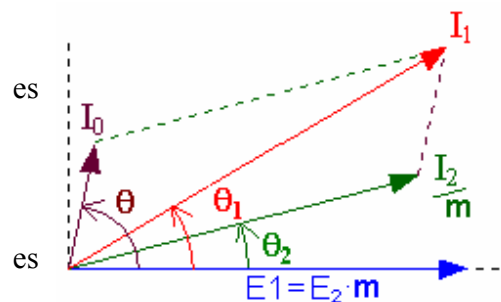
Suelen ser conocidos los datos de la carga, así como las resistencias y reactivancias del transformador, con lo que es posible construir el diagrama vectorial del primario, necesitamos conocer E_1 , I_1 y el ángulo que forman θ_1 .

Si I_0 es despreciable:

$$I_0 < 5 I_2 / m$$

Si I_0 no es despreciable:

$$I_1 = \frac{I_2}{m} + I_0$$



1.2 DETERMINACIÓN DE LAS CONSTANTES DEL TRANSFORMADOR.

Las magnitudes de las resistencias y reactivancias de los devanados de un transformador pueden determinarse experimentalmente. Una buena aproximación de dichas magnitudes se logra con solo dos pruebas: El ensayo en circuito abierto y el ensayo en corto circuito.

1.2.1 ENSAYO EN VACÍO.

Esta prueba tiene como objetivo determinar las pérdidas magnéticas. En esta prueba se deja el arrollamiento secundario del transformador en circuito abierto, mientras se le aplica al primario el voltaje nominal.

Para llevar a cabo esta prueba, se conecta un voltmetro V_1 , el cual mide la tensión aplicada al primario; El voltmetro V_2 , mide la fem E_2 inducida en el secundario; el amperímetro, indica la corriente de vacío I_0 y un wátmetro, que mide la potencia de vacío.

Mediante este ensayo se puede determinar:

- La relación de transformación (m).
- La corriente de vacío (I_0).
- Las pérdidas en el hierro (P_0).

Observando la figura 1.2.1b; puede verse que, toda la corriente que se consume debe circular por la rama de magnetización del transformador. Los elementos R_l y X_{dl} son tan pequeños comparados con R_0 y X_0 que producen caídas de voltajes despreciables, así que prácticamente todo el voltaje de alimentación queda aplicado sobre la rama de magnetización.

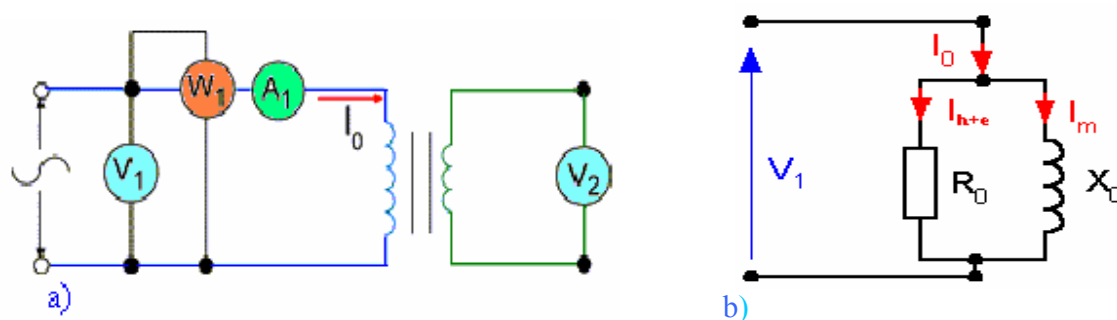


Figura 1.2.1: Ensayo en vacío del transformador monofásico; a) Diagrama de conexiones, b) circuito equivalente.

MEDIDAS DIRECTAS	FORMULA	MEDIDAS INDIRECTAS	FORMULA
Tensión Nominal del Primario	$V_{1N} = V_1$	Relación de Transformación	$m = \frac{V_{1N}}{V_{2N}}$
Tensión Nominal del Secundario	$V_{2N} = V_2$	Pérdidas en el Hierro	$P_{Fe} = P_0$
Corriente de Vacío	$I_0 = A$	Factor de Potencia en Vacío	$\cos \theta_0 = \frac{P_0}{V_{1N} I_0}$
Potencia de Vacío	$P_0 = W$	Componente Activa o de Pérdidas	$I_{h+e} = I_0 \cos \theta_0$
		Componente Reactiva o Magnetizante	$I_m = I_0 \sin \theta_0$
		Impedancia de Vacío	$Z_0 = \frac{V_{1N}}{I_0}$
		Resistencia de Vacío	$R_0 = \frac{V_{1N}}{I_0}$
		Reactancia de Vacío	$X_0 = \frac{V_{1N}}{I_m}$

1.2.2 ENSAYO EN CORTO-CIRCUITO.

Mediante este ensayo es posible determinar las componentes de corto-circuito:

- Los parámetros R_{cc} , X_{cc} y Z_{cc} .
- La tensión de corto-circuito porcentual (U_{cu}).
- Las pérdidas en el cobre (P_{cu}).

Para llevar a cabo este ensayo se cortocircuita el secundario y se realiza el siguiente montaje:

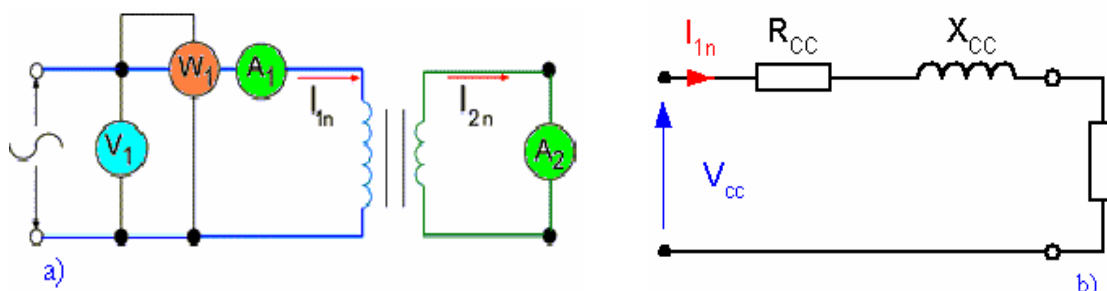


Figura 1.2.2: Ensayo de corto circuito del transformador; a) Diagrama de conexiones, b) Circuito equivalente.

Una vez montados todos los elementos, se comienza el ensayo aplicando cero volts en el primario, se va subiendo gradualmente la tensión hasta conseguir que el amperímetro A_1 indique un valor de corriente igual a la intensidad nominal primaria correspondiente al transformador a ensayar. Cuando el amperímetro A_1 indique la intensidad nominal primaria I_{N1} , el amperímetro A_2 indicará la intensidad nominal secundaria I_{N2} .

Al circular corriente por el primario y por el secundario, se producirán pérdidas de potencia en la resistencia del primario y del secundario, que se transforman en calor, y que para la intensidad nominal serán:

$$P_{cu} = R_1 I_{21N} + R_2 I_{22N} \quad (1.4)$$

Las pérdidas en el hierro se pueden considerar despreciables, ya que al someter el transformador a una tensión muy baja (la tensión de cortocircuito aplicada es del orden del 5% de la nominal primaria), el flujo con que trabaja el transformador es también muy reducido, por lo que dichas pérdidas son insignificantes con respecto a las del cobre.

MEDIDAS DIRECTAS	FORMULA	MEDIDAS INDIRECTAS	FORMULA
Tensión de Cortocircuito	$V_{cc} = V$	Relación de Transformación	$m = \frac{I_{2N}}{I_{1N}}$
Intensidad Nominal del Primario	$I_{1N} = A_1$	Tensión de Cortocircuito en %	$U_{cc} = \frac{V_{cc}}{V_{1N}} 100$
Intensidad Nominal del Secundario	$I_{2N} = A_2$	Factor de Potencia en Cortocircuito	$\cos \theta_{cc} = \frac{P_{cc}}{V_{cc} I_{1N}}$
Potencia en Cortocircuito	$P_{cc} = W$	Impedancia de Cortocircuito	$Z_{cc} = \frac{V_{cc}}{I_{1N}}$
Caída de Tensión de Cortocircuito en %	$R_{cc} = \frac{V_{cc} I_1}{V_1} 100$	Resistencia de Cortocircuito	$R_{cc} = Z_{cc} \cos \theta_{cc}$
Caída de Tensión de Cortocircuito en %	$R_{cc} = \frac{X_{cc} I_{1N}}{V_1} 100$	Reactancia de Cortocircuito	$X_{cc} = Z_{cc} \sin \theta_{cc}$

1.3 CIRCUITO EQUIVALENTE.

Las pérdidas que se presentan en el transformador real deben ser consideradas en cualquier modelo que represente exactamente su comportamiento. Los aspectos mas importantes que deben considerarse en la construcción del modelo son:

- Pérdidas en el cobre (I^2R): Son pérdidas por calentamiento de tipo resistivo en los arrollamientos primario y secundario del transformador, varían proporcionalmente con el cuadrado de la corriente en los devanados. Estas pérdidas en el cobre, se representan colocando una resistencia R_p en el primario y otra resistencia R_s en el circuito secundario del transformador.
- Pérdidas por corrientes en el núcleo (I_h+e): Son pérdidas por calentamiento de tipo resistivo en el Núcleo del transformador. Se representan mediante una resistencia R_0 conectada entre los terminales de la fuente primaria.
- Pérdidas por histéresis: Esta corriente de magnetización esta asociada con el reagrupamiento de los dominios magnéticos del núcleo durante cada semiciclo. Están consideradas en la resistencia R_0 .
- Pérdidas por flujo de dispersión: Los flujos de dispersión Φ_p y Φ_s que abandonan el núcleo y ligan solo a uno de los devanados del transformador son flujos dispersos. Estos originan autoinductancias en los devanados primario y secundario. El flujo disperso se representa mediante reactancias en el primario X_p y el secundario X_s .

En la figura siguiente, se muestra el circuito equivalente del transformador. Los elementos que conforman la rama de magnetización aparecen ubicadas más interiormente que la resistencia R_p y la reactancia X_p del primario. Lo anterior se debe a que el voltaje que realmente se aplica al núcleo es igual al aplicado al primario menos las caídas internas en el mismo arrollamiento.

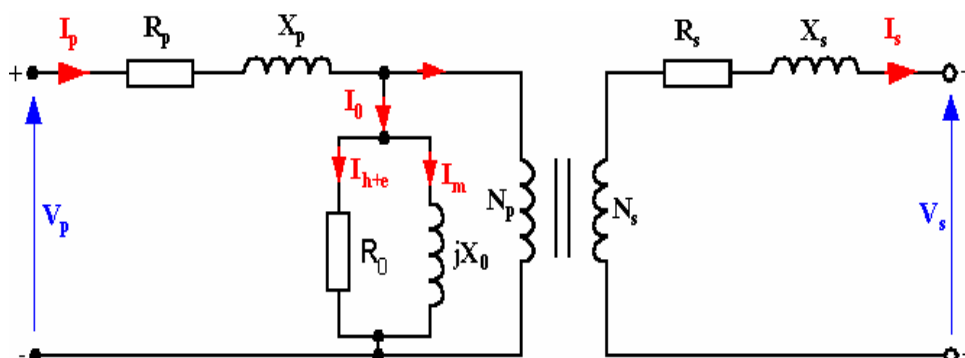


Figura 1.3: Circuito equivalente del transformador real.

A pesar de que la figura 1.3, representa un modelo preciso del transformador, no es muy útil. Normalmente es conveniente convertir este modelo en un circuito equivalente a un único nivel de tensión. Por lo tanto, en la resolución de problemas es necesario referir el circuito al primario o al secundario del transformador, como se muestra en la figura siguiente:

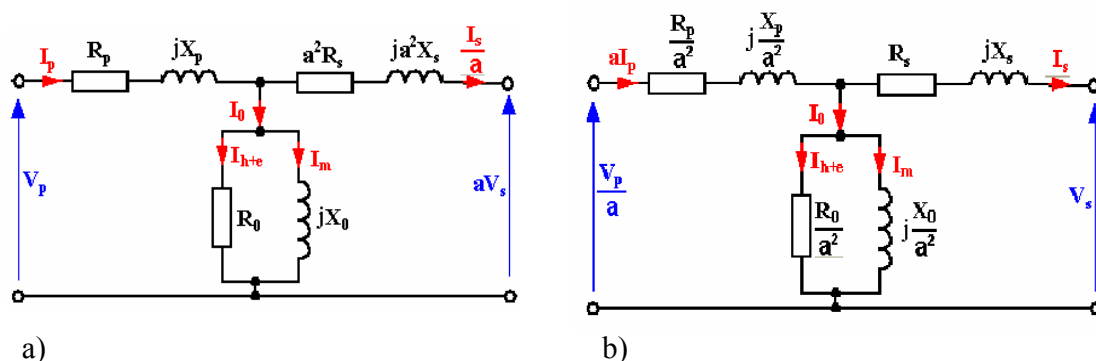


Figura 1.3.1: a) Circuito equivalente del transformador referido al primario, b) Circuito equivalente referido al secundario.

Debido a que la corriente de vacío en un transformador es pequeña, las caídas de voltaje que ocasiona a través de R_p y X_p también son pequeñas; entonces, el circuito equivalente se puede simplificar conectando la parte que corresponde a la red de vacío al circuito de alimentación, como se muestra en la siguiente figura.

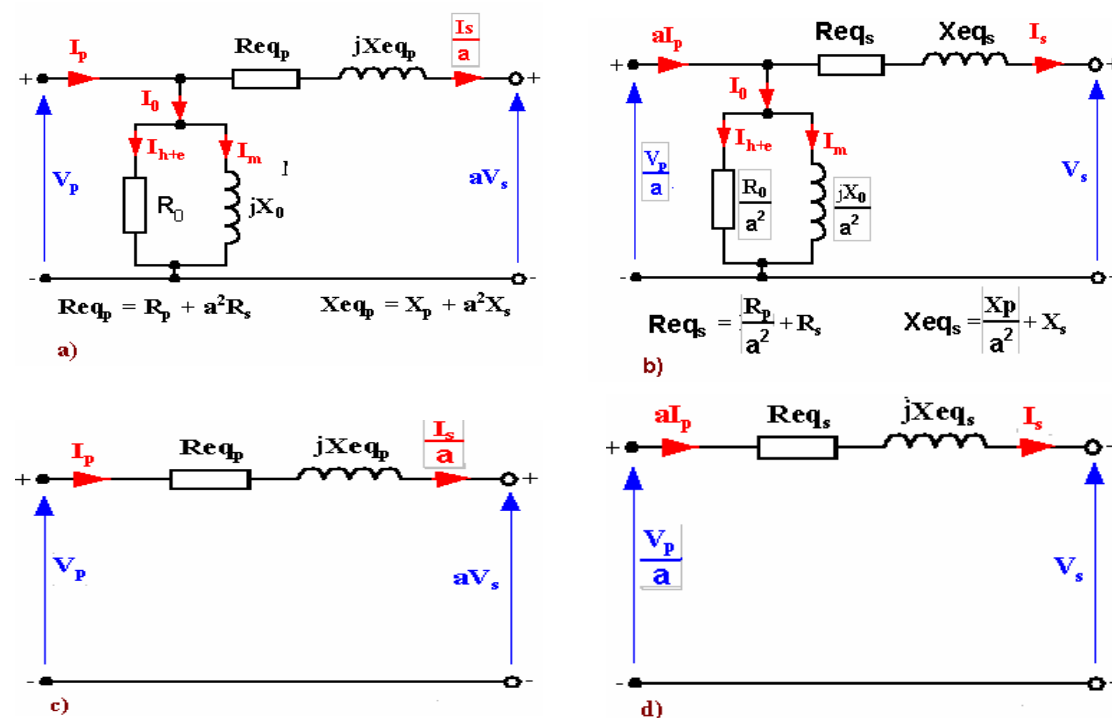


Figura 1.3.2: Circuitos equivalentes aproximados del transformador; a) Referido al primario, b) Referido al secundario, c) Sin rama de magnetización referida al primario y d) Sin rama de magnetización referida al secundario.

1.4 CAÍDA DE TENSIÓN DEL TRANSFORMADOR.

Es la diferencia entre la tensión del secundario en vacío (E_2) y la que aparece cuando el transformador trabaja con carga (V_2):

$$\Delta V = E_2 - V_2 \quad (1.5)$$

Es útil expresar esta caída en valores porcentuales referidos a la tensión de vacío. A este valor porcentual se le denomina coeficiente de regulación (ε).

$$\varepsilon = \frac{E_2 - V_2}{E_2} 100 \quad (1.6)$$

Donde:

E_2 = Tensión del secundario en vacío

V_2 = Tensión del secundario en carga

ε = Coeficiente de regulación.

Para determinar la relación antes mencionada nos valdremos del circuito equivalente con los parámetros de cortocircuito.

En este caso V_1 es la tensión que aparecería en la carga reducida al primario estando el transformador en vacío. La tensión V'_2 será la tensión que aparece en los bornes de la carga cuando se establece la corriente I_1 por el transformador. En este caso la caída de tensión será la diferencia entre estas dos tensiones:

$$\Delta V = V_1 - V'_2 \quad (1.7)$$

El coeficiente de regulación en este caso se expresará como:

$$\varepsilon = \frac{V_1 - V'_2}{V_1} 100 \quad (1.8)$$

1.5 POTENCIA DEL TRANSFORMADOR.

La potencia nominal del transformador monofásico, es el producto de su tensión nominal primaria por la corriente nominal primaria. Es decir, su potencia aparente:

$$S_n = V_n I_n \quad (1.9)$$

Se entiende por tensiones y corrientes nominales a los valores para los cuales ha sido proyectado el transformador.

Un transformador trabajando en sus características nominales evacuará el calor que produce sin dificultad, manteniendo una temperatura de trabajo no peligrosa. Si exigimos que trabaje a una potencia superior a la nominal, se calentará excesivamente.

1.5.1 POTENCIA SUMINISTRADA.

Cuando entrega una potencia igual a la nominal se dice que trabaja a plena carga.

Entregando otras potencias e intensidades se aplica el concepto de índice de carga:

$$K = \frac{S}{S_n} = \frac{I}{I_n} \quad (1.10)$$

1.5.2 PÉRDIDAS EN EL HIERRO.

El campo magnético alterno creado en el núcleo del transformador produce los fenómenos de histéresis y de corrientes parásitas o de Foucault, que dan lugar a las pérdidas en el hierro que se manifiestan en forma de calor.

En el ensayo de vacío, la corriente es tan pequeña que se pueden despreciar las pérdidas en el cobre por efecto Joule y considerar que toda la potencia medida es debida a las pérdidas en el hierro.

$$P_{Fe} = P_0 \quad (1.11)$$

En el ensayo de vacío la potencia medida corresponde a las pérdidas en el hierro. Además se consideran constantes, independientes de la carga.

1.5.3 PÉRDIDAS EN EL COBRE.

En la resistencia de los arrollamientos del transformador se disipará una potencia en forma de calor por efecto Joule.

En el ensayo de cortocircuito, las pérdidas en el hierro son muy pequeñas por realizarse a una tensión reducida, del orden del 5% de la nominal y despreciables frente a las del cobre.

En el ensayo de cortocircuito la potencia medida corresponde a las pérdidas en el cobre:

$$P_{cu} = R_1 I_{21} + R_2 I_{22} \quad (1.12)$$

$$P_{cun} = P_{cc} \quad (1.12a)$$

$$P_{cu} = K^2 P_{cun} \quad (1.12b)$$

1.6 RENDIMIENTO DEL TRANSFORMADOR.

Es la relación entre la potencia suministrada a la carga por el secundario (P_2) y la potencia absorbida por la red por el primario (P_1), expresada en tantos por ciento. De esta forma, el rendimiento se expresa como:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} 100 \quad (1.13)$$

La potencia que el transformador toma de la red de entrada, es la suma de la potencia proporcionada a la carga más las pérdidas que se producen en los circuitos magnéticos y en los devanados de cobre: $P_1 = P_2 + P_{Fe} + P_{Cu}$.

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_{Fe} + P_{Cu}} 100 \quad (1.14)$$

Donde:

η = Rendimiento del transformador en %. P_{Fe} = Pérdidas en el hierro.

P_2 = Potencia activa o cedida a la carga. P_{Cu} = Pérdidas en el cobre.

El rendimiento del transformador dependerá del índice de carga al que trabaje. Se puede demostrar que el rendimiento máximo cuando las pérdidas en el cobre se igualan a las pérdidas en el hierro.

$$\eta_{\max} \Rightarrow P_{Cu} = P_{Fe} \Rightarrow K^2 P_{cc} = P_{Fe} \Rightarrow K = \sqrt{\frac{P_{Fe}}{P_{cc}}} \quad (1.15)$$

1.7 TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS.



Se puede decir, que un transformador trifásico está constituido por tres transformadores monofásicos montados en un núcleo magnético común. La constitución más común es de tres columnas, con los arrollamientos primarios y secundarios alternados o concéntricos.

El estudio del transformador trifásico se puede reducir al monofásico a condición de trabajar con los valores por fase. En este sentido, la fórmula de potencia a aplicar, en vacío, en carga o en cortocircuito, será trifásica y no monofásica.

1.7.1 NORMALIZACIÓN DE TERMINALES.

Para simplificar la conexión de los transformadores y evitar la necesidad de pruebas de polaridad, rotación de fase, etc., el IEEE creó su norma C57.12.70-2000 “IEEE Standard Terminal Marking and Connections for Distribution and Power Transformers”, en donde se menciona la forma en que deben ser marcadas las terminales y los tipos de conexiones en transformadores trifásicos y monofásicos; de distribución, potencia y de regulación. Esta norma cubre lo relacionado con la secuencia de designación; designación de terminales externas, designación de terminales de neutro y tierra, etc. También menciona los conceptos de polaridad aditiva y sustractiva, así como lo relacionado con el paralelaje de transformadores. Finalmente describen las conexiones monofásicas estandarizadas, y menciona el desplazamiento angular en arreglos de bancos trifásicos. Esta norma agrupa toda la información necesaria acerca de las conexiones de transformadores.

La norma especifica que las terminales de Alta tensión en un transformador monofásico o trifásico deben ser marcadas con la letra H, mientras que las de baja tensión con la letra X; los subíndices de estas literales deben corresponder a la polaridad instantánea de los devanados, es decir, que H₁ tiene la misma polaridad instantánea que X₁.

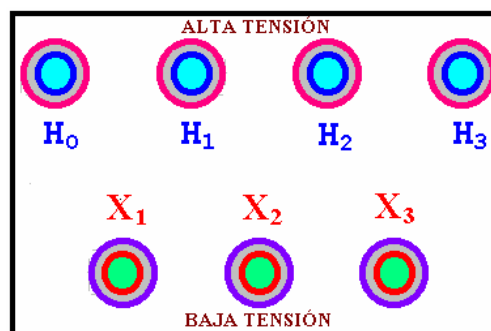


Fig. 1.6.1: Nomenclatura de Terminales (ANSI).

1.7.2 CONEXIÓN DE TRANSFORMADORES EN PARALELO.

La conexión de transformadores en paralelo se hace necesaria debido a los incrementos de la demanda que superan la capacidad existente ó cuando los requerimientos de confiabilidad y continuidad de operación lo exigen, si un transformador falla, el otro continuará alimentando la carga sin interrupción. Cuando la demanda de energía se reduce temporalmente, resulta más económico operar un transformador pequeño cerca de su límite de capacidad a plena carga que un transformador mayor a capacidad reducida. Por lo que, cuando la demanda energética es muy fluctuante resulta más provechoso la instalación de dos o más transformadores en paralelo que utilizar un transformador de gran capacidad. En estas condiciones el sistema es más flexible porque tiene la posibilidad de agregar una parte de los transformadores en paralelo cuando sea necesario.

Los transformadores marcados según la norma C57.12.70-2000 pueden operar en paralelo por la simple conexión de terminales numeradas igualmente; es decir, si tienen características similares como relación de vueltas, impedancia, capacidad nominal, frecuencia, deben tener el mismo arreglo en los devanados, estar conectados con la misma polaridad, la misma rotación de fase y el mismo desplazamiento angular.

La división de la corriente de carga, en proporción a las capacidades de KVA de los transformadores en paralelo está determinada por la igualdad de sus voltajes nominales, relación de vueltas en los devanados, porcentaje de impedancias y relaciones de su reactancia a su resistencia. Si estas condiciones no se cumplen, las corrientes de carga no se pueden dividir proporcionalmente en las capacidades nominales de KVA de los transformadores, y puede surgir una diferencia de fase entre las corrientes. Sin embargo, a pesar de la gran ayuda que ofrece la norma, siempre es bueno saber como verificar la polaridad, secuencia de fase y desplazamiento angular en el transformador.

Cuando los voltajes inducidos están en la misma dirección se dice que se tiene polaridad sustractiva (figura 1.7.2a). Las terminales H_1 y X_1 estarán del lado izquierdo viendo el transformador del lado de bajo voltaje hacia el lado de alto voltaje y cuando los voltajes inducidos en los devanados de alta y baja tensión del transformador se encuentran en oposición (figura 1.7.2b), se tiene polaridad “aditiva”. La terminal X_1 se encontrará del lado derecho

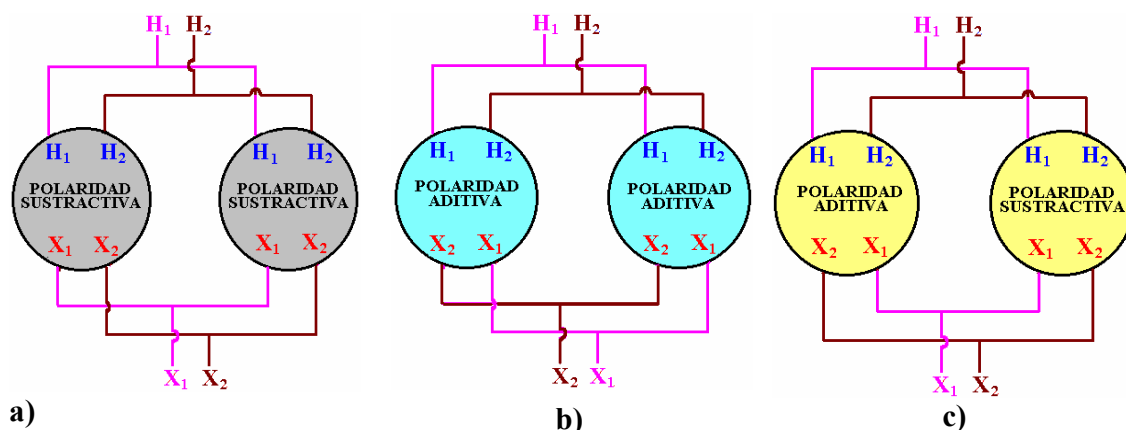


Figura 1.7.2: Conexiones de Transformadores Monofásicos en Paralelo.

1.7.3 PRUEBAS DE POLARIDAD, DESPLAZAMIENTO ANGULAR Y SECUENCIA DE FASE.

1.- Pruebas de Polaridad: Sirve para determinar como se encuentran devanadas unas con respecto de otras las bobinas de un transformador de modo que se pueda conocer la “dirección” del voltaje secundario cuando se conecten transformadores en paralelo. Existen tres métodos para determinar la polaridad:

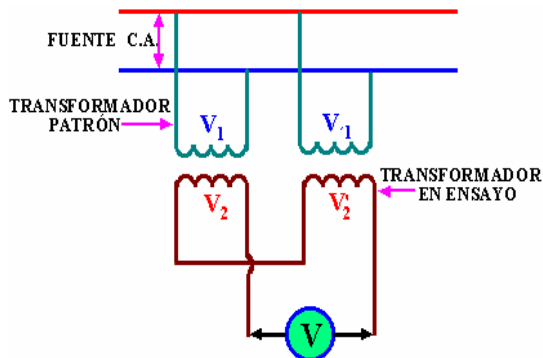
a) Prueba de polaridad mediante un transformador normalizado.

Cuando se dispone de un transformador normalizado de polaridad conocida y de la misma relación que la unidad que se está probando, se conectan en paralelo los devanados de alta tensión de ambos transformadores uniendo los terminales igualmente marcados. Se conectan también análogamente los terminales marcados de un extremo de los devanados de baja tensión de ambos transformadores, dejando los otros extremos libres.

Se aplica un valor reducido de tensión a los devanados de alta tensión y se mide la tensión entre los dos terminales libres. Una lectura cero ó despreciable del voltímetro indicará que las polaridades de ambos transformadores son idénticas.

Si el voltímetro indica $V_2 + V'_2$, entonces las marcas de polaridad del transformador que se prueba serán diagonales (polaridad aditiva).

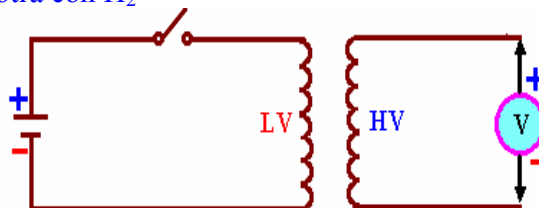
Si el voltímetro indica $V_2 - V'_2$, entonces las marcas de polaridad del transformador que se prueba serán colineales (polaridad sustractiva) e idénticas a las del transformador patrón.



b) Prueba de polaridad por respuesta inductiva (golpe inductivo).

Se conecta una fuente de corriente continua en serie con el switch abierto al devanado de bajo voltaje del transformador, la terminal conectada al lado positivo de la fuente se marca con X_1 . Un voltímetro de corriente continua se conecta a través de las terminales de alto voltaje, cuando el switch se cierra se induce momentáneamente un voltaje en el devanado de alto voltaje.

Si en este momento, la aguja del voltímetro se mueve al interior de la escala, la terminal del transformador conectada al lado positivo del voltímetro se marca con H_1 y la otra con H_2

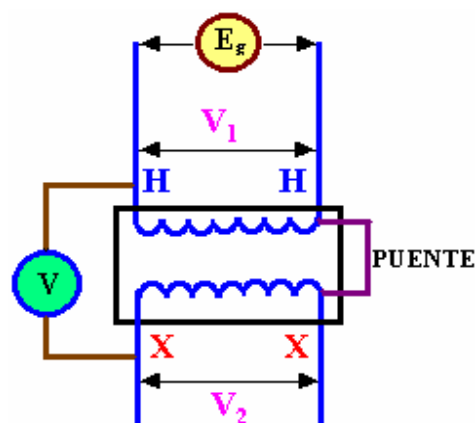


c) Prueba de polaridad mediante corriente alterna.

Colocándose enfrente del lado de baja tensión del transformador, se unen las conexiones adyacentes, de alta y baja tensión de la parte izquierda. Aplicar al devanado de alto voltaje una fuente de corriente alterna E_g . En el lado derecho entre los devanados de alto voltaje y bajo se conecta un puente.

Si la lectura del voltímetro V da un valor superior a la del voltímetro V_1 se dice que la polaridad es aditiva. Por lo tanto H_1 y X_1 se encuentran opuestas diagonalmente.

Si el voltaje medido en el voltímetro V da un valor inferior a V_1 , se dice que la polaridad es sustractiva y las terminales H_1 y X_1 están adyacentes.



2.- Desplazamiento Angular y Secuencia de Fases: La determinación de la polaridad en transformadores trifásicos es mas complicada que en los monofásicos. Además de la dirección de los devanados, puede existir un desplazamiento angular entre los voltajes secundarios, dependiendo de como los devanados de alto voltaje estén conectados a la alimentación trifásica primaria.

Un transformador trifásico, tiene una placa de datos que incluye un diagrama vectorial de voltajes que muestra las relaciones entre los voltajes de las tres fases como se muestra en la tabla 1.7.3. El desplazamiento angular entre los devanados de alto voltaje y bajo voltaje, es el ángulo entre las líneas que pasan del punto neutro del diagrama de vector de voltajes, a través de H_1 y X_1 respectivamente.

Para verificar el desplazamiento de fases una de las terminales H se conecta a una de las terminales X. El primario del transformador se conecta a una fuente de voltaje trifásica a bajo voltaje (por seguridad, debe ser mas baja que el voltaje nominal del secundario del transformador) y se mide el voltaje entre terminales como se muestra en la tabla 1.7.3 y 1.7.3a. Las relaciones de voltaje deben estar de acuerdo con las relaciones indicadas.

	MARCAS DE POLARIDAD	DESPLAZAMIENTO ANGULAR	DIAGRAMA PARA MEDICIÓN	VERIFICAR MEDICIONES
Desplazamiento Angular de 0°				Conectar H_1 a X_1 Medir: H_2-X_2 , H_3-X_2 , H_1-H_2 , H_2-X_3
Desplazamiento Angular de 0°				Relaciones de voltaje: (1) $H_2-X_3 = H_3-X_2$ (2) $H_2-X_2 < H_1-H_2$ (3) $H_2-X_2 < H_2-X_3$
Desplazamiento Angular de 30°				Conectar H_1 a X_1 Medir: H_3-X_2 , H_3-X_3 , H_1-X_3 , H_2-X_2 , H_2-X_3
Desplazamiento Angular de 30°				Relaciones de voltaje: (1) $H_3-X_2 = H_3-X_3$ (2) $H_3-X_2 < H_1-H_3$ (3) $H_2-X_2 < H_2-X_3$ (4) $H_2-X_2 < H_1-H_3$

Tabla 1.7.3: Marcas de polaridad de transformadores mostrando los diagramas vectoriales de voltaje.

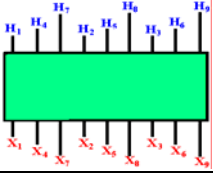
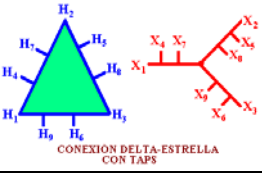
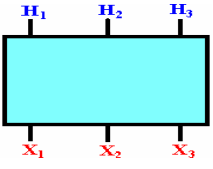
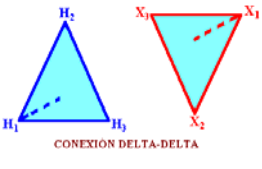
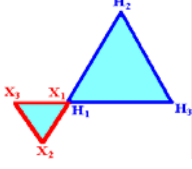
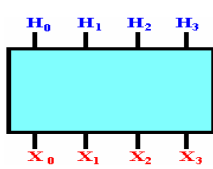
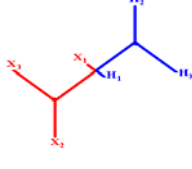
	MARCAS DE POLARIDAD	DESPLAZAMIENTO ANGULAR	DIAGRAMA PARA MEDICIÓN	VERIFICAR MEDICIONES
				
Desplazamiento Angular de 180°				Conectar H_1 a X_1 Medir: H_2-X_2 , H_3-X_3 , H_1-H_2 , H_1-H_3
Desplazamiento Angular de 180°				Relaciones de voltaje: (1) $H_2-X_2=H_3-X_3$ (2) $H_1-H_2<H_2-X_2$ (3) $H_1-H_3<H_3-X_3$

Tabla 1.7.3a: Marcas de polaridad de transformadores mostrando los diagramas vectoriales de voltaje.

1.7.4 CONEXIONES DE TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS.

La transformación trifásica se puede realizar por medio de tres transformadores monofásicos en conexión trifásica o por medio de transformadores trifásicos. Los métodos de conexión de los devanados para la conexión trifásica son los mismos, ya sea que se usen tres devanados en un transformador trifásico o bien tres transformadores monofásicos por separado, en conexión trifásica. Las conexiones trifásicas más comunes son:

- 1) Conexión estrella – estrella (Y-Y).
- 2) Conexión estrella – delta. (Y-D)
- 3) Conexión delta- estrella. (D-Y)
- 4) Conexión delta – delta (D-D)

1) Conexión estrella – estrella (Y-Y).

La conexión estrella-estrella da un servicio satisfactorio en las cargas trifásicas balanceadas; cuando la carga se desbalancea, el neutro eléctrico estará en el centro exacto de un punto que hará desigual los tres voltajes de línea a neutro.

Esta conexión se emplea en sistemas que operan con tensiones relativamente elevadas y en instalaciones de potencia de 4 hilos; sin embargo, tiene los siguientes inconvenientes:

- Si la carga del transformador es desbalanceada, produce fuertes desbalances en los voltajes de fase del transformador.
- No presenta oposición a los armónicos impares (especialmente el tercero). Debido a esto la tensión del tercer armónico puede ser mayor que el mismo voltaje fundamental.
- En caso de fallar por alguna razón uno de los transformadores no es posible alimentar carga trifásica.

En una conexión Y-Y, el voltaje primario de cada fase se expresa por: $V_{FP} = V_{LP} / \sqrt{3}$, y está relacionada con el voltaje secundario de fase mediante la relación de espiras del transformador. El voltaje secundario de fase y el voltaje secundario de línea se relacionan por: $V_{LS} = \sqrt{3} (V_{FS})$. En consecuencia, la relación de voltajes del transformador es:

$$V_{LP}/V_{LS} = (\sqrt{3} * V_{FP}) / (\sqrt{3} * V_{FS}) = a$$

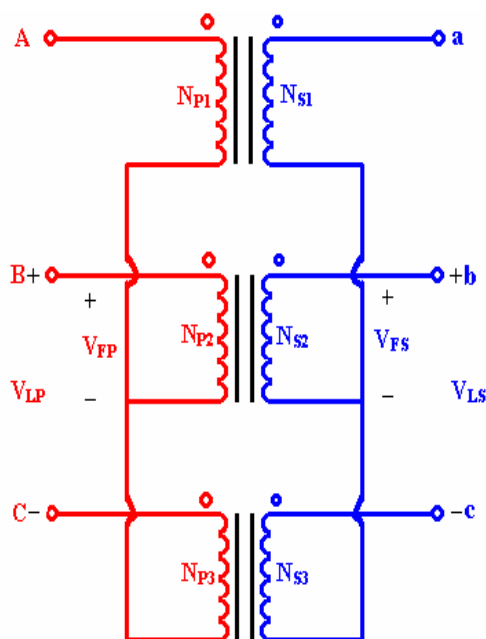


Figura 1.7.4: Conexión Y-Y

Los problemas de desequilibrio de voltajes y del tercer armónico, pueden solucionarse juntos usando alguna de las dos técnicas que se mencionan a continuación:

- Conectar sólidamente a tierra los neutros de los transformadores (especialmente el del primario). Esto permite que los componentes adicionales del tercer armónico originen un flujo de corriente en el neutro, en lugar de causar sobre-voltajes. El neutro también proporciona un recorrido de retorno a cualquier desequilibrio de corriente de la carga.
- Agregar un tercer devanado (terciario) conectado en delta al grupo de transformadores. Esto permite que se origine un flujo de corriente circulatoria dentro del devanado, permitiendo que se eliminen los componentes del tercer armónico del voltaje, en la misma forma que lo hace la conexión a tierra de los neutros.

En la práctica muy pocos transformadores con esta configuración son usados. A pesar de no ser necesario, los arrollamientos terciarios tienen terminales hacia el exterior del transformador puesto que frecuentemente son utilizados para servicios auxiliares de la subestación donde está ubicado el transformador. Como el terciario debe ser capaz de soportar las corrientes circulantes, normalmente la capacidad del terciario es igual a 1/3 de la potencia nominal de los otros dos devanados.

d) **Conexión estrella – delta (Y-D).**

En esta conexión el voltaje primario de línea se relaciona con el voltaje primario de fase mediante $V_{LP} = \sqrt{3} * V_{FP}$, mientras que las tensiones secundarias de línea y de fase son iguales: $V_{LS} = V_{FS}$. La relación de tensiones de fase es:

$$V_{FP} / V_{FS} = a$$

De tal manera que la relación total entre el voltaje de línea en el lado primario del grupo y el voltaje de línea en el lado secundario del grupo es:

$$V_{LP} / V_{LS} = (\sqrt{3} * V_{FP}) / V_{FS}$$

$$V_{LP} / V_{LS} = (\sqrt{3} * a)$$

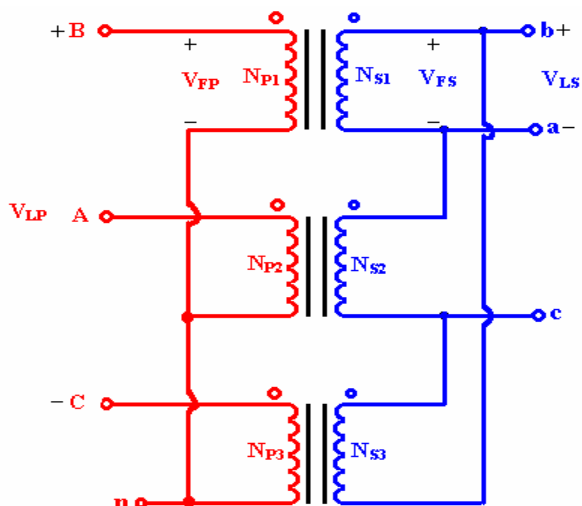


Figura 1.7.4a: Conexión Y-D

La conexión Y-D no tiene problema con los componentes de tercer armónico de voltaje, ya que estos se consumen en corriente circulante en el lado conectado en delta. Esta conexión es más estable bajo carga des-balanceada, ya que la delta redistribuye parcialmente cualquier des-balance que se presente.

Esta disposición tiene un problema. Debido a la conexión delta, las tensiones secundarias se desplazan 30° con respecto a los voltajes del primario, lo cual puede causar inconvenientes al conectar en paralelo los secundarios de dos grupos de transformadores. Los ángulos de fase de las tensiones secundarias deben ser iguales si los transformadores van a conectar en paralelo. Esto significa que debe ponerse atención a la dirección de los 30° de desplazamiento de cada banco de transformadores cuando van a conectarse en paralelo.

La conexión Y-D hará que el voltaje secundario se atrase, si la secuencia es abc. Si la secuencia del sistema fase es acb, entonces la conexión hará que el voltaje secundario se adelante al voltaje primario en 30°.

Su aplicación es en los sistemas de transmisión de las subestaciones receptoras cuya función es reducir el voltaje. En sistemas de distribución es poco usual (no tiene neutro) y solo se emplea en algunas ocasiones para distribución rural a 20 KV.

e) Conexión delta-estrella (D-Y).

En esta conexión el voltaje de línea primario es igual al voltaje de fase primario, $V_{LP} = V_{FP}$, mientras que los voltajes secundarios se relacionan por $V_{LS} = \sqrt{3} * V_{FS}$, por tanto, la relación entre los voltajes de línea a línea de esta conexión es:

$$V_{LP} / V_{LS} = V_{FP} / (\sqrt{3} * V_{FS})$$

$$V_{LP} / V_{LS} = a / \sqrt{3}$$

Esta conexión tiene las mismas ventajas y el mismo desplazamiento de fase que el transformador Y-D. La conexión que se ilustra, hace que el voltaje secundario atrase al primario en 30° , tal como sucedió antes.

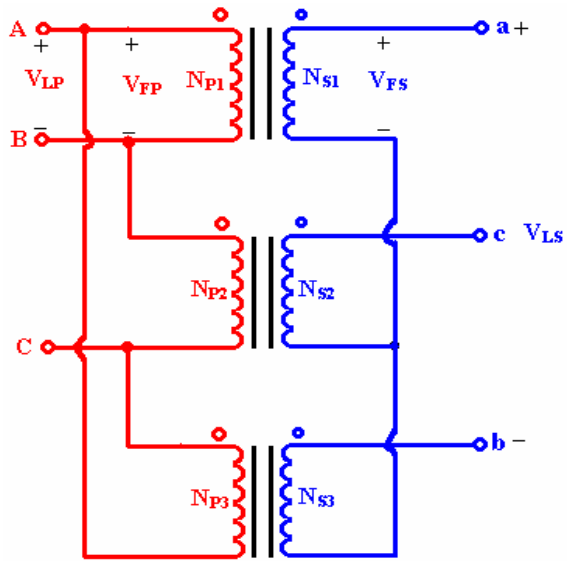


Figura 1.7.4b: Conexión D-Y

Se usa en los sistemas de potencia para elevar voltajes de generación o de transmisión, en los sistemas de distribución industrial (a 4 hilos) para alimentación de fuerza y alumbrado debido a que se tiene acceso a dos tensiones distintas, de fase y línea.

f) Conexión delta-delta (D-D).

Esta conexión se emplea tanto para elevar la tensión como para reducirla.

En caso de falla o reparación este tipo de conexión, se puede convertir en una conexión delta abierta-delta abierta.

En este tipo de conexión los voltajes de línea y de fase en el primario y en el secundario son iguales:

$$V_{LP} = V_{FP} \quad \text{y} \quad V_{LS} = V_{FS}$$

Así que la relación entre los voltajes de línea primario y secundario es:

$$V_{LP} / V_{LS} = V_{FP} / V_{FS} = a$$

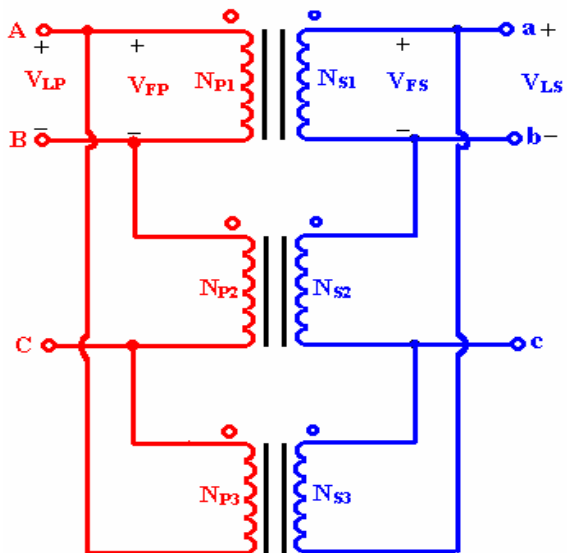


Figura 1.7.4c: Conexión D-D.

Esta conexión se utiliza frecuentemente para alimentar sistemas de alumbrado monofásicos y carga de potencia trifásica simultáneamente, presenta la ventaja de poder conectar los devanados primario y secundario sin desfaseamiento y no tiene problemas de cargas des-balanceadas o armónicas. Sin embargo, circulan altas corrientes a menos que todos los transformadores sean conectados con el mismo TAP de regulación y tengan la misma tensión. Es ampliamente utilizada en los transformadores de tipo horno, en las industrias de fundición. Su desventaja en altas tensiones es que se requiere aislar cada terminal del transformador al nivel de línea, lo cual se traduce en un costo mayor.

1.7.5 TRANSFORMACIÓN TRIFÁSICA MEDIANTE DOS TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS.

Además de las conexiones trifásicas normales, existen otras formas de lograr transformación trifásica con sólo dos transformadores. Las técnicas usadas se basan en la reducción de la capacidad de carga de los transformadores, que algunas veces puede justificarse por ciertos factores económicos. Algunas de las principales conexiones de este tipo son:

1) - La conexión delta -abierta (V-V)

En ciertos casos un grupo completo de transformadores puede no utilizarse para lograr transformación trifásica. Suponiendo que un grupo de tres transformadores monofásicos conectados en D-D, tiene una fase averiada que se debe retirar para repararla. Si los voltajes secundarios restantes son $V_A = V\angle 0^\circ$ y $V_B = V\angle -120^\circ$ V, entonces el voltaje resultante en el espacio que ocupaba el tercer transformador se expresa por:

$$V_c = -V_A - V_B = -V\angle 0^\circ - V\angle -120^\circ$$

$$V_c = -V - (-0.5 V - j0.866 V)$$

$$V_c = -0.5 V + j0.866 V$$

$$V_c = V \angle 120^\circ$$

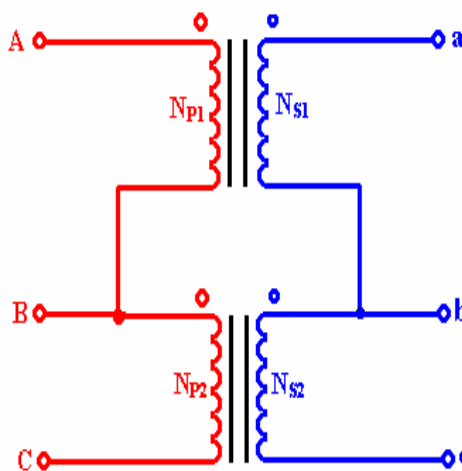


Fig. 1.7.5: Conexión D abierta-D abierta (V-V).

Este sería el voltaje que aparecería entre los mismos puntos si el tercer transformador aún estuviera allí. A la fase C se le llama fase fantasma, en algunas ocasiones. Por tanto, la conexión delta-abierta permite que un grupo con sólo dos transformadores continúe entregando potencia trifásica, aún habiéndosele removido una fase dañada.

Estando conectando el grupo de transformadores D-D a una carga resistiva. Si el voltaje nominal de un transformador en el grupo es V_F y la corriente nominal es I_F , la potencia máxima que pueden entregar a la carga es:

$$P = 3 V_F I_F \cos \Phi \quad (1.16)$$

El ángulo entre el voltaje V_F y la corriente I_F , en cada fase es 0° , de manera que la potencia total suministrada por los transformadores es:

$$P = 3 V_F I_F \cos 0^\circ$$

$$P = 3 V_F I_F$$

Es importante observar los ángulos de los voltajes y corrientes en este grupo de transformadores. Debido a que se perdió una de las fases del transformador, la corriente por las líneas hacia la carga es igual a la corriente de fase de cada transformador, las corrientes y voltajes del grupo difieren en un ángulo de 30° .

Como los ángulos de corriente y voltaje son diferentes en cada uno de los transformadores, es necesario analizar cada uno de ellos individualmente para determinar la potencia máxima que pueden suministrar. Para el transformador 1, el voltaje tiene un ángulo de 150° y la corriente tiene uno de 120° , así que la máxima potencia del transformador 1 sería:

$$P_1 = V_F I_F \cos(150^\circ - 120^\circ)$$

$$P_1 = V_F I_F \cos 30^\circ$$

$$P_1 = (\sqrt{3} / 2) V_F I_F$$

Para el transformador 2, el voltaje está a 30° y la corriente a 60° . Por lo tanto, su potencia máxima es:

$$P_2 = V_F I_F \cos(30^\circ - 60^\circ)$$

$$P_2 = V_F I_F \cos(-30^\circ)$$

$$P_2 = (\sqrt{3} / 2) V_F I_F$$

Por lo cual, la potencia máxima del grupo delta-abierta se expresa como:

$$P = \sqrt{3} V_F I_F$$

La corriente nominal es la misma en cada transformador, independientemente de si hay dos o tres de ellos, el voltaje es el mismo, así que la relación entre la potencia máxima que puede entregar el grupo delta abierta y la potencia máxima que puede entregar el grupo trifásico normal es:

$$P_{V-V} / P_{\Delta-\Delta} = (\sqrt{3} V_F I_F) / (3 V_F I_F) = 1 / \sqrt{3} = 0.577$$

La potencia disponible que sale del grupo en delta-abierta es sólo el 57.7% de la potencia nominal del grupo original.

La potencia reactiva del transformador 1 es:

$$Q_1 = V_F I_F \sin (150^\circ - 120^\circ)$$

$$Q_1 = V_F I_F \sin 30^\circ$$

$$Q_1 = 0.5 V_F I_F$$

La potencia reactiva del transformador 2 es:

$$Q_2 = V_F I_F \sin (30^\circ - 60^\circ) \quad Q_2 = V_F I_F \sin (-30^\circ) \quad Q_2 = -0.5 V_F I_F$$

Un transformador está produciendo la potencia reactiva que el otro está consumiendo. Este intercambio de energía entre los dos transformadores es lo que limita la potencia al 57.7% de la potencia nominal del grupo original, en lugar del 66.7% esperado en otras condiciones. Otra forma alterna de expresar la potencia máxima de la conexión delta-abierta es decir que solo puede utilizarse el 86.7% de la potencia nominal de los dos transformadores restantes.

2)- Conexión Y abierta- D abierta.

Este tipo de conexión es similar a la conexión delta-abierta, con la diferencia de que los voltajes primarios se obtienen a partir de dos fases y el neutro.

Se utiliza para alimentación pequeños consumidores comerciales que necesitan servicio trifásico en zonas rurales donde no se dispone de las tres fases. Con esta conexión un consumidor puede obtener servicio trifásico de manera provisional, hasta que el aumento de la demanda requiera la instalación de la tercera fase.

La mayor desventaja de la conexión la constituye la gran corriente de retorno que debe fluir por el neutro del circuito primario.

La desventaja principal de esta conexión es que por el neutro del circuito primario debe fluir una corriente de retorno considerablemente grande.

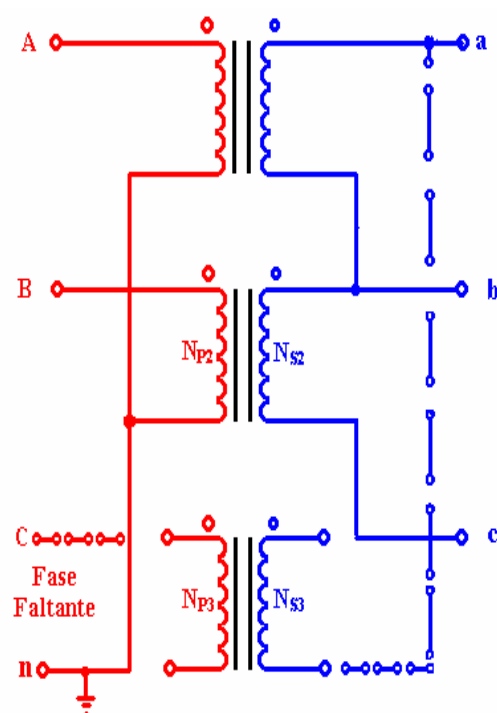


Fig. 1.7.5.1: Conexión Y abierta-D abierta.

3)- La conexión Scott-T.

La conexión Scott-T es la manera de obtener dos fases, separadas 90° de una fuente de alimentación trifásica. En los comienzos de la transformación de C.A. los sistemas de potencia bifásicos y trifásicos eran comunes y se requería la interconexión entre dichos sistemas. La conexión Scott-T de transformadores se desarrollo para lograr dicho propósito.

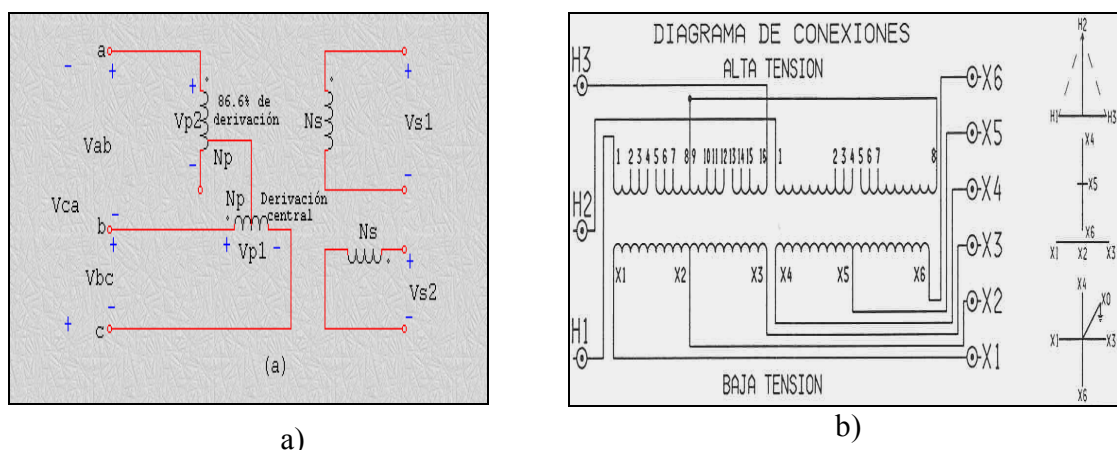


Fig. 1.7.5.2: a) Diagrama esquemático de la Conexión Scott-T. b) Diagrama de un Transformador Scott-T práctico.

Esta conexión consiste de dos transformadores monofásicos con idéntica potencia nominal. Uno tiene derivación en su bobinado primario al 86.6% de voltaje a plena carga. Están conectados tal como se ilustra en la figura 1.7.5.2a. La derivación del 86.6% del transformador T_2 debe conectarse al punto medio del transformador T_1 (derivación central). Los voltajes aplicados a los devanados primarios son voltajes trifásicos balanceados ($V_{ab} = V \angle 120^\circ$, $V_{bc} = V \angle 0^\circ$ y $V_{ca} = V \angle -120^\circ$) y los voltajes resultantes, producirán una salida bifásica. Un diagrama vectorial de los posibles voltajes de salida en estos tipos de transformadores se muestra en la figura 1.7.5.2b.

También es posible convertir potencia bifásica en potencia trifásica por medio de esta conexión, pero como existen muy pocos generadores bifásicos en uso, esto casi nunca se hace.

4)- La conexión trifásica en T.

La conexión Scott T usa dos transformadores para convertir potencia trifásica en potencia bifásica a diferente nivel de voltaje. Por medio de una sencilla modificación en dicha conexión, los mismos dos transformadores pueden convertir potencia trifásica en potencia trifásica de diferente nivel de voltaje. Esta conexión se ilustra en la figura 1.7.5.3e. Aquí, tanto el primario como el secundario del transformador T_2 tienen derivaciones a nivel del 86.6%, estas derivaciones están conectadas a las derivaciones centrales de los correspondientes bobinados del transformador T_1 . En esta conexión a T_1 se le llama transformador principal y a T_2 transformador excitador.

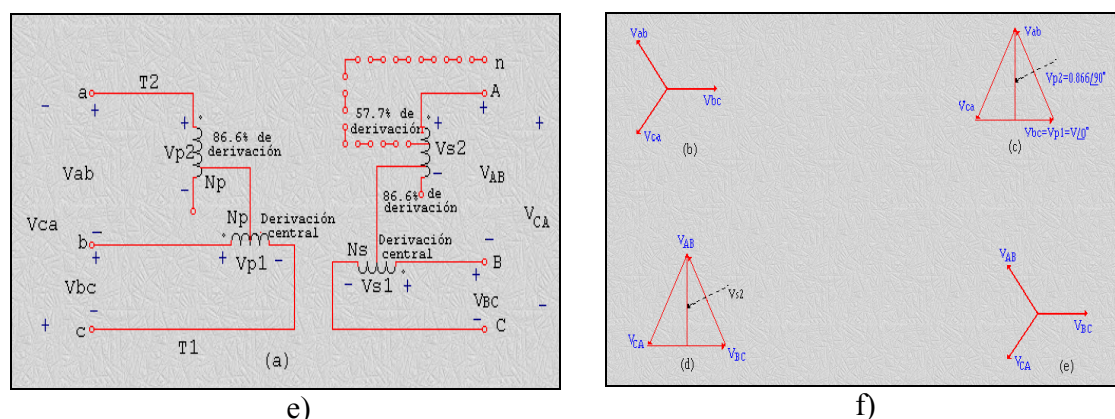


Fig. 1.7.5.3: e) Diagrama esquemático de la Conexión Trifásica en T. f) Voltajes de Entrada y salida

Como en la conexión Scott T, las tensiones de alimentación trifásicas producen dos voltajes desfasados 90° en los devanados primarios de los transformadores. Estos voltajes primarios a su vez producen tensiones secundarias también desfasadas 90° . Sin embargo, a diferencia de la conexión Scott T, las tensiones secundarias se recombinan para producir salida trifásica.

$$V_{ab} = V \angle 120^\circ$$

$$V_{bc} = V \angle 0^\circ$$

$$V_{ca} = V \angle -120^\circ.$$

Una ventaja principal de la conexión T trifásica sobre las otras conexiones trifásicas con dos transformadores es que se puede conectar un neutro, tanto en el primario como en el secundario del grupo de transformadores. Esta conexión se usa algunas veces en transformadores trifásicos de distribución, debido a que sus costos de fabricación son más bajos que los de un grupo completo de transformadores trifásicos.

1.8 REACTORES.

Los reactores, de la misma manera que los condensadores, son la parte fundamental y esencial de la red de transmisión y distribución de energía. Dependiendo de su función, los reactores son conectados en derivación o en serie con la red; solos (reactores limitadores de corriente, reactores en derivación) o en unión con otros componentes básicos tales como condensador de potencia (reactores en derivación con condensador variable, reactores con condensador de descarga, reactores de filtro).

Los reactores son utilizados para proporcionar reactancia inductiva a los circuitos de energía para una gran variedad de propósitos. Estos incluyen: limitar la corriente de falla, limitar la corriente de arranque en condensadores y motores, filtro de armónicas, compensación de los VAR, reducción de ondas de corriente, bloqueo de señales portadoras de la línea de alimentación, aterrizamiento del neutro, eliminar cambios transitorios, reducción de parpadeos para aplicaciones en hornos de arco, circuito de sintonización, balance de carga y acondicionamiento de energía.

Los reactores pueden ser instalados en cualquier nivel de voltaje: industrial, distribución o transmisión y pueden ser considerados para cualquier corriente a partir de algunos amperes o decenas de miles de amperes y niveles de corrientes de falla de hasta cientos de miles de amperes.

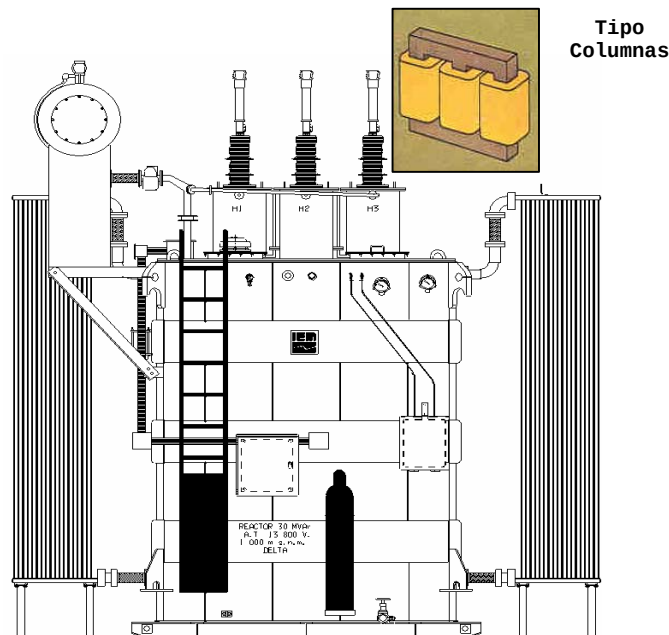


Figura 1.8: Reactor en Derivación de potencia tipo Columna.

1.8.1 APLICACIONES DE LOS REACTORES.

Los reactores han sido una parte integral de los sistemas de energía. Los reactores tipo seco con núcleo de aire tradicionalmente han sido utilizados para aplicaciones restrictivas de corriente debido a su inherente linealidad de la inductancia vs la corriente. Para esta aplicación, la construcción totalmente encapsulada es el diseño preferido porque sus características mecánicas mejoradas permiten a los reactores soportar corrientes de falla mas altas.

La tecnología de construcción empleada para los modernos reactores en derivación, esta más en función del voltaje aplicado. Los reactores en derivación clase transmisión son de construcción sumergidos en aceite y son conectados directamente al terciario o al voltaje más bajo.

1.8.2 REACTORES LIMITADORES DE CORRIENTE.

Los reactores limitadores de corriente son usados para controlar los niveles de cortocircuito en sistemas eléctricos de potencia que cubren la compleja gama de energía industrial a utilizar en redes de distribución y en sistemas de transmisión en grandes cantidades.

Los reactores limitadores de corriente son instalados principalmente para reducir la corriente de cortocircuito a niveles compatibles con los niveles de soporte electromecánico de los circuitos componentes (especialmente transformadores y disyuntores) y para reducir la caída de voltaje de corto circuito sobre las secciones de bus a niveles que son compatible en la práctica con la coordinación de protección. Las altas corrientes de falla en sistemas de transmisión o distribución, si no son limitadas, pueden causar fallas catastróficas del equipo de distribución y presentar una seria amenaza para la seguridad de los equipos en operación. En resumen, los reactores limitadores de corriente son instalados para reducir la magnitud de la corriente de corto circuito para conseguir uno o más de los siguientes beneficios:

- 1.- Reducción de la carga electro-mecánica y las tensiones térmicas sobre las bobinas de los transformadores, por lo tanto extendiendo la vida de servicio del transformador y equipo asociado.
- 2.- mejora de la estabilidad del voltaje del bus principal durante un evento de falla sobre un alimentador.
- 3.- Reducción de interrupción de la corriente de servicio de circuitos breakers y alimentadores.
- 4.- Reducción de la corriente de falla de línea a línea a niveles debajo de aquellas fallas de línea a tierra o viceversa.
- 5.- Protección de transformadores de distribución y todos los otros equipos de potencia y dispositivos a partir de la rápida propagación inicial de los voltajes transitorios debido a fallas y/o operaciones del circuito disyuntor.
- 6.- Reducción de los requisitos de los dispositivos de protección tales como recierre, seccionadores y fusibles limitadores de corriente.
- 7.- control completo sobre el estado de pérdidas fijas para cubrir cualquier factor específico Q para cualquier frecuencia deseada; esta característica es importante particularmente para redes donde las altas armónicas de corriente son eliminadas sin incrementar la pérdida de frecuencia fundamental.
- 8.- Incremento de la confiabilidad del sistema.

Los reactores limitadores de corriente pueden ser instalados en diferentes puntos de la red de energía y como tal están normalmente referidos por un nombre que refleja su ubicación. Las nomenclaturas más comunes son:

- 1.- Reactores de fase.- Instalados en serie con las líneas entrantes o salientes o alimentadores.
- 2.- Reactores de bus de amarre.- Usados para unir conjuntamente dos o mas buses independientes.
- 3.- Reactores de aterrizamiento del neutro.- Instalado entre el neutro de un transformador y tierra.
- 4.- Reactores Dúplex.- Instalado entre una fuente única y dos buses.

1.8.3 REACTORES EN DERIVACIÓN (COMPENSACIÓN REACTIVA FIJA).

Los reactores en derivación son dispositivos relativamente simples los cuales son contruidos con diversas configuraciones, una de las cuales es con núcleo de aire. Con el fin de obtener el valor apropiado de Ohms para la compensación reactiva de una aplicación dada, se requiere un sistema de bobinas diseñado para derivar a tierra la corriente requerida a voltaje nominal. Mientras una corriente alterna pase a través del sistema de bobinas, un flujo magnético alterno se generará. La manera y el tipo de distribución para este campo magnético es de donde surgen todas las posibles configuraciones de diseño.

La cosa mas sencilla que puede hacerse con éste campo magnético es permitir que la forma del campo sea determinada por las proporciones del sistema de bobinas. Esta configuración llega a ser entonces, un común reactor con núcleo de aire de bajo voltaje, el cual consiste de una bobina con apropiados refuerzos mecánicos y aislamientos respecto a tierra y entre vueltas.

Las líneas de transmisión de alto voltaje (AT) y extra-alta tensión (EAT), particularmente las líneas largas, generan grandes cantidades de potencia reactiva cuando estas operan en vacío o en condiciones de baja carga. Por el contrario, si la línea esta sobrecargada, absorben una gran cantidad de energía reactiva.

La capacitancia a tierra por unidad de longitud es el factor dominante en la impedancia de la línea bajo estas condiciones de operación. Como la corriente capacitiva es proporcional al voltaje del sistema, los Volts/Ampers reactivos son proporcionales al cuadrado del voltaje de la línea. Esta energía reactiva debe ser controlada, pues de lo contrario puede provocar grandes sobre-tensiones en las terminales de los equipos conectados al sistema de potencia. A menos que la línea de transmisión este operando bajo potencia reactiva balanceada, el voltaje sobre el sistema no puede ser mantenido en valores establecidos.

$$\text{POTENCIA REACTIVA BALANCEADA} = \text{CARGA TOTAL DE LA LÍNEA} - \text{PÉRDIDAS REACTIVAS DE LA LÍNEA.}$$

Si el balance de potencia es $\neq 0$, la línea debe ser compensada por una condición operacional dada. Bajo sobrecarga, el balance de potencia es negativo y se requiere una compensación capacitiva (soporte de voltaje), en vacío o bajo carga ligera, el balance de potencia es positivo y se requiere una compensación inductiva.

Los reactores en derivación se utilizan para proporcionar compensación reactiva inductiva para atenuar los efectos de la alta corriente de carga de las líneas de transmisión y sistemas de cable, disminuyendo durante la energización o recierre los altos voltajes del sistema de las líneas de transmisión.

Los reactores en derivación diseñados para altas y extra-altas tensiones, pueden conectarse directamente a la línea de transmisión para compensarla. La conexión podría estar al final de la línea de transmisión o en un punto intermedio, dependiendo de las consideraciones sobre el perfil del voltaje. Los reactores en derivación conectados directamente son de construcción sumergidos en aceite y los reactores de bajo voltaje son conectados a través del bobinado terciario de los transformadores y auto-transformadores de potencia para compensar la línea de transmisión; típicamente 13.8 KV, 34.5 KV, 69 KV, 115 KV, 138 KV, 230 KV, 345 KV, 400 KV, y 500 KV.

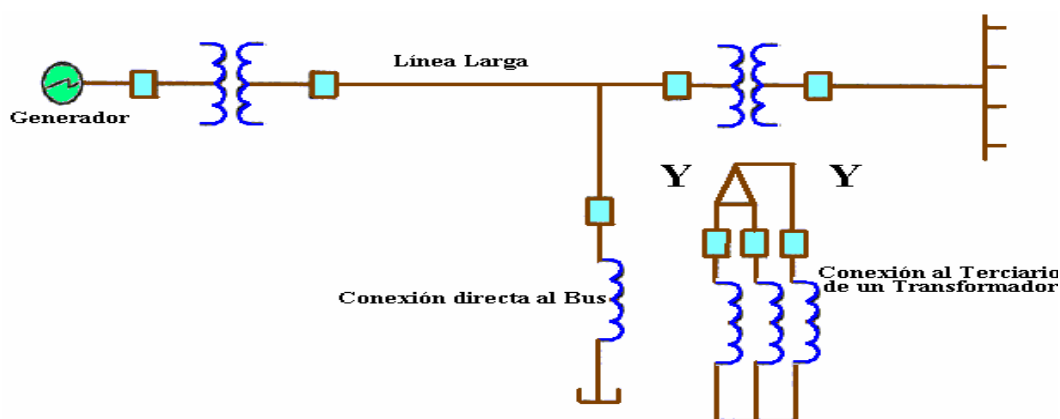


Fig. 1.8.3: Conexión típica de Reactores en Derivación en el Sistema Eléctrico de Potencia.

Los reactores en derivación sumergidos en aceite están disponibles en dos diseños: sin núcleo y con núcleo de hierro (ambos enfriados por sí mismos o por aire forzado). Los reactores en derivación sin núcleo sumergidos en aceite utilizan un circuito magnético o el revestimiento que rodea el bobinado para contener el flujo dentro del tanque del reactor.

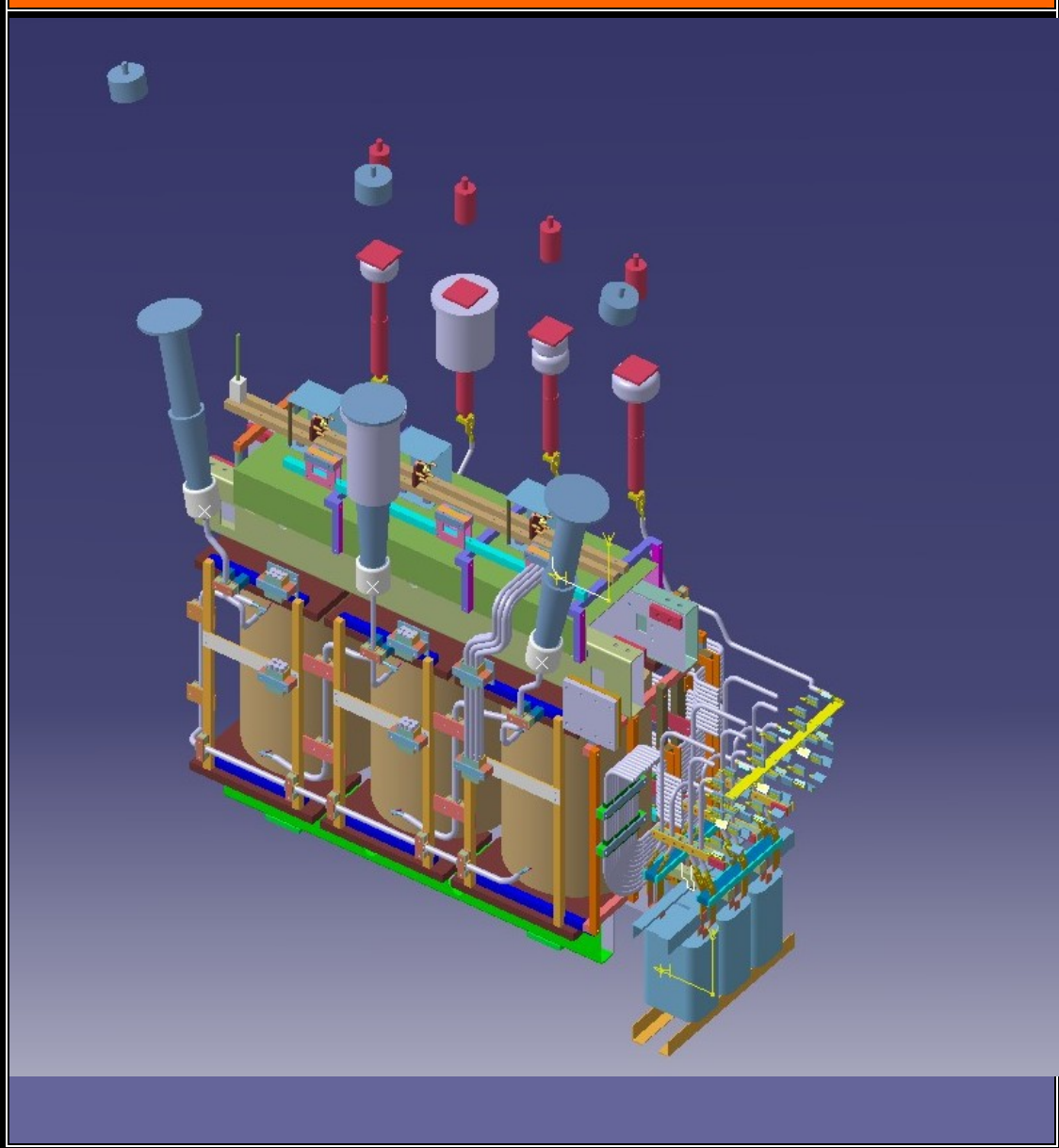
El núcleo de acero que normalmente proporciona el camino al flujo magnético a través de las bobinas primaria y secundaria de un transformador de potencia es reemplazado por estructuras de soporte aislante resultando en un inductor que es casi lineal con respecto al voltaje aplicado. A la inversa, el circuito magnético de un reactor en derivación sumergido en aceite con núcleo de hierro es construido de una manera similar al usado por los transformadores de potencia con la excepción que un espacio de aire distribuido es introducido para proporcionar la reluctancia deseada. Ambos tipos de reactores en derivación sumergidos en aceite pueden ser construidos como unidades monofásicas o trifásicas y son similares en apariencia al transformador de potencia convencional.



Figura 1.8.3.1: Banco de tres Reactores Monofásicos de 25 MVA, 400 KV.

CAPITULO SEGUNDO.

CONSTRUCCIÓN DE TRANSFORMADORES Y REACTORES.



CAPITULO SEGUNDO.

CONSTRUCCIÓN DE TRANSFORMADORES Y REACTORES.

2.0 GENERALIDADES.

Un transformador consta de dos partes esenciales: El núcleo magnético y los devanados; los cuales, están relacionados con otros elementos destinados a las conexiones mecánicas y eléctricas entre las distintas partes al sistema de enfriamiento, al medio de transporte y a la protección de la máquina en general. El núcleo determina las características relevantes en la construcción de transformadores, dependiendo de la forma del núcleo, los transformadores se pueden clasificar en: Transformadores Tipo Columnas y en Transformadores Tipo Acorazado.

Existen otros aspectos que establecen diferencias entre estos tipos de transformadores, por ejemplo: el sistema de enfriamiento que establece la forma de disipación del calor producido en los mismos, la potencia y el voltaje para clasificar a los transformadores de potencia o de distribución, etc.

2.1 CONSTRUCCIÓN DEL NÚCLEO.

El núcleo, constituye el circuito magnético que transfiere energía de un circuito a otro y su función principal es la de conducir el flujo activo. El núcleo magnético está formado por laminaciones de acero con pequeños porcentajes de silicio (alrededor del 4%), las cuales se denominan laminaciones magnéticas, estas laminaciones tienen la propiedad de tener pérdidas relativamente bajas por efecto de histéresis y de corrientes circulantes.

Las laminaciones se colocan en la dirección del flujo magnético, de manera que los núcleos para transformadores están formados por un conjunto de laminaciones acomodadas en las formas y dimensiones requeridas. Estas laminaciones de acero al silicio en los núcleos, aumenta la resistividad del material y disminuye la magnitud de las corrientes parásitas o circulantes y en consecuencia las pérdidas por este concepto. Dichas laminaciones se saturan para valores de inducción más bajos que las laminaciones normales, tales valores van disminuyendo al aumentar el contenido de silicio.

En el caso de transformadores de gran potencia, se usan las llamadas **“laminaciones de cristal orientado”**, cuyo espesor es de algunos milímetros y contienen entre 3% y 4% de silicio, se obtienen de material laminado en caliente, después se hace el laminado en frío, dando un tratamiento térmico final a la superficie de las mismas. Este tipo de laminación, presenta mejores propiedades magnéticas que la **“laminación normal”** de acero al silicio.

2.2 DEVANADOS DE LOS TRANSFORMADORES.

Constituyen los circuitos de alimentación y carga; pueden ser de una, dos, o tres fases, por la corriente y número de espiras, pueden ser de alambre delgado, grueso o de barra. En general solo existen dos tipos de arreglo aislamiento-bobinas:

- a) **El tipo columnas:** En el cual los devanados y aislamientos están dispuestos concéntricamente rodeando al circuito magnético (núcleo) del transformador. En este tipo de transformadores se usan dos tipos de bobinas; la bobina circular concéntrica (cilíndrica, disco, espiral o helicoidal) y la rectangular.
- b) **El tipo acorazado:** En el cual el circuito magnético forma una coraza alrededor del arreglo de aislamientos y bobinas, las cuales se conocen como bobinas tipo galleta.

Existen muchas versiones y modificaciones de estos dos tipos de arreglos de bobinas y aislamientos. El ingeniero de diseño deberá aislar la o las bobinas en función de las siguientes tres partes principales:

- a) **De la o las bobinas de un devanado a otro devanado:** Comúnmente llamado aislamiento entre grupos o espacios de devanados (espacios H-L), el cual está formado por barreras de diferente tamaño y espesor de cartón comprimido (pressboard).
- b) **De la o las bobinas a tierra:** Este tipo de aislamiento aísla las bobinas del transformador a tierra y está formado por lo general de piezas de cartón comprimido de varios espesores, formas y tamaños.
- c) **Entre capas, secciones y vueltas del mismo devanado:** Este aislamiento se le llama comúnmente aislamiento de bobina, se forma principalmente de papel de alto esfuerzo dieléctrico o tiras de cartón comprimido.

La disposición de los devanados en los transformadores debe de cumplir con las dos exigencias que son contrastantes entre sí: El aislamiento y la menor dispersión del flujo. La primera requiere de la mayor separación entre devanados, en tanto que la segunda, requiere que el primario se encuentre lo más cerca posible del secundario.

En la práctica, se alcanza una solución conveniente del problema con la disposición de los devanados dentro de los siguientes tipos:

- 1.- **Disposición Concéntrico:** En este tipo, cada uno de los devanados está distribuido a lo largo de toda la columna. El devanado de baja tensión se encuentra en la parte interna (más cercana al núcleo) y aislado del núcleo y del de alta tensión, por medio de tubos aislantes (cartón baquelizado, etc.).
- 2.- **Disposición Concéntrico Doble:** El devanado de tensión más baja se divide en dos mitades dispuestas respectivamente al interior y al exterior uno de otro.

3.- Disposición Alternado: Los dos devanados están subdivididos cada uno en una cinta. Número de bobinas que están dispuestas en las columnas en forma alternada.

Desde el punto de vista de diseño, las consideraciones que orientan la disposición de los devanados, son aquellos referentes al enfriamiento, el aislamiento, a la reactancia de dispersión y a los esfuerzos mecánicos.

2.2.1 CARACTERÍSTICAS DE DISEÑO.

Los fabricantes de transformadores ahora dependen de los cálculos de computadora para determinar las fuerzas radiales y axiales que resultan de las corrientes de cortocircuito. Una selección adecuada del material y cuidadosos diseños estructurales han demostrado una mejora en la construcción de bobinas y componentes para soportar las fallas.

Las características de diseño de bobinas en transformadores tipo núcleo son:

- a) Suficientes bloques espaciadores para minimizar las tensiones emitidas al conductor.
- b) Vueltas completas (no fraccionadas).
- c) Alineamiento axial de las bobinas.
- d) Devanados uniformes.
- e) Alineamiento de los centros magnéticos del bobinado.
- f) Distribución balanceada de los amperes-vueltas entre los devanados interno y externo y la combinación de amperes-vuelta sin la sección del tap.
- g) Uso de adhesivos térmicos para restringir el movimiento del conductor.

Las características de diseño de bobinas en transformadores tipo acorazado son:

- a) Suficientes bloques espaciadores o rondanas de aislamiento entre bobinas tipo galleta para minimizar las tensiones emitidas al conductor.
- b) El uso de múltiples grupos de bobinas alta-baja para reducir la magnitud de la fuerza.
- c) Secciones del tanque bien cerradas para contener el movimiento de laminaciones de hierro y grupos de bobinas.
- d) Diseño de cuñas y soportes para sujetar la bobina.
- e) Uso de adhesivos térmicos para contener el movimiento del conductor en ubicaciones donde el bloqueo es menos efectivo.

Los reactores en derivación operan con densidades de flujo bajo y por lo tanto tienen magnitudes de fuerza mas baja actuando sobre los devanados. Estos devanados tienden a ser bobinados tipo capas o de disco.

2.2.2 FUERZAS QUE ACTÚAN SOBRE LOS DEVANADOS.

En general, todos los desbalances de los ampers-vuelta entre los devanados interior y exterior a lo largo de la longitud axial de los devanados tienden a incrementar las fuerzas axiales. Una mala alineación de los centros magnéticos entre dos bobinas causa una fuerte influencia sobre la fuerza radial y la fuerza axial. Incluso una pequeña mala alineación causa significantes fuerzas axiales.

Las fuerzas axiales que ocurren en los devanados de transformadores son el resultado del flujo cruzado, de las corrientes de falla que fluyen en los devanados y de la fuerza que resulta de la mala alineación de conductores. En los transformadores actuales, en todas las condiciones de operación, esta fuerza no es equilibrada. Como sus fuerzas no son equilibradas, los devanados tienden a moverse en una dirección axial que incrementará el desplazamiento.

2.2.2.1 DEVANADO PARA TRANSFORMADORES TIPO COLUMNA.

En las bobinas circulares, cualquier fuerza radial tiende a ser distribuida uniformemente a lo largo de la circunferencia de la bobina. (Para las bobinas formadas rectangularmente o elípticamente, las fuerzas radiales tienden a concentrarse en las “esquinas” de los arrollamientos y causan tensiones más grandes en estas regiones). Con devanados cilíndricos concéntricos, la corriente en el exterior del devanado fluye en una dirección opuesta a la corriente que fluye en el interior del devanado.

La dirección axial está orientada verticalmente y es coincidente con el núcleo de hierro, la dirección radial está orientada horizontalmente y es perpendicular al núcleo de hierro. En la dirección axial, las fuerzas son dirigidas de arriba hacia abajo de los devanados hacia el interior de su centro magnético, aproximadamente a la mitad de su longitud. Debido a que la alineación perfecta de los centros magnéticos internos y externos de los devanados es prácticamente imposible, dará como resultado fuerzas axiales. Además un tap de voltaje en una bobina causa un desplazamiento de su centro magnético. La mala alineación de los centros magnéticos del devanado crea una fuerza axial que tiende a mover el devanado, la parte superior o inferior de cualquier devanado.

Las fuerzas radiales son resistidas por las tensiones de los conductores de la bobina y en algunos casos, los conductos de los devanados. Las tensiones en los conductores están en función de las distancias entre los separadores axiales.

La fuerza axial es resistida por la rigidez de los separadores radiales y las barras de fuerza de los conductores. Los grupos de conductores constan de conductores transpuestos, continuamente tienden a ser menos estable bajo compresión de fuerzas axiales. Los adhesivos térmicos son utilizados para unir a los conductores individuales en grupos rectangulares rígidos. Las fuerzas axiales son resistidas por las abrazaderas de lámina, marcos finales, barras atadas, espaciadores radiales rígidos y barras de fuerza inherentes al conductor.

Figura 2.2.2.1: Fuerzas que actúan sobre los devanados de HV y LV de un transformador monofásico tipo columna bajo condiciones de falla.

2.2.2.2 DEVANADO PARA TRANSFORMADORES TIPO ACORAZADO.

Este tipo de devanado consta de conductores aislados bobinados alrededor de una tabla plana de forma rectangular sobre la mesa. La primera vuelta, que podría estar constituido por muchos conductores en paralelo ó alambres constantemente transpuestos, tiene un pequeño radio de curvatura en las esquinas del rectángulo. Los collares aislantes son utilizados para ayudar a constituir las esquinas, lo que facilita doblar los conductores alrededor de las esquinas. Para construir un grupo de bobinas, las bobinas con números pares son devanadas en dirección opuesta a las bobinas de números impares. Este procedimiento da como resultado fuerzas de atracción entre los devanados individuales tipo galleta. Las rondanas de aislamiento y los bloques espaciadores rígidos separan las bobinas adyacentes y restringen las fuerzas de compresión durante el cortocircuito. Además permiten fluir el aceite sobre la superficie de los devanados proporcionando protección bobina a bobina.

Las bobinas tipo galleta tienen alta capacitancia serie. Esta bobina es montada verticalmente en el transformador y depende de las bobinas adyacentes, los bloques espaciadores rígidos, de la fricción de la laminación del núcleo y una forma adecuada del tanque para soportar las fuerzas mecánicas. Las conexiones eléctricas exteriores de la bobina tipo galleta son hechas sobre un par de bobinas y las conexiones interiores son hechas sobre el próximo par de bobinas.

Figura 2.2.2.7: Fuerzas que actúan sobre un devanado tipo acorazado durante condiciones de falla.

2.3 TRANSFORMADOR TIPO COLUMNA (CORE).

En esta construcción, el núcleo proporciona un solo circuito magnético formado por un yugo superior y dos o tres columnas verticales o piernas para una o tres fases respectivamente. Los devanados son ensamblados concéntricamente en cada una de las columnas o piernas del núcleo. De esta manera, el circuito eléctrico envuelve al circuito magnético principal.

Figura 2.3: Corte del núcleo y bobina de un transformador trifásico.

Debido a que las bobinas se deben montar bajo un cierto procedimiento y desmontar cuando sea necesario por trabajos de mantenimiento. Los núcleos se arman con juegos de laminaciones para columnas y yugos que se arman por capas de arreglos “**pares**” e “**impares**”. Cuando se emplean laminaciones de cristal orientado, es necesario que las uniones entre yugos y columnas se realicen con cortes inclinados para evitar trayectorias transversales de las líneas de flujo respecto a tales direcciones (ver figura 2.3a).

Figura 2.3a: Denominación de las partes fundamentales del núcleo.

Después de que se han armado los niveles a base de juegos de laminaciones, el núcleo se sujeta con tornillos opresores y separado por medio de tornillos tensores. Estos tornillos se aíslan con tubos de papel, cartón o baquelita y se sujetan a las tuercas con rondanas aislantes.

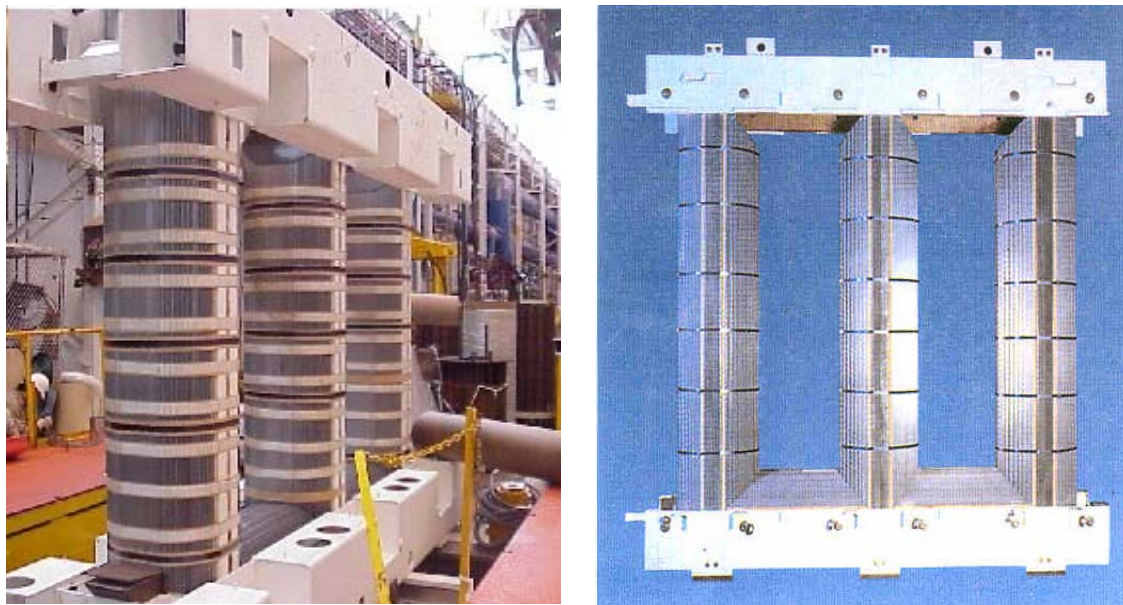


Figura 2.3b: Núcleo de Transformadores Tipo Columna (Circuito Magnético).

Las secciones de las columnas determinan las secciones de los núcleos. Por razones de tipo económico y también para equilibrar los esfuerzos electrodinámicos que se pueden presentar entre los conductores, los devanados se construyen en forma circular. Esto requiere que las columnas del núcleo deben tener sección circular. Debido a que esta condición prácticamente no es realizable, se busca aproximarse haciendo la sección de la columna en escalones.

En transformadores grandes, se hacen las columnas con un número elevado de escalones con el objeto de obtener un mayor “**factor de utilización geométrica**” de la sección. A mayor capacidad del transformador, mayor es el número de escalones. Para transformadores pequeños se pueden usar la sección cuadrada ó cruciforme (sección en cruz). Como los yugos, no están vinculados con los devanados, pueden ser rectangulares, aunque también pueden tener escalones para mejorar el enfriamiento.

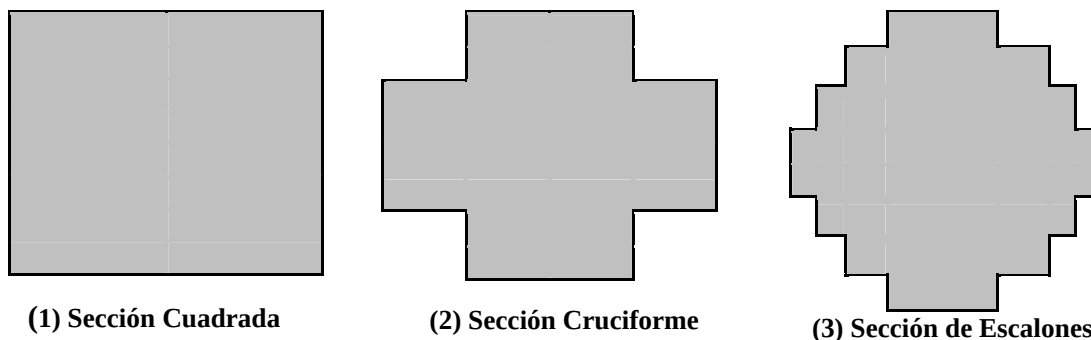
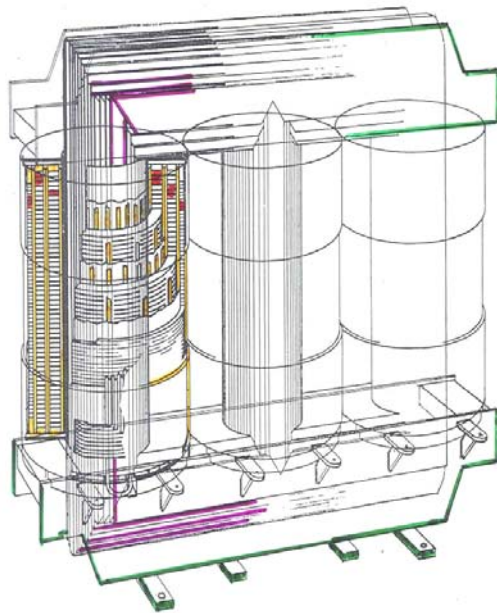
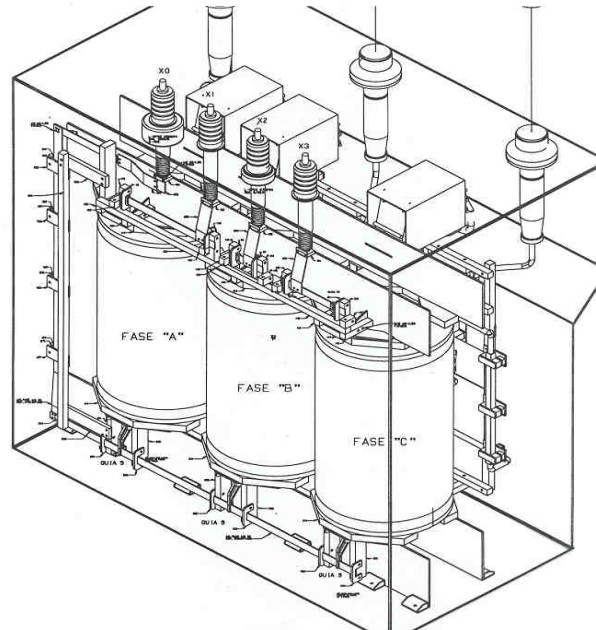


Figura 2.3c: Formas de las secciones de las columnas.

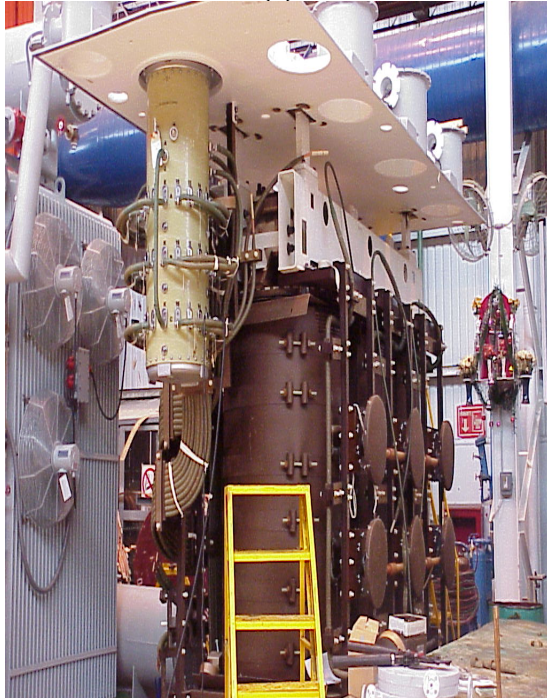
En este tipo de transformador, las bobinas se colocan alrededor del núcleo en forma concéntrica, colocando primero las bobinas de más bajo voltaje (debido a que se requiere menor cantidad de aislamiento) y después las de alto voltaje. Estos núcleos se arman por medio de laminaciones que se colocan en capas sucesivas.



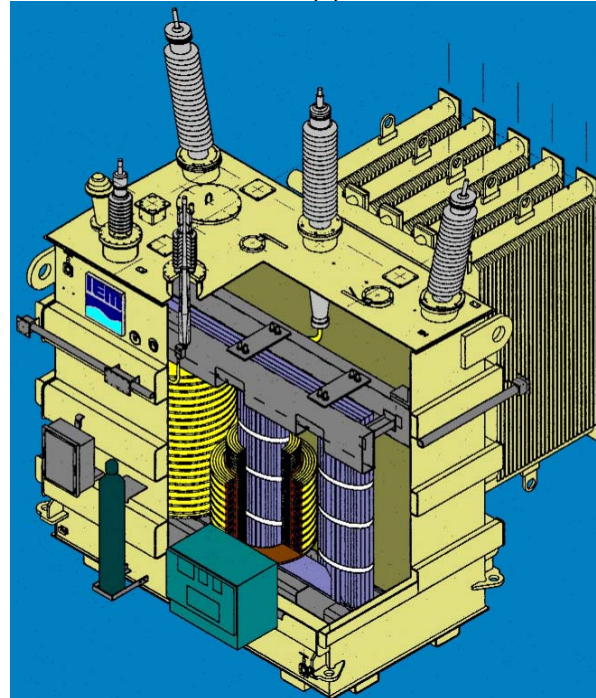
(1)



(2)



(3)



(4)

Figura 2.3d: Vistas del transformador tipo columnas.

2.3.1 DISEÑO POR COMPUTADORA.

La construcción de los transformadores tipo columna ha sido adaptado a las técnicas computacionales, esto ha hecho posible optimizar sus diseños con un grado de sofisticación muy elevado.

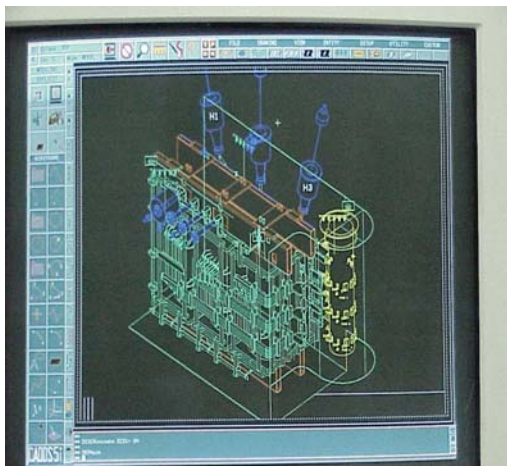


Figura 2.3.1: Diseño por computadora.

Los primeros programas de computación para transformadores de potencia fueron diseñados y automatizados para simular el proceso de diseño utilizando la técnica de aproximación por prueba y error. Iniciando con valores aproximados y ciertas suposiciones basadas en datos empíricos de diseños previos⁰ y repitiendo las sub-rutinas, se obtenía la convergencia del programa. En los recientes años, se han desarrollado métodos para la optimización de costos, pérdidas, tamaño, eficiencia y otras características del transformador. El uso de las técnicas computacionales permite realizar estas tareas en tiempos muy pequeños y con resultados muy favorables.

2.3.2 COMPORTAMIENTO MECÁNICO.

Las bobinas de los transformadores deben permanecer rígidas durante toda la vida útil de la unidad para soportar las repetidas condiciones de cortocircuito, las cuales son típicas cuando el sistema opera en campo; estas corrientes generan grandes fuerzas verticales en los devanados.

Esta rigidez se logra con el uso de cartón prensado (pressboard) de alta densidad, y por medio de la pretensión mecánica de los devanados, durante el ensamble, obteniendo con ello una fuerza igual a la experimentada bajo condiciones de cortocircuito.

2.3.3 COMPORTAMIENTO TÉRMICO.

Reduciendo el área de los conductores de las bobinas se reducirá el tamaño, peso y costo; aunque las pérdidas se incrementarán y se requerirán de bancos de radiadores que repercutirán en el costo del equipo. El balance apropiado se alcanza por medio de la utilización de un programa de computadora para realizar un cálculo preciso de la distribución de temperatura dentro de las bobinas.

2.3.4 COMPORTAMIENTO QUÍMICO.

Un apropiado balance entre los iones de Hidrógeno y los radicales de hidroxilo es un factor de suma importancia para asegurar una larga vida de los aislamientos. Los materiales aislantes tratados con el proceso de secado y combinados con los sistemas de preservación de aceite (tanque sellado con gas inerte y tanque conservador con membrana elástica) ayudan a preservar el transformador.

2.3.5 COMPORTAMIENTO DIELECTRICO.

Un extensivo uso de barreras de cartón prensado (pressboard) y un perfecto conocimiento de las distribuciones internas de campo eléctrico permiten obtener diseños con valores muy bajos de descargas parciales (PD). El aceite dieléctrico tiene una mayor rigidez dieléctrica (KV/mm) en un ducto pequeño que en un ducto de gran tamaño. Un diseño balanceado, de tal forma que se tengan ductos pequeños en las zonas donde los esfuerzos eléctricos son críticos (partes vivas a tierra, etc.). El resultado es una máxima capacidad de rigidez dieléctrica en un mínimo de espacio

Un diseño balanceado de bobinas requiere que éstas tengan un valor bajo de capacitancia a tierra y un alto valor de capacitancia serie, con el fin de que la distribución inicial de impulso sea muy similar a la distribución final.

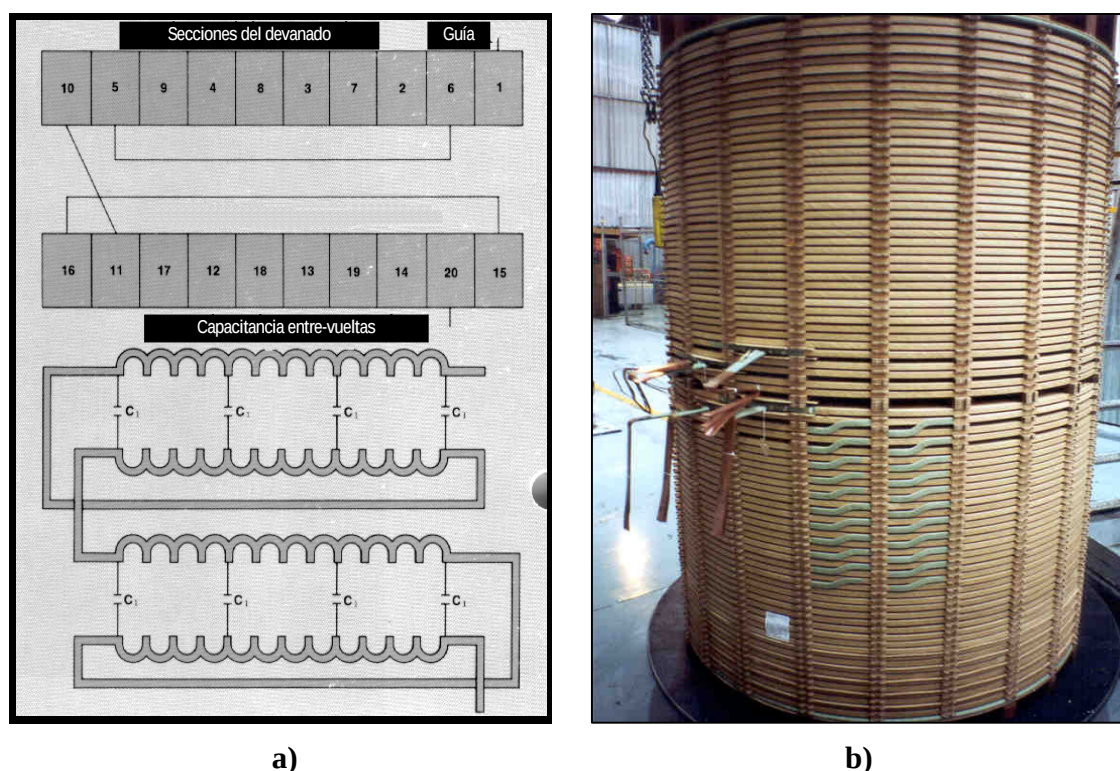


Figura 2.3.5: a) Bobina tipo disco entrelazado, b) Bobina tipo disco con blindajes internos.

Para conseguir esto se utilizan básicamente dos tipos de bobinas: Tipo Disco Entrelazado y Tipo Disco con Blindajes Internos (Ver fig. 2.3.5). En el tipo disco entrelazado; por medio de entrelazar las vueltas del devanado se logra que las capacitancias entre vueltas queden en paralelo, lo cuál provoca que se tenga una gran capacitancia en serie.

En el tipo disco con blindajes internos, por medio de la colocación de conductores flotantes entre las vueltas del devanado, se consigue elevar el valor de la capacitancia serie de la bobina, logrando con esto que la distribución de impulso sea más uniforme.

2.4 TRANSFORMADOR TIPO ACORAZADO (SHELL).

Los transformadores tipo acorazado tienen una construcción básica en la cual los devanados primario y secundario se encuentran rodeados por el circuito magnético. Estos ensambles de núcleo-bobinas son colocados dentro de un tanque ajustado en forma; proporcionando una unidad de gran resistencia.

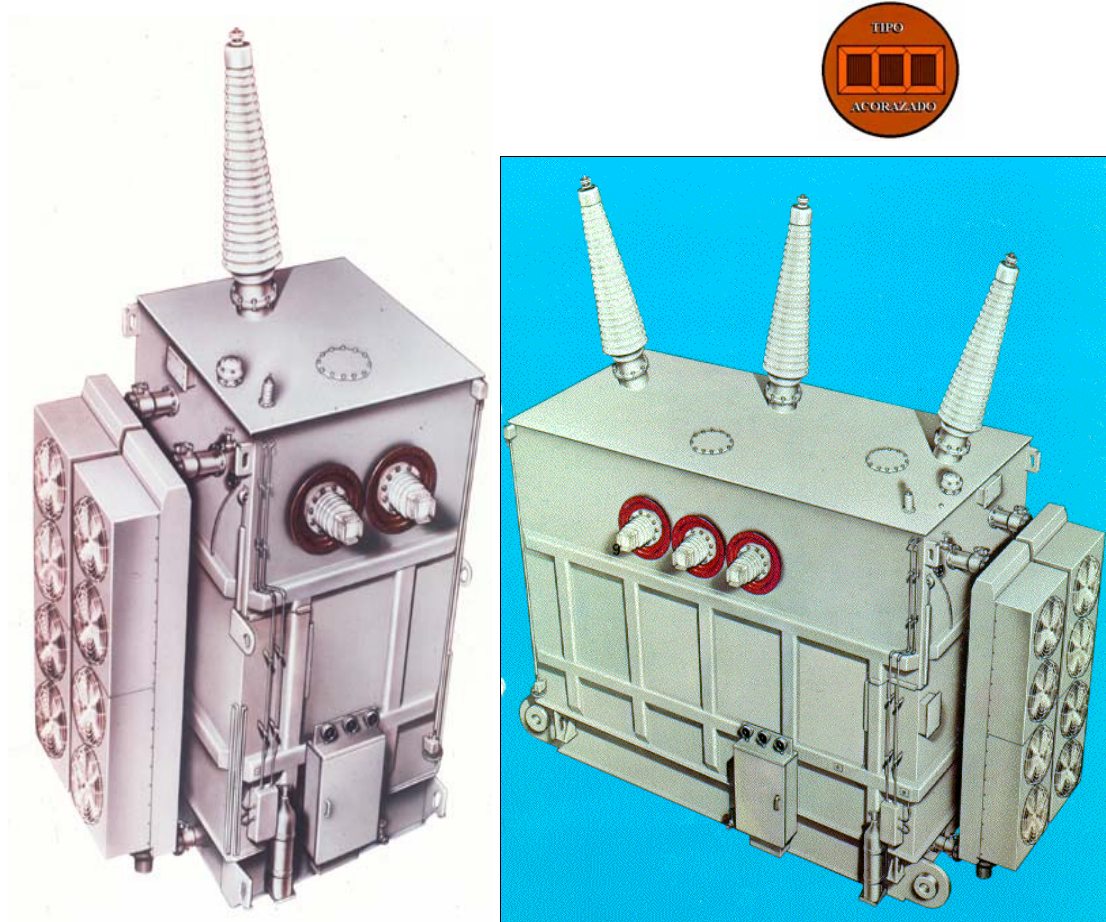


Figura 2.4: Transformador Tipo Acorazado

2.4.1 CARACTERÍSTICAS DE DISEÑO.

Los diseños tipo acorazado son realizados con devanados rectangulares tipo galleta interconectadas en serie. Los devanados y el paquete de aislamientos son montados verticalmente en la sección inferior del tanque.

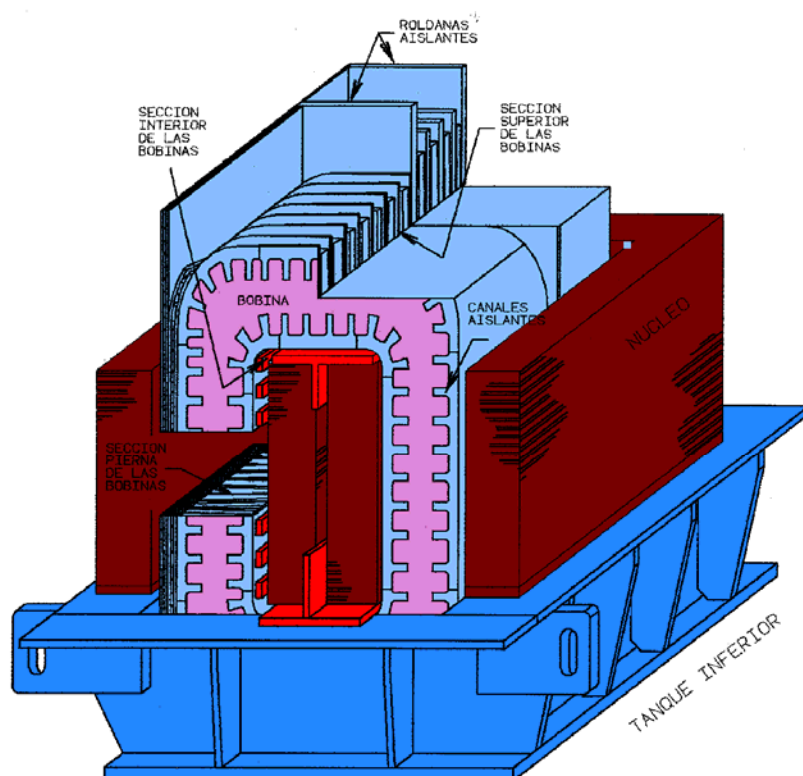


Figura 2.4.1: Ensamble Núcleo-Bobinas de un Transformador tipo

El núcleo es posicionado verticalmente alrededor de los devanados actuando como un soporte de los mismos. La sección superior del tanque se ajusta de tal forma que la unidad ensamblada tenga un soporte mecánico para los devanados.

El calor generado por el núcleo y las bobinas es disipado por la circulación de aceite. El flujo de aceite desde la parte interior hasta la superior se mantiene gracias a la diferencia de gradiente de temperatura. La adición de bombas y ventiladores para enfriamiento forzado incrementa el flujo de aceite a través del núcleo y las bobinas y el flujo de aire a través de los radiadores externos. En cualquier paso de enfriamiento el aceite circula por los radiadores donde es enfriado antes de volver a entrar por la parte inferior del tanque.

El ensamble de aislamientos consiste en barreras de cartón prensado (pressboard) de alto valor de rigidez dieléctrica y ductos de aceite colocados estratégicamente y diseñados para controlar las concentraciones de esfuerzos dieléctricos.

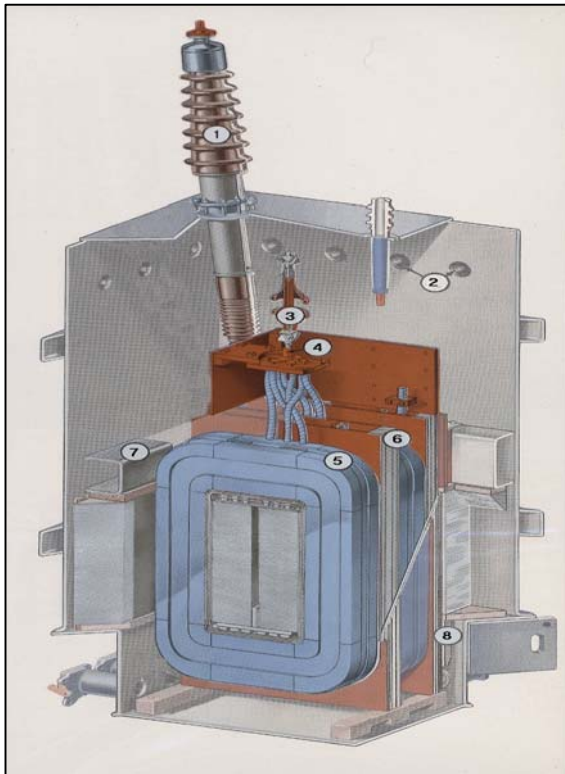


Figura 2.4.1a: Corte Transformador monofásico tipo Acorazado.

1. Boquilla de Alta Tensión.
2. Ductos de Conexión para Radiadores
- 3.- Flecha del Mecanismo del Cambiador de Derivaciones
4. Cambiador de Derivaciones
5. Bobinas de Alta Tensión
6. Bobinas de Baja Tensión
7. Refuerzos del Tanque
8. Acuñaamiento entre Grupo de Bobinas y Pared del Tanque

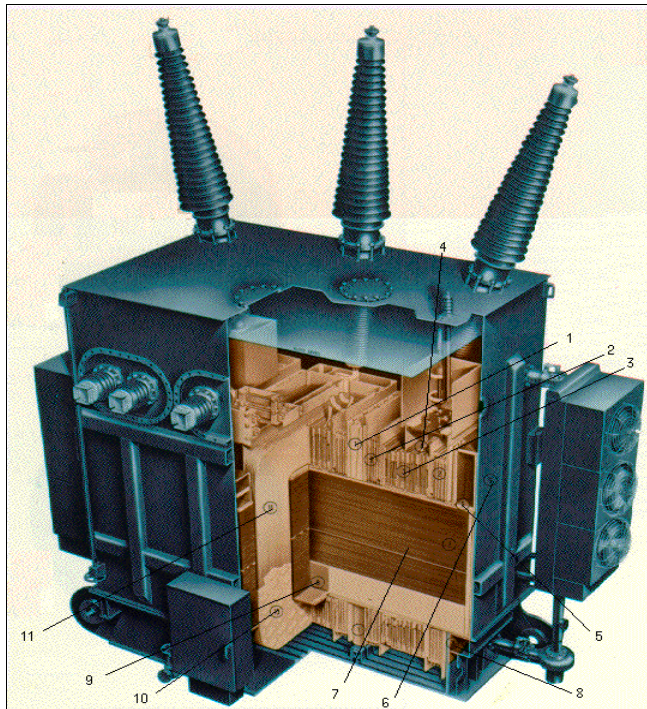


Figura 2.4.1b: Corte Transformador Trifásico tipo Acorazado.

1. Acuñaamiento Entre Fases
2. Grupo de bobinas de Baja Tensión (LV)
3. Grupo de bobinas de Alta Tensión (HV)
4. Guías de los TAPs de Alta Tensión
5. Refuerzos Superiores del Tanque y Soportes de Núcleo y Bobinas
6. Pared del Tanque
7. Núcleo
8. Refuerzos Inferiores del Tanque y Soportes de Núcleo y Bobinas
9. Viga T inferior para Soporte de Núcleo y bobinas.
10. Rondanas Aislantes
11. Bobina Tipo Galleta

2.4.2 COMPORTAMIENTO MECÁNICO.

Las bobinas tipo galleta son ensambladas dentro de grupos de bobinas con sus caras adyacentes cubiertas por rondanas planas de pressboard, las cuales tienen bloques espaciadores en su superficie.

La fase completa es colocada verticalmente sobre el fondo del tanque y el núcleo es apilado alrededor de esta. La sección superior del tanque se ajusta sobre el núcleo y se calza con cuñas de madera verticales, espaciados alrededor de la superficie del núcleo.

Las fuerzas entre grupos consecutivos de bobinas en un transformador tipo acorazado son en direcciones contrarias y cuando se presentan en los devanados tienden a cancelarse.

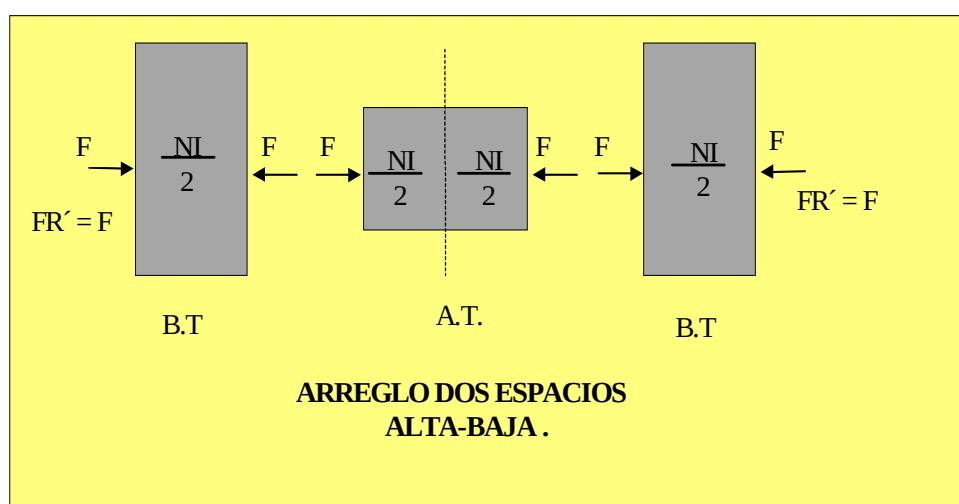


Figura 2.4.2: Sección de un devanado tipo Acorazado con una configuración de dos bobinas Alta-Baja (Las flechas indican las fuerzas mecánicas)

La fuerza total entre los grupos de bobinas varía con el cuadrado de los Amperes-vuelta por grupo. Si la corriente durante condiciones de falla es 10 veces la corriente normal de operación, las fuerzas de cortocircuito serán 100 veces más grandes que las fuerzas en los devanados bajo condiciones normales de operación.

Cuando se colocan derivaciones en los devanados, los centros eléctricos pueden llegar a desplazarse, provocando una fuerza que tratará de separar los dos devanados. Estas fuerzas son absorbidas por las rondanas de cartón aislante y restringidas por medio de resistentes bastidores colocados sobre las paredes del tanque. Cualquier componente vertical de ésta fuerza es absorbida por los miembros aislantes y el núcleo.

La magnitud total de la fuerza en un diseño tipo acorazado puede reducirse con múltiples arreglos de las bobinas de alta y baja.

En los transformadores tipo acorazado la componente principal de la fuerza es llevada por estructuras de soporte completamente exteriores al devanado. Los tanques ajustados en forma y el ensamble del núcleo, se combinan para restringir las fuerzas en la mayor parte del devanado. Arriba y abajo del núcleo, se sueldan resistentes bastidores de acero para proporcionar soporte a las demás partes del devanado. Las estructuras de soporte mecánico son externas a los devanados y pueden ser reforzados sin alterar el diseño de la bobina.

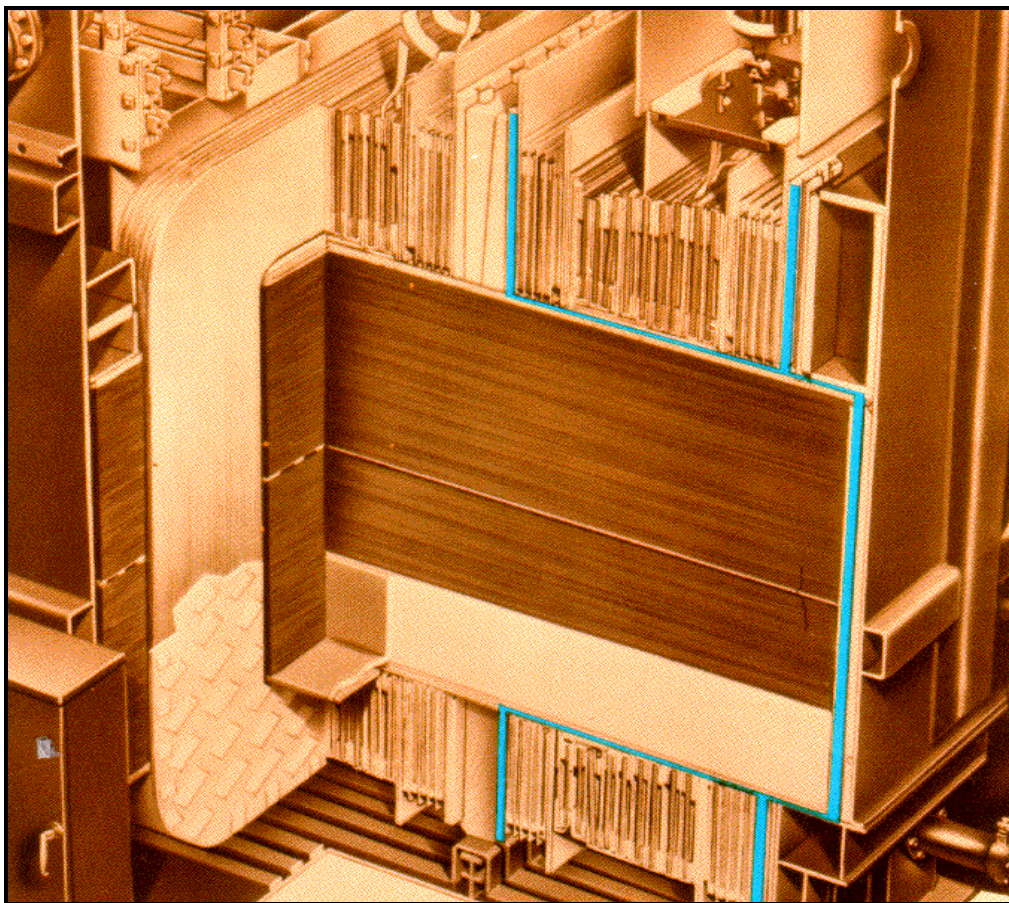


Figura 2.4.2a: Corte de un Transformador Tipo Acorazado donde se observan las estructuras de soporte mecánico (líneas azules) para el núcleo y las bobinas.

2.4.3 COMPORTAMIENTO TÉRMICO.

Durante la operación normal del transformador existen pérdidas de energía en el núcleo y las bobinas. Esta energía se manifiesta en forma de calor, el cual se incrementa con el cuadrado de la corriente de carga y deberá ser disipado para prevenir un deterioro en los aislamientos. El aceite dentro del transformador sirve como medio para transmitir esta energía desde el núcleo y las bobinas hacia los intercambiadores de calor donde será disipado a la atmósfera.

Las bobinas de alta y baja tensión, son colocadas verticalmente en el tanque y las rondanas pressboard con sus espaciadores colocados de acuerdo a un patrón prediseñado, son localizados en ambos lados de cada bobina. Estos espaciadores proporcionan ductos en ambos lados del conductor a través de los cuales circula aceite desde la parte inferior hasta la superior del tanque. El núcleo es una pila de laminaciones de acero magnético. El aceite fluye por ambos lados del núcleo enfriando adecuadamente esta área, sin necesidad de tener ductos de aceite dentro del circuito magnético.

El flujo de aceite dentro del tanque del transformador durante la operación de autoenfriamiento (OA) es soportado por la diferencia de temperatura del aceite entre la parte inferior y la superior del tanque. Este diferencial de temperatura o cabeza térmica, es aproximadamente 12°C.

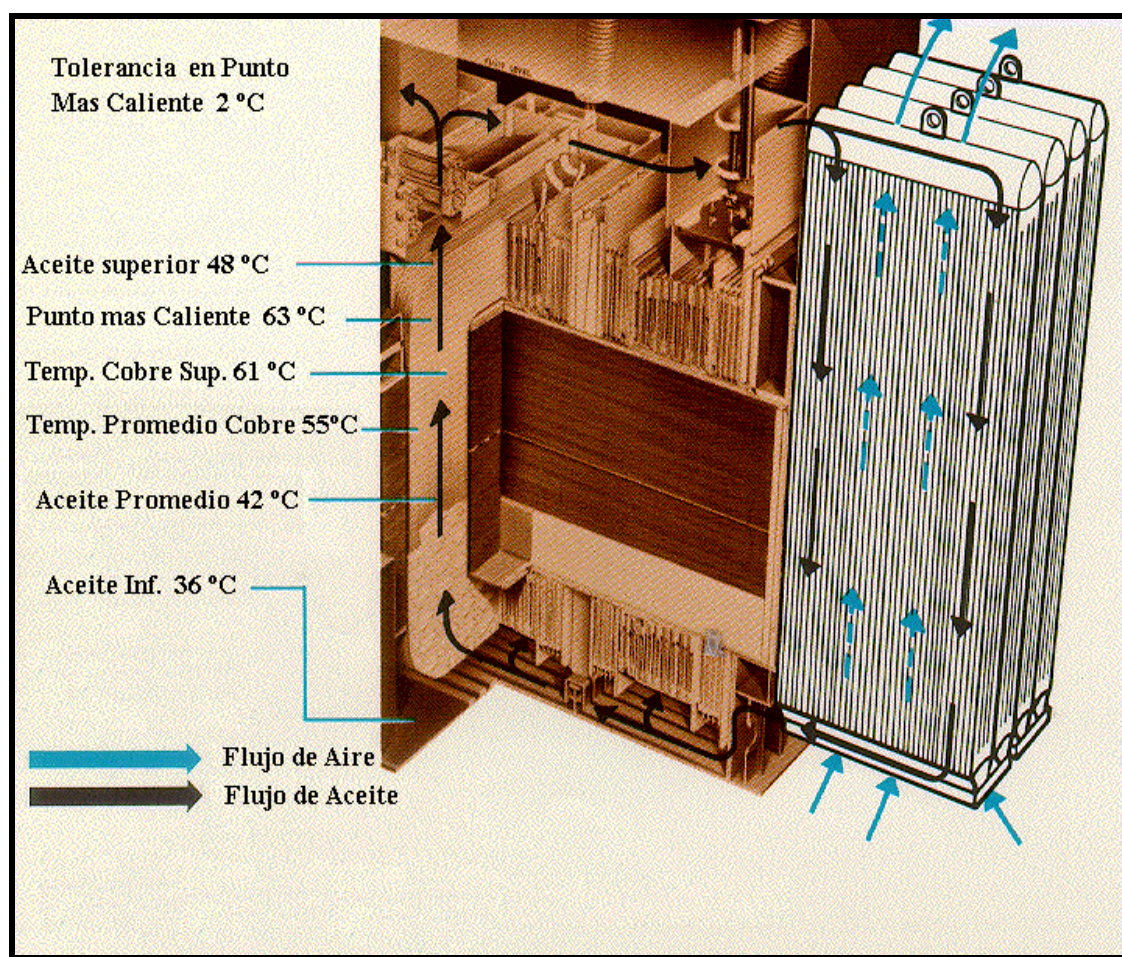


Figura 2.4.3: Corte de un Transformador Tipo Acorazado Ilustrando la Acción de Autoenfriamiento (OA). Todos los datos mostrados son Elevaciones de Temperatura.

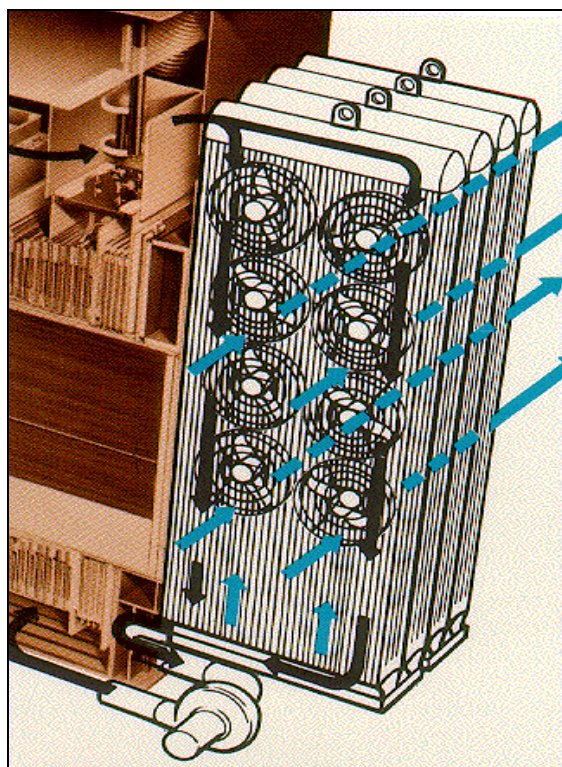


Figura 2.4.3a: Corte de un Transformador Tipo Acorazado Ilustrando la acción de Enfriamiento Forzado (FOA).

Conforme la carga del transformador aumenta, la energía generada por las pérdidas en las bobinas aumenta en proporción al cuadrado de la corriente de carga. Un sistema de enfriamiento forzado a través de bombas y ventiladores se utiliza para disipar esta energía adicional y permitir que el transformador continúe funcionando con este incremento de carga dentro de los límites de temperatura garantizados.

Las bombas aumentan la circulación de aceite que fluye debido a la cabeza térmica. Este flujo de aceite adicional elimina las diferencias de temperatura superior-inferior reduciendo los puntos calientes de los devanados del transformador hasta un máximo de 10°C. Los ventiladores dirigen el flujo de aire sobre los intercambiadores o radiadores de calor a alta velocidad, mejorando la transferencia de calor hacia la atmósfera.

2.4.4 CARACTERÍSTICAS DIELECTRICAS.

El efecto de sobrevoltajes producidos por transitorios en el sistema, sobre los devanados del transformador, están determinados por las características particulares de cada bobina y su sistema de aislamiento. Con respecto a la entrada de ondas de voltaje a los devanados del transformador, la distribución inicial de voltaje estará determinada por las redes de capacitancias formadas por las bobinas y los devanados.

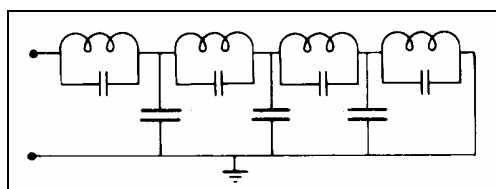


Figura 2.4.4: Circuito Equivalente de la red de Inductancias y Capacitancias de una sección de un devanado Tipo Acorazado.

Conforme la onda se propaga dentro de los devanados, pueden generarse oscilaciones que para ciertos diseños pueden ser amplificadas debido a las frecuencias naturales del sistema del sistema bobinas-aislamientos, hasta valores mayores que su valor de cresta inicial.

Esta condición de sobrevoltaje puede concentrarse en algún punto del devanado, tal como las primeras vueltas del mismo o alrededor de una sección de derivación y esforzar el aislamiento entre vueltas en estas áreas.

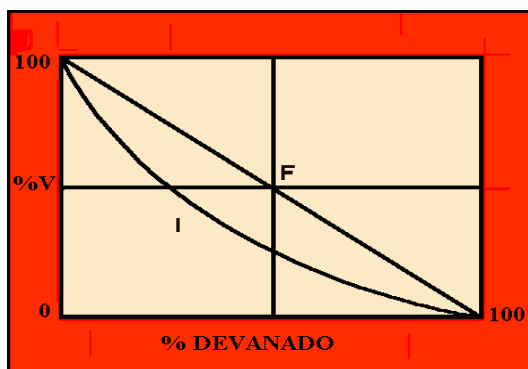


Figura 2.4.4a: Curva de Distribución Inicial de Voltaje de un devanado Tipo Acorazado bajo una onda de impulso. I es la condición actual y F la ideal.

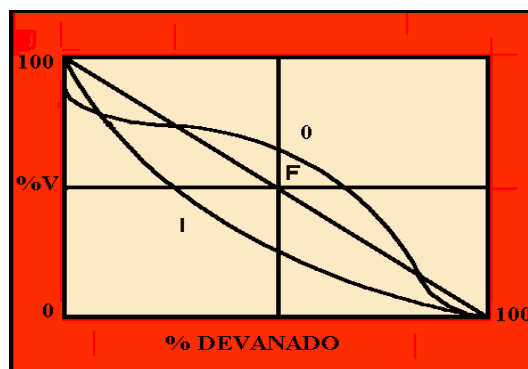


Figura 2.4.4b: Distribución de una onda de impulso en una sección de un devanado Tipo Acorazado, en donde se ilustran las oscilaciones transitorias.

El ensamble de bobinas en los diseños Acorazado consiste en bobinas tipo galleta con una ancha sección transversal y con una angosta orilla de bobina. Como las capacitancias entre bobinas y de bobina a tierra son directamente proporcionales al área de la sección transversal de la bobina y al área de su orilla respectivamente, el diseño tipo acorazado presenta un alto valor de capacitancia entre bobinas (capacitancia serie) y un bajo valor entre bobinas y tierra (capacitancia a tierra, ver fig. 2.4.4c). Cuando la relación de capacitancia entre bobinas y de bobinas a tierra es alta la distribución de sobrevoltajes con ondas de elevación rápida es mas uniforme. Por lo tanto, el esfuerzo entre vueltas debido a la aplicación inicial de ondas de sobrevoltaje es de un valor pequeño, reduciendo las oscilaciones generadas en el devanado. La gran capacitancia de este tipo de transformadores provoca que los períodos de oscilación natural del devanado sean relativamente largos, permitiendo que las ondas de sobrevoltaje decaigan hasta un valor bajo antes de que la oscilación del devanado tenga un magnitud significativa.

Las estructuras aislantes entre las bobinas, entre bobinas y núcleo y entre grupos de bobinas son hechas de barreras de cartón aislante impregnado de alto valor de rigidez dieléctrica. Los espacios de aceite son diseñados guardando relaciones precisas con respecto a las bobinas y las estructuras de cartón aislante para controlar las concentraciones de esfuerzos.

Las bobinas tipo galleta en los transformadores tipo acorazado son arregladas de tal forma que en la parte superior del transformador se encuentran las conexiones de las derivaciones, realizando estas con guías cortas.

Por lo tanto la magnitud de las corrientes circulantes inducidas es mínima debido al corto tamaño de las guías y su única construcción subdividida.

Estas características inherentes de los transformadores tipo acorazado dan un excelente comportamiento dieléctrico.

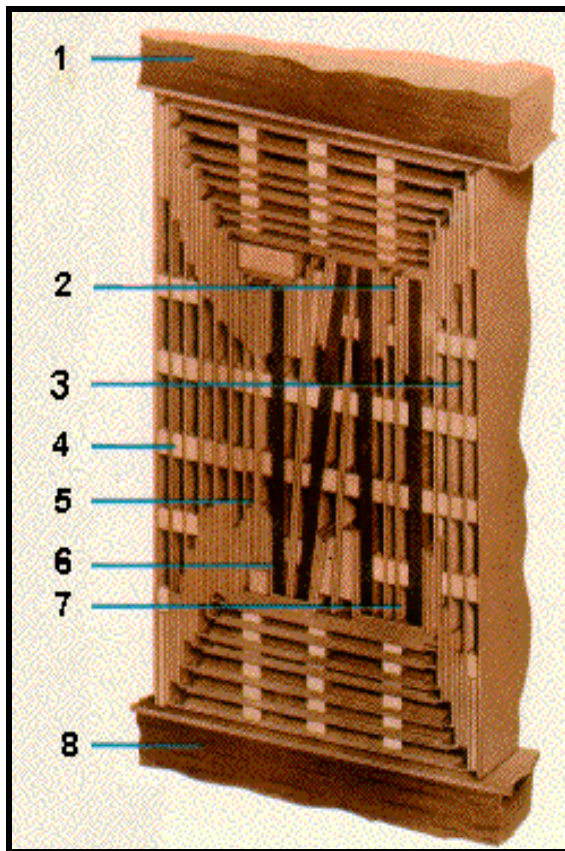
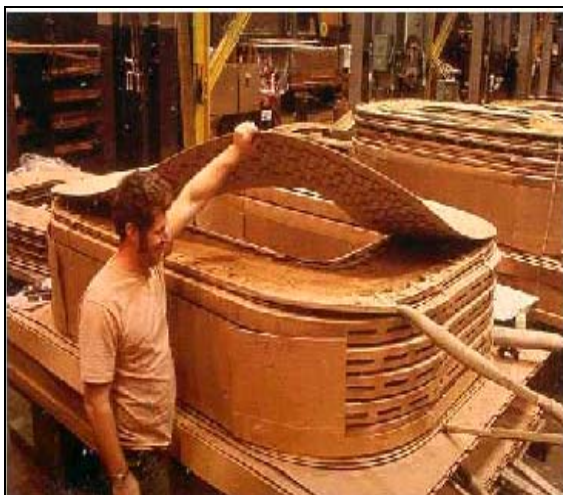


Figura 2.4.4c: Sección Transversal de un Transformador Tipo Acorazado

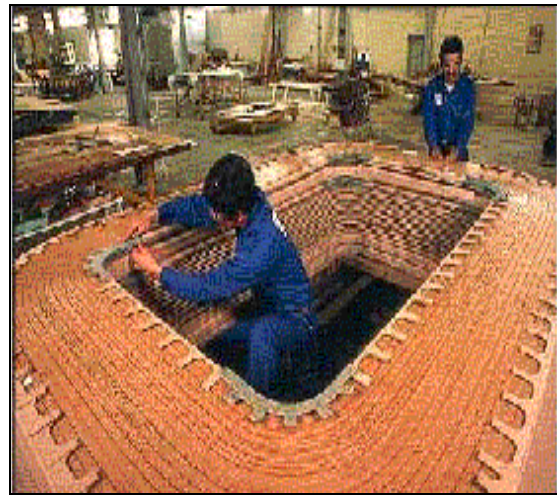


(1)

- 1. Núcleo
- 2. Canales de cartón aislante (Pressboard)
- 3. Roldana Aislante de cartón aislante (Pressboard)
- 4. Espaciadores de Pressboard
- 5. Blindajes Estáticos
- 6. Bobinas
- 7. Ductos de Aceite
- 8. Núcleo



(2)



(3)

Figura 2.4.4d: (1.2.3) Armado de Bobinas que forman el circuito eléctrico del transformador Tipo Acorazado (bobina tipo galleta).

2.5 COMPARACIÓN TÉCNICA ENTRE UN TRANSFORMADOR TIPO COLUMNAS Y OTRO TIPO ACORAZADO.

	DISEÑO TIPO COLUMNAS	DISEÑO TIPO ACORAZADO.
1	Menor Volts / Vuelta	Mayor Volts / Vuelta
2	Mayor número de vueltas	Menor número de vueltas
3	Las bobinas están más cerca de la pared del tanque, por lo cual se requiere una distancia muy grande entre bobinas y tanque.	El núcleo está más cerca de la pared del tanque, por lo cual se requiere una distancia muy pequeña entre núcleo y tanque.
4	La disposición de los cambiadores de derivaciones en las tres fases se montan a un lado de las bobinas, por consiguiente, las guías de los "Taps" son relativamente cortas.	La posición de los cambiadores de derivaciones en las tres fases se encuentra en la parte superior de las fases, lo cual implica guías de Taps largas.
5	Cuando se extrae del tanque la unidad, las bobinas son visibles para su inspección.	Cuando se desentanca la unidad, sólo la parte superior de las bobinas se puede inspeccionar
6	El número de grupos alta-baja (espacios H-L) está limitado.	Diseño bastante flexible para formar varios grupos alta-baja.
7	Las bobinas de alta tensión se devanan continuamente lo cual minimiza las soldaduras para conectar bobina a bobina.	Cada bobina se devana separadamente por lo cual se requieren más soldaduras entre bobinas.
8	Solo una pequeña parte del núcleo soporta el ensamble de bobinas.	Una gran parte de las bobinas es soportada por la estructura aislante y el núcleo.
9	Se requiere de ductos especiales y barreras para dirigir el flujo de aceite y asegurar un buen enfriamiento.	Las bobinas están dispuestas verticalmente lo cual permite un eficiente flujo de aceite en ambas caras de las mismas.

2.5.1 CAPACIDAD PARA RESISTIR UNA FALLA.

DISEÑO TIPO COLUMNAS.	DISEÑO TIPO ACORAZADO
Las fuerzas creadas por las corrientes de falla tienden a separar los devanados cilíndricos, forzando el devanado de A.T. o el que se encuentre más hacia fuera de las piernas del núcleo y comprimiendo el devanado interior. Cualquier desbalanceo entre centros eléctricos tiende a desplazar verticalmente ambos devanados. Las bobinas están soportadas por anillos de presión devanados en ambos extremos los cuales a su vez están sobre los bastidores, manteniendo sujeto al conjunto de bobinas por medio de las placas.	La fuerza total entre los grupos de devanados alta y baja durante condiciones de falla, varía con el cuadrado de los amperes vuelta por grupo. Los amperes vuelta por grupo de devanado se pueden reducir incrementando los espacios alta-baja. Las fuerzas que existen entre dichos grupos (H-L) de devanado están en direcciones opuestas y tienden a cancelarse unas a otras. Además de esto, para controlar la magnitud de la fuerza total, los grupos de aislamientos y bobinas están soportados con estructuras de acero alrededor del núcleo y bobina.

2.6 REACTORES EN DERIVACIÓN (SHUNT REACTOR).

Los reactores en derivación, son dispositivos relativamente simples los cuales son contruidos básicamente en dos diferentes configuraciones: Una de las cuales es el tipo acorazado y la otra es el tipo columnas.

2.6.1 REACTORES EN DERIVACIÓN TIPO COLUMNA.

Los reactores en derivación tipo columna externamente son como un transformador, pero internamente son contruidos con un núcleo con entre-hierros de material no magnético de alta densidad y un solo devanado continuo de solera de cobre, forradas con papel térmicamente estable (papel kraft). Estos entre-hierros permiten linealizar el comportamiento del reactor para una efectiva compensación de potencia reactiva en los sistemas de potencia.

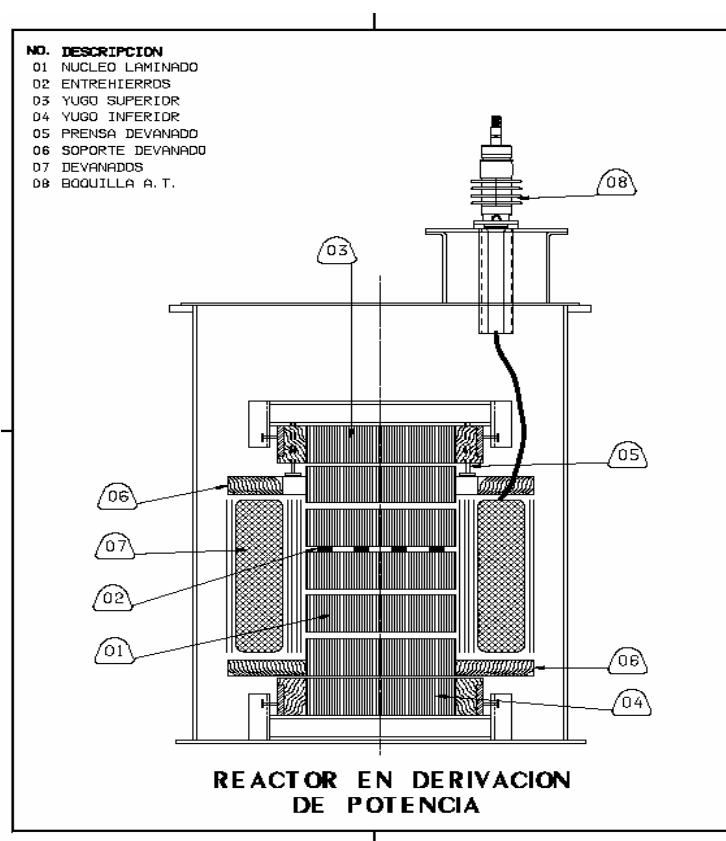


Fig. 2.6.1: Construcción básica de Reactores tipo Columna para bajo Voltaje, con núcleo con entrehierros.

En la configuración tipo columnas, los entrehierros son diseñados para almacenar mas del 80% de la energía magnética, permitiendo que la inducción en el núcleo alcance valores cercanos a los niveles de saturación del material magnético.

El ensamble núcleo-bobinas de los reactores tipo columna con bobinas circulares, es cuidadosamente prensado para minimizar la vibración debida a las fuerzas magnéticas entre los entrehierros y como consecuencia minimizar los niveles de ruido producidos.

La estructura soporte, sujeta al núcleo y bobinas firmemente para formar un ensamble compacto y rígido que cumpla plenamente los requerimientos operacionales (figura 2.6.1.1c).

2.6.1.1 CARACTERÍSTICAS.

La construcción tipo columna ofrece las siguientes características:

- 1.- Tienen todas las ventajas mecánicas, térmicas y dieléctricas desarrolladas para los transformadores tipo columnas con bobinas circulares.
- 2.- El uso de núcleos magnéticos con entre-hierros de material no magnético de alta densidad, permite que el reactor tenga dos valores de reactancia, dependiendo de los niveles de saturación del mismo. La relación típica es de 4:1.
- 3.- El uso de núcleos con entre-hierros, permite que la densidad de flujo magnético pueda manejarse muy cerca de la saturación del material, disminuyendo de ésta forma las dimensiones físicas del reactor. En voltajes de 115 KV y mayores, se recomienda para esta aplicación la construcción tipo acorazado, debido a su mejor comportamiento mecánico, eléctrico y térmico en éstas tensiones.

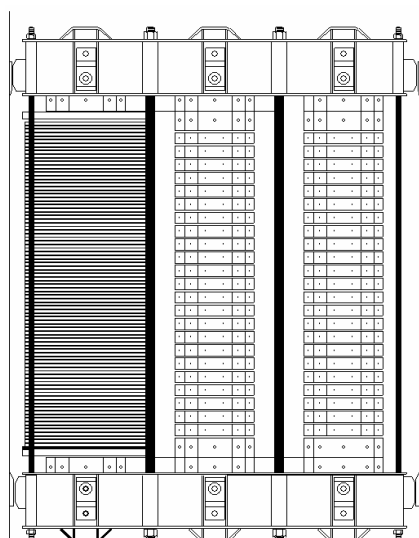


Fig. 2.6.1.1a: Vista del reactor en derivación con devanados tipo circular y núcleo con entre-hierros.

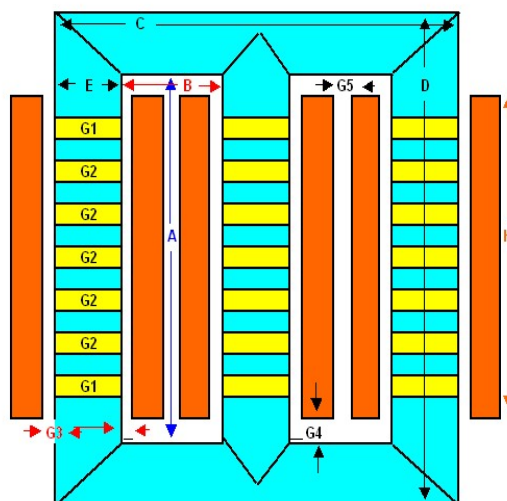


Fig. 2.6.1.1b: Esquema de diseño de un Reactor Tipo Columnas Trifásico.

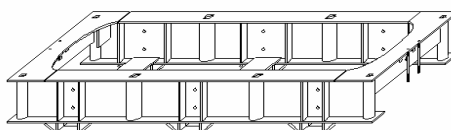
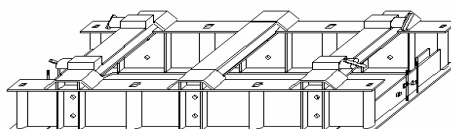


Fig. 2.6.1.1c: Sistema de sujeción del ensamble núcleo-bobinas.

2.6.2 REACTORES EN DERIVACIÓN TIPO ACORAZADO.

Los reactores en derivación tipo acorazado, son construidos utilizando la constitución básica de núcleo de aire con algunas modificaciones importantes.

Primeramente se utiliza aceite y aislamientos impregnados de aceite en los niveles de alto voltaje, de tal forma que nuestro núcleo de aire es realmente aceite y relleno aislante. En segundo lugar, se requiere de un tanque para contener el aceite y algunos medios para prevenir que los campos magnéticos generen puntos calientes en el tanque. Esto se lleva a cabo envolviendo la estructura de las bobinas con un blindaje magnético, construido por medio de laminaciones similares a las utilizadas en la construcción de los núcleos de los transformadores tipo acorazado.

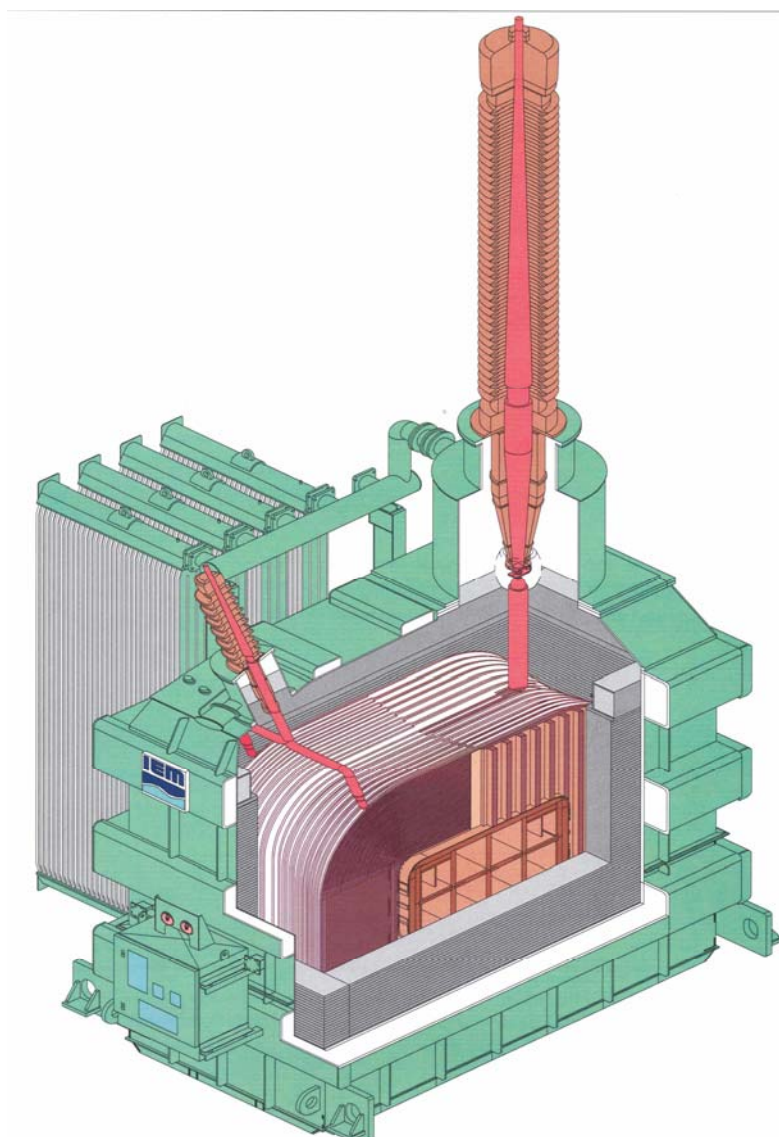
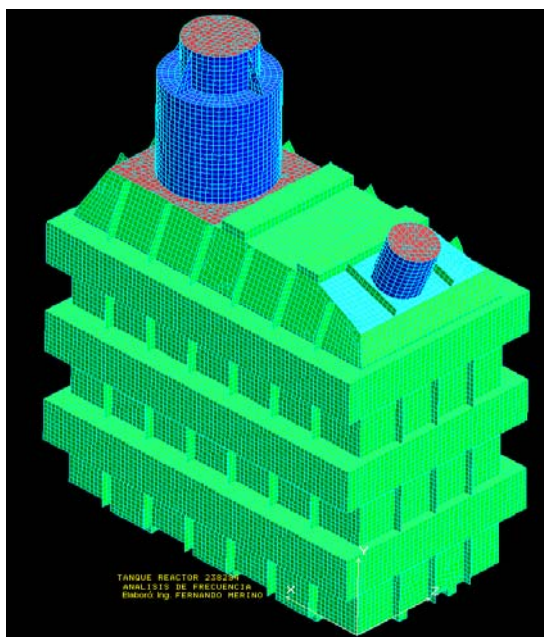


Fig. 2.6.2: Corte de un reactor en derivación tipo acorazado.



Modelo de Elemento Finito del tanque



Bobina y guía de 400 KV de un reactor



Sección inferior del tanque



Sección superior del tanque.

Figura 2.6.2a: Componentes del reactor

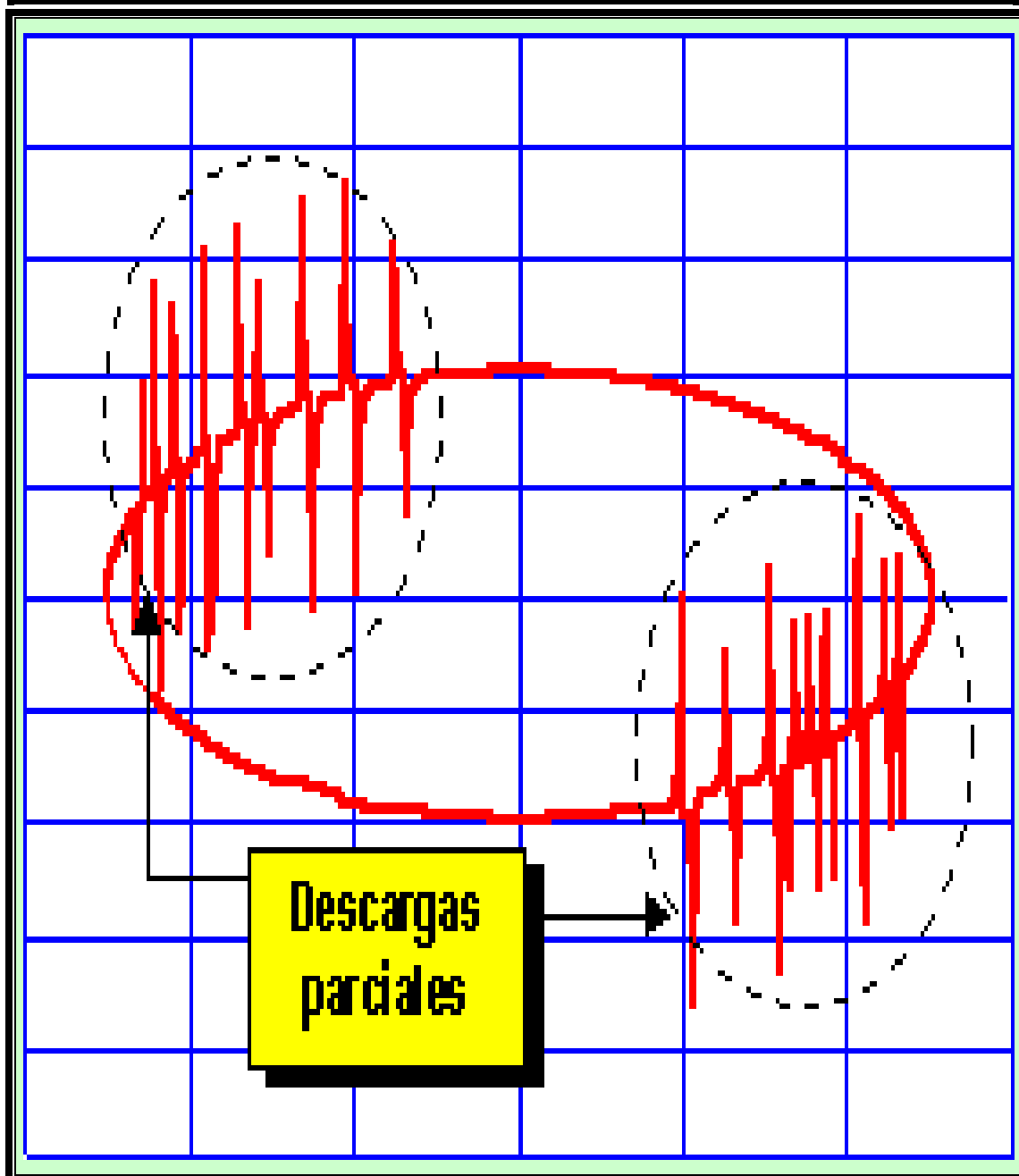
2.6.2.1 CARACTERÍSTICAS.

Esta construcción ofrece las siguientes características y ventajas:

- 1.- Tienen todas las ventajas mecánicas, térmicas y dieléctricas desarrolladas para los transformadores tipo acorazado.
- 2.- El blindaje magnético ha sido diseñado para dar una trayectoria de retorno de flujo magnético de baja reluctancia.
- 3.- El diseño del tanque, ajustado en forma, utilizado exitosamente por muchos años en los transformadores tipo acorazado, ha sido adaptado para la construcción de los reactores.
- 4.- Las estructuras de bobinas y aislamientos son soportadas por una viga aislante y una placa de soporte desde la orilla de la parte inferior del tanque.
- 5.- La guía de alta tensión, la cual conecta con las boquillas tipo condensador, es tomada del centro del devanado en la parte más favorable con respecto a los esfuerzos dieléctricos. La conexión de la boquilla del neutro (final devanado) se realiza en los extremos cerca del blindaje magnético, el cual se encuentra aterrizado.
- 6.- El arreglo de los devanados permite que se alcance una buena distribución de impulso de voltaje. Las bobinas tipo galleta proporcionan una mayor capacitancia en serie entre bobinas que cuando los finales de bobina se aterrizan. Al mantener las capacitancias entre vueltas muy similares, podemos acercarnos a obtener una división lineal de capacitancia. Esto da como resultado una buena distribución inicial de voltaje y por medio de mantener una distribución uniforme de vueltas podemos minimizar las oscilaciones de los devanados, las cuales toman lugar entre el estado inicial de carga capacitiva y la distribución electromagnética final.
- 7.- Los reactores blindados con núcleo de aire, tienen una mejor característica de impedancia lineal, aún cuando el blindaje magnético se satura para una porción de cada ciclo. Con proporciones normales de bobinas y el blindaje magnético saturado, la resistencia óhmica llega a ser el 70% de su valor cuando el blindaje no está saturado. Esto significa que una corriente mas senoidal es derivada durante condiciones de sobre-voltaje, que la puede ser obtenida de un reactor con núcleo de hierro con entre-hierros, teniendo el mismo valor de densidad de flujo en su circuito magnético.
- 8.- Los reactores con núcleo de aire no tienen entre-hierros, por lo que no existen problemas de vibración o de efectos de borde que son comunes en los núcleos con entre-hierros.

CAPITULO TERCERO.

DESCARGAS PARCIALES.



CAPITULO TERCERO.

DESCARGAS PARCIALES (DPs).

3.0. GENERALIDADES.

Durante el proceso de fabricación de un aislante, pueden quedar pequeñas cantidades de gas aprisionadas en el seno del material, formando cavidades de formas y dimensiones muy diferentes.

Por otra parte, al montar un aislante alrededor de piezas conductoras, equipos eléctricos, por descuido, imperfecciones, dificultades constructivas, pueden quedar cavidades entre el dieléctrico sólido y los conductores ó entre diferentes capas de aislamiento sólido.

Los procesos de degradación debilitan el sistema aislante, disminuyendo la rigidez dieléctrica del mismo, dando lugar a la existencia de pequeñas descargas eléctricas conocidas como descargas parciales.

Las descargas parciales pueden ser definidas como:

- a) Descargas parciales que solo puentean parcialmente el aislamiento entre conductores.
- b) Descargas de baja energía las cuales no resultan en un arqueo o ruptura completa del aislamiento entre los electrodos.

Las descargas parciales se presentan en material aislante contaminado, interfaces de electrodos o en imperfecciones del aislamiento sólido, tales como: huecos, cavidades, fracturas, etc. En aislamiento líquido se presenta en burbujas de gas o entre capas de aislamiento de diferentes características dieléctricas. También se pueden presentar en esquinas metálicas sometidas a grandes esfuerzos por campos eléctricos, falsos contactos y cuando partículas metálicas adquieren carga eléctrica. La actividad de descargas parciales, es un acelerador del proceso de degradación en sistemas aislantes sólidos.

3.1 NATURALEZA DEL FENOMENO.

Cuando el material aislante es sometido a una diferencia de potencial y debido a la presencia de un campo eléctrico el cual tiende a concentrarse en la cavidad, se produce la ionización del gas presente en éstas, dando origen a una descarga eléctrica. Ver figura 3.1.

La ionización es un proceso físico, el cual se inicia cuando un electrón libre o un ion negativo llega a un espacio lleno de algún material ionizable, por ejemplo gas donde exista un campo eléctrico. Si un electrón tiene la suficiente libertad para moverse en el gas, éste adquirirá una gran energía dinámica tal que en la colisión del electrón y una molécula neutra se liberará un electrón de ésta por el impacto. Así cada vez que esto suceda se liberará un nuevo electrón capaz de producir el mismo efecto, logrando de esta forma que el número de electrones libres aumente, produciendo así el efecto de avalancha.

Estos electrones, cargados negativamente, se moverán rápidamente en la dirección del electrodo cargado positivamente, el cual junto con el electrodo negativo producen el campo eléctrico en el gas ionizable.

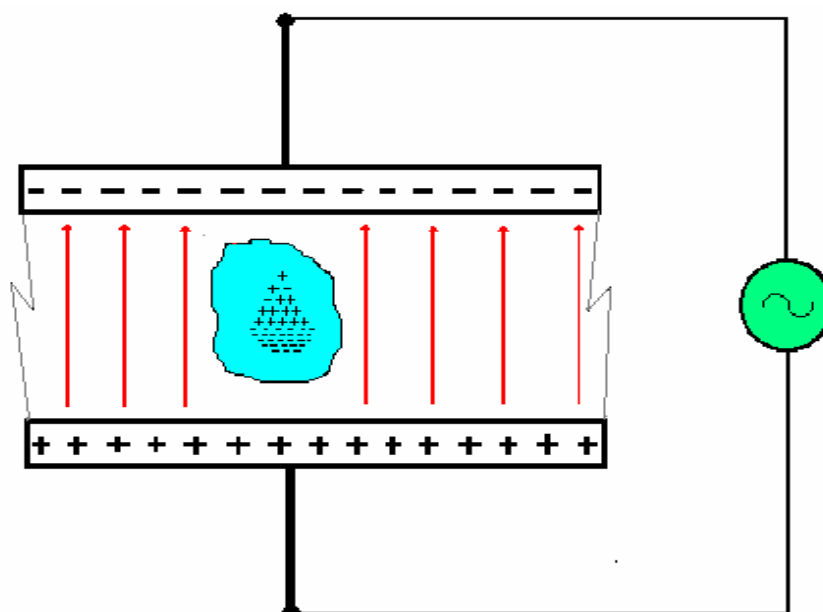


Figura. 3.1: Avalancha inicial para la formación de una descarga parcial.

. Las moléculas que pierdan un electrón permanecerán cargadas positivamente y se moverán mas lentamente que los electrones, en la dirección opuesta, es decir, hacia el electrodo negativo. El movimiento de los iones esta gobernado por la fuerza que ejerce el campo eléctrico entre las cargas libres y la masa de cada ion. La nube de iones positivos representa una carga de espacio la cual reduce la rigidez del campo eléctrico en la región donde los electrones son liberados por las colisiones, éste y otros efectos desaceleran el proceso de ionización.

Cuando la intensidad del campo alcanza un valor menor al cual se inicio la ionización, no se generan más electrones por avalancha. La carga de espacio formada por iones positivos en la vecindad del electrodo negativo y la de los iones negativos y electrones, en la vecindad del electrodo positivo disminuye por la influencia de varios efectos. El material de los límites de la región donde la ionización ocurre, además de la distribución del campo eléctrico y la polaridad de los electrodos, influyen en la velocidad a la cual la carga se recombina.

A medida que la carga de espacio desaparece, la intensidad del campo eléctrico en la región en cuestión aumenta, cuando éste alcanza el valor al cual la ionización fue iniciada la primera vez o ligeramente mayor, la avalancha de electrones comienza y el proceso de ionización se vuelve a repetir.

Las tensiones de inicio de estas descargas eléctricas son relativamente bajas debido principalmente a que el campo eléctrico tiende a concentrarse en las cavidades y que la rigidez dieléctrica del gas es menor que la rigidez dieléctrica del sólido.

Este fenómeno puede ocurrir en cualquier gas y en consecuencia, en cualquier material aislante sólido con fisuras ó cavidades, líquido con burbujas y también en aislaciones sólidas desgasificadas.

Si se coloca un metal en una zona cercana a la avalancha, las cargas eléctricas se inducirán capacitivamente en este metal o electrodo. Cuando este electrodo se conecta a una línea de transmisión, la forma de onda que puede registrarse en esta línea, corresponderá a la del movimiento de los iones y electrones de la avalancha.

Estas descargas eléctricas afectan sólo a la zona en que se producen, es decir, no comprometen todo el aislamiento, de allí su nombre genérico de descargas parciales que se producen en el seno de cavidades con gas presente en un medio sólido o líquido.

3.2 CLASIFICACION DE LAS DESCARGAS PARCIALES.

Las descargas parciales son descargas eléctricas de alta frecuencia que no ponen en corto-circuito a dos electrodos de polaridad opuesta. En general se distinguen tres tipos de DPs:

- a) internas. b) Superficiales. c) Corona.

3.2.1 DESCARGAS PARCIALES INTERNAS.

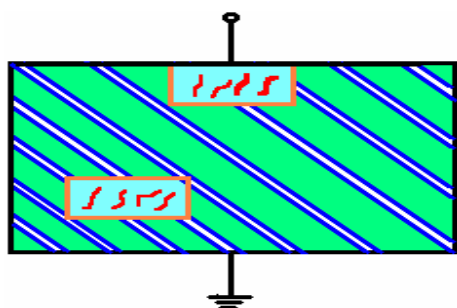


Figura 3.2.1: Descarga parcial interna.

Las DPs. internas que aparecen dentro de una cavidad gaseosa, en el seno de un sólido ó líquido; se deben a inclusiones de materiales extraños que generalmente tienen una rigidez dieléctrica baja comparada con la rigidez dieléctrica de los materiales aislantes. Esto ocasiona que el material extraño presente una ruptura dieléctrica a una intensidad de campo eléctrico menor que la de los aislamientos y así se presenta el fenómeno de DPs.

Las inclusiones que pueden ocasionar descargas parciales son:

- | | |
|-------------------------|------------------------------|
| a) Burbujas de gas. | c) Protuberancias metálicas. |
| b) Cavidades de aceite. | d) Partículas extrañas. |

Para el caso de transformadores de potencia, estas inclusiones son producto de la mala calidad de los materiales o por el empleo de técnicas inadecuadas en la manufactura.

3.2.2 DESCARGAS PARCIALES SUPERFICIALES.

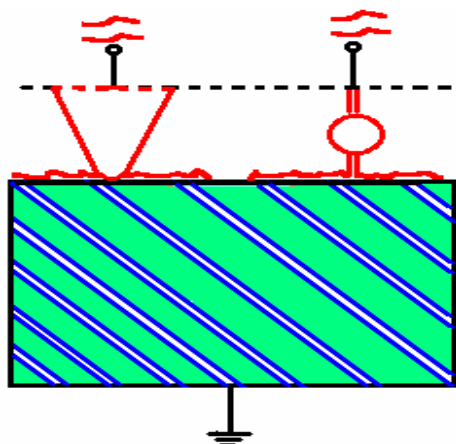


Figura 3.2.2: Descargas parciales superficiales

Las descargas superficiales se presentan sobre las superficies del aislamiento. Típicamente, las interfaces entre aislamiento sólido y líquido o gas que lo rodea pueden originar una actividad de DPs superficiales. La diferencia en permitividades ocasiona el aumento en cualquiera de los materiales que forman la interfaz y puede ocasionar ruptura.

Las DPs superficiales pueden ser el resultado de una mala distribución de campo eléctrico o por una corriente que fluye a través de una capa conductora debido a contaminación o humedad, en la superficie del aislamiento.

3.2.3 DESCARGAS CORONA.

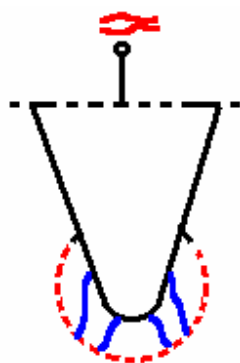


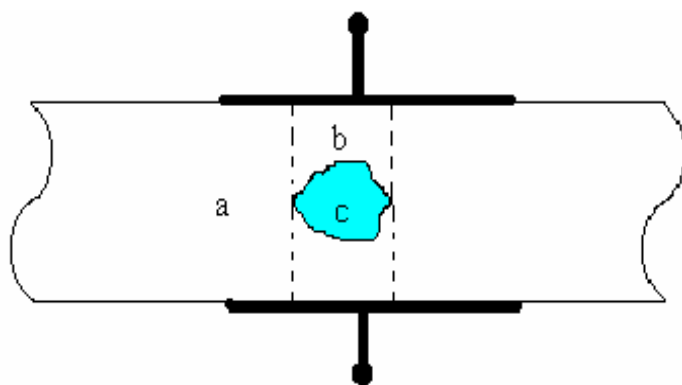
Fig. 3.2.3: Descarga corona.

Las descargas corona ocurren en las superficies metálicas aguzadas o que tienen un pequeño radio de curvatura, en las cuales el campo eléctrico supera la rigidez dieléctrica del gas (en general aire). La descarga limitada a la zona de alto campo se extingue en el medio circundante lo que no origina una falla franca. Hay autores que prefieren emitir a las descargas corona de la familia de las DPs, en general pasan a ser fuente de interferencia en la medición de DPs.

El efecto corona es un caso particular del fenómeno de DPs. Este fenómeno se puede oír y ver como una crepitación y luminosidad respectivamente que se produce sobre la superficie desnuda de un conductor, cuando el gradiente de tensión en la superficie alcanza un valor que excede la rigidez dieléctrica del aire que lo rodea.

3.3. MODELACIÓN DEL FENÓMENO.

Una falla en un determinado punto de un sistema de aislamiento eléctrico puede significar la presencia de una cavidad, la cual presenta una determinada capacidad frente a tensiones alternas.



Donde:

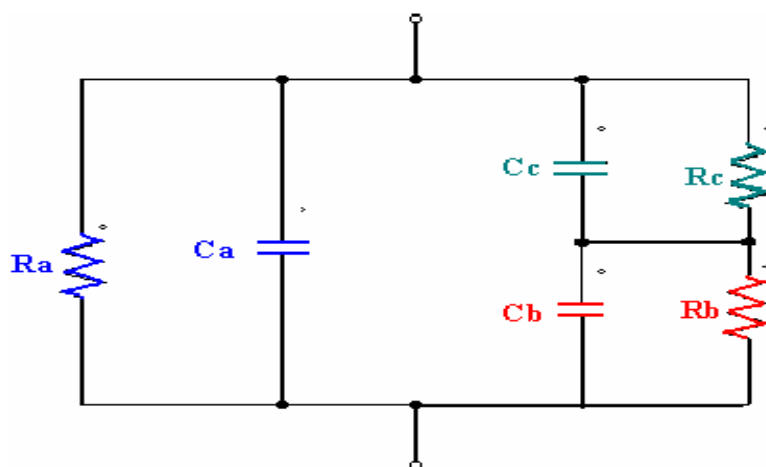
a = Representa la capacidad de la aislación sin falla.

b = Capacidad serie a la cavidad, es decir, de la zona sin falla.

c = Es la capacidad equivalente de la cavidad (Poro en el seno de la cavidad).

Fig. 3.3: Modelo de un aislante sólido con falla.

En general la perturbación eléctrica provocada por una descarga parcial con voltaje alterno puede ser modelada mediante un circuito análogo con condensador y resistencias.



Donde: R_c y C_c representan la resistencia y la capacidad de la imperfección o cavidad, R_b y C_b la resistencia y la capacidad del aislante en serie con la cavidad, R_a y C_a la resistencia y capacidad del aislante restante.

Fig. 3.3a: Circuito eléctrico equivalente.

Pero como las resistencias son tan grandes en relación a las reactancias capacitivas se adopta el modelo simplificado.

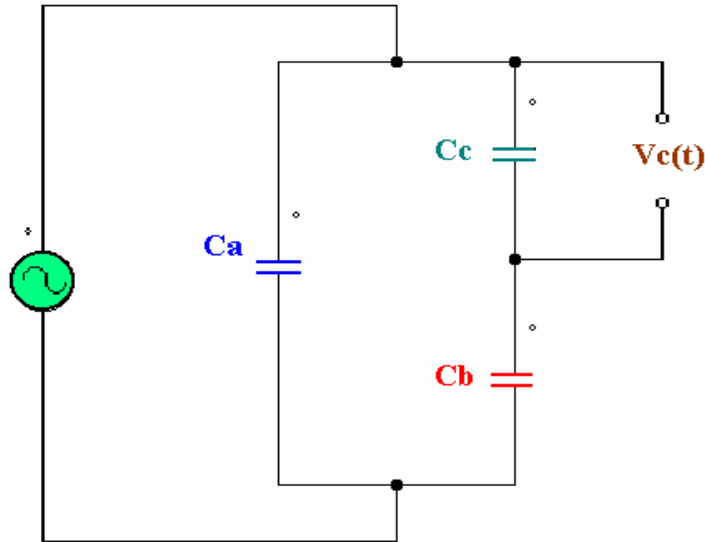


Fig. 3.3b. Circuito eléctrico simplificado.

Si se aplica una tensión alterna al aislante designado por:

$$V(t) = V_m \cdot \text{Sen}\omega t \quad (3.1)$$

La tensión a través de la cavidad sería idealmente V_c siempre y cuando el condensador C_c fuera capaz de soportar esa tensión. Si esto no es el caso, se producirá una descarga a una tensión U_{i+} . Por lo tanto la diferencia de potencial en los bornes de la cavidad será:

$$V_c(t) = \frac{C_b}{C_b + C_c} V_m \cdot \text{Sen}\omega t \quad (3.2)$$

Hasta el momento donde toma el valor U_i (tensión disruptiva del gas en el interior de la cavidad).

La descarga se produce cuando el valor máximo de la tensión total aplicada es igual a:

$$V_{\max} \geq V_i = \frac{C_b + C_c}{C_b} U_i \quad (3.3)$$

Donde:

V_i =tensión de Umbral

La descarga en la cavidad se traduce en una brusca caída de tensión $V_c(t)$ (en un tiempo menor a 10^{-7} Seg.) hasta un valor U_e llamado extinción de la descarga.

Después de que la descarga se ha extinguido, la tensión de la cavidad C empieza a subir nuevamente, ya que la capacidad de la cavidad representada por C_c , empieza a cargarse debido a la tensión externa aplicada. Una vez que la tensión en la cavidad C, alcanza nuevamente el valor de inicio U_i se produce una nueva descarga. Este fenómeno se repite varias veces hasta que la tensión aplicada $V(t)$ sobre la muestra disminuye. El proceso se repite en la parte negativa de la onda en el momento que $V(t)$ llega a tener el valor de U_{i-} . De esta manera, se obtendrán grupos de descargas regularmente recurrentes y los mismos se formarán alrededor de los pasos de la tensión por cero. Las descargas de la cavidad causan impulsos de corriente en las terminales de la muestra, mismos que se muestran en la parte inferior de la figura 3.3c (La curva de color rojo muestra el voltaje $V(t)$ que debería aparecer en la cavidad de no haber descarga).

Se debe destacar que los pulsos de DPs son de signo positivo en los intervalos 0° a 90° y de 270° a 360° y negativos en el intervalo 90° a 270° , concentrándose en la región de cruce por cero de la señal.

Con tensión continua el fenómeno es irrelevante ya que solo ocurre una descarga al conectar el voltaje y otra al desconectarlo, comparado con lo que ocurre con tensión alterna, en que habrá al menos dos descargas por ciclo.

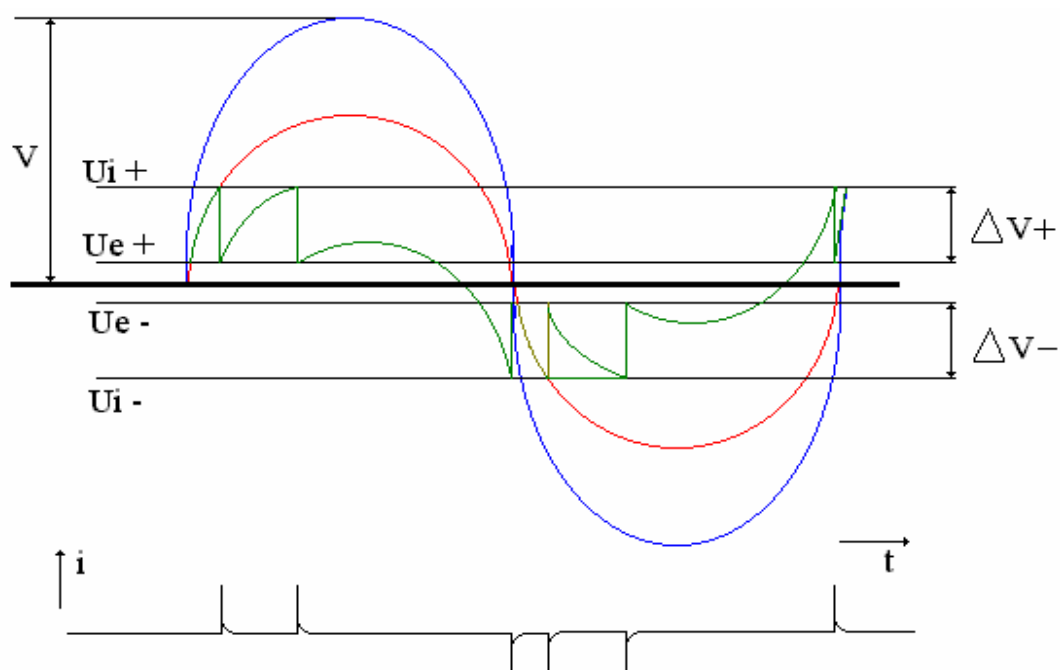


Fig. 3.3c: Formas de onda de voltaje y corrientes generadas por DPs.

3.4 MAGNITUDES ELÉCTRICAS RELACIONADAS CON LAS DPs.

En general en el transcurso de este trabajo, se hablará en términos de descarga (carga) aparente, identificando con ella a la descarga que se presenta accesible o medible entre un par de terminales. En esta parte se intenta establecer una relación entre la descarga aparente y la descarga real, entendiendo por ésta la física, la que realmente ocurre a causa de imperfecciones en el aislamiento y a la existencia de gradientes muy altos.

La carga real en una cavidad C de acuerdo al circuito equivalente de la figura 3.3b.

$$q = \left[C_c + \frac{C_a C_b}{C_a + C_b} \right] * \Delta U \quad (3.4)$$

Donde:

$$\Delta U = U_i - U_e$$

U_i = Tensión de inicio de la descarga en la cavidad.

U_e = Tensión de extinción de la descarga en la cavidad

Generalmente $C_b \ll C_a$ entonces:

$$q = (C_c + C_b) * \Delta U \quad (3.5)$$

Estas descargas producen impulsos de corriente, por consiguiente podemos representar las DPs por una fuente de corriente que entrega una corriente $i(t)$.

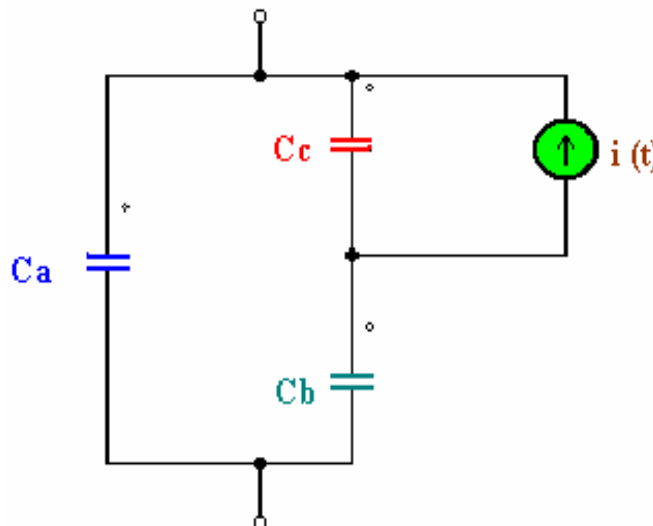


Fig. 3.4: Modelo circuito eléctrico con fuente de corriente.

Donde:

$$i(t) = (C_c + C_b) * \Delta U * \delta(t) \quad (3.6)$$

$\delta(t)$ = Función de pulso unitario.

Transformando la fuente de corriente en tensión y nuevamente en una fuente de corriente se encuentra un circuito equivalente de la forma:

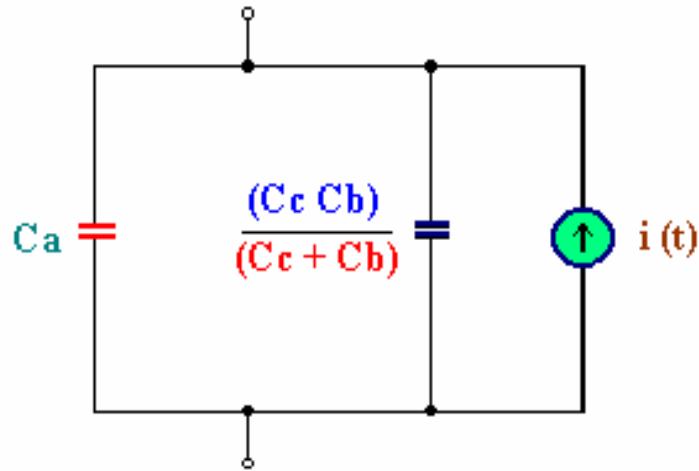


Fig. 3.4a: Modelo del circuito transformado.

Por lo tanto:

$$i(t) = \Delta U * C_b * \delta(t) \quad (3.7)$$

De tal manera que la carga aparente transferida será:

$$q = \int_0^{\infty} i(t) dt \quad (3.8)$$

Lo cual da:

$$q = C_b * \Delta U \quad (3.9)$$

Esta magnitud es la empleada para caracterizar las DP, ya que se puede medir en los bornes del aislante. El flujo de carga aparente hacia el exterior origina una variación de voltaje en los terminales dada por:

$$V_a = \frac{C_b}{C_b + C_a} = \frac{C_b}{C_a} \Delta U \quad (\text{suponiendo } C_b \ll C_a)$$

La mayoría de los detectores de DP responden a esta caída de voltaje y son por lo tanto capaces de determinar a q . La medición eléctrica de los impulsos originados por las DP pueden expresarse en carga aparente (pC).

La energía disipada por la DP será:

$$\Delta W = \frac{q \cdot V_i}{2} \quad (3.10)$$

Donde:

q = Carga aparente.

V_i = Voltaje de iniciación o umbral peak.

El número de descargas por cada cuarto de ciclo puede expresarse como el número de veces que el tamaño de la carga (ΔU) está contenida en el voltaje máximo V_c aplicado a la burbuja.

$$N = 4 f \frac{V_b}{\Delta U} \quad (3.11)$$

Donde:

N = Número de descargas por segundo.

f = Frecuencia en (Hz).

V_b = Voltaje máximo que se aplicará a la burbuja en cada descarga.

$$V_b = V_m \frac{C_b}{C_b + C_c} - U_e \quad (3.12)$$

Donde:

ΔU = Caída de tensión en la burbuja en cada descarga

$$\Delta U = U_i - U_e \quad (3.13)$$

3.5 ANÁLISIS DE LA FORMA DE ONDA DE LAS DPs PARA LA EVALUACIÓN DE LA DEGRADACIÓN.

Los primeros intentos por resolver en tiempo la forma de onda de una descarga parcial se iniciaron al final de la década de los 60's. Sin embargo, estos intentos se extendieron masivamente hasta los 80's, cuando aparecieron digitalizadores de 1 GHz a bajo costo. Los primeros estudios revelaron que la forma de onda de una DP tiene un frente electrónico de muy altas frecuencias, por lo que los circuitos de detección se basaron en arreglos coaxiales con impedancias lineales de hasta 1 GHz. La discusión sobre la mecánica de evaluación de la degradación producida por las descargas parciales, utilizó un arreglo de este tipo y se circunscribe al análisis de la corriente inducida por una DP ocurriendo en una cavidad única ocluida al momento de gelado de la resina epóxica. Las condiciones controladas de manufactura y medición permiten resultados repetitivos para diferentes muestras.

Las formas de onda de la corriente inducida por una descarga parcial pueden clasificarse en dos tipos: descargas rápidas y descargas lentas.

3.5.1 DESCARGAS PARCIALES ASOCIADAS A CONDICIONES DE SOBRE TENSIÓN.

Estas descargas corresponden al tipo rápido, las cuales tienen un frente del orden de 2ns, pero puede alcanzar tiempos menores de 700ps. En estos tiempos, la corriente puede alcanzar niveles de amperes, por lo que se genera una onda electromagnética que se difunde en el espacio circundante de la zona de descarga.

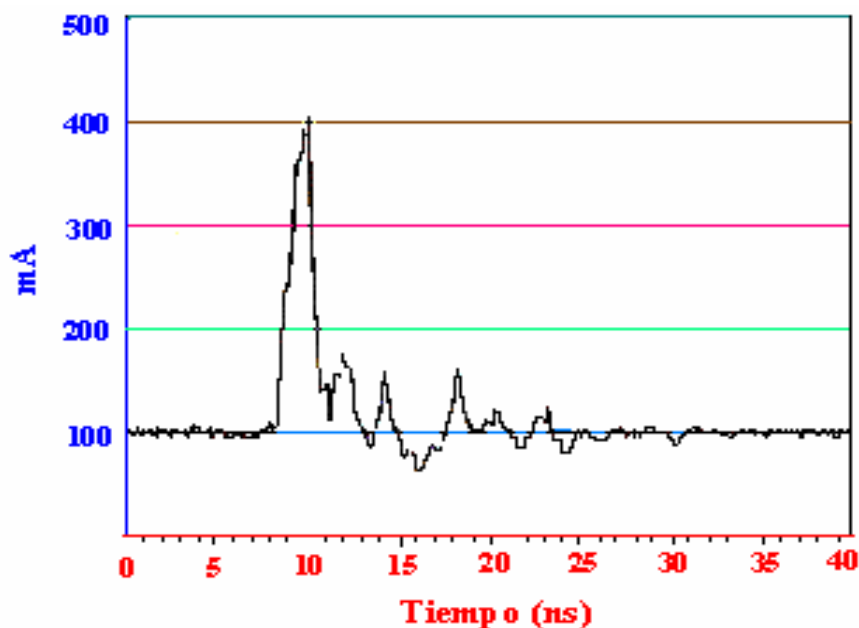


Fig. 3.5.1: Forma de onda de la corriente inducida por una DP rápida asociada a una sobre tensión.

El origen de esta forma de onda de la descarga se encuentra asociado con condiciones de sobre tensión dentro de la cavidad donde se presenta la descarga. Estas condiciones de sobre tensión se originan cuando el voltaje presente en la cavidad para provocar la descarga excede los valores de ruptura del gas sin que exista un electrón libre para iniciar la avalancha de acuerdo al proceso descrito anteriormente.

La forma de onda de una descarga rápida contiene información sobre el tiempo entre el momento en que se alcanzó el gradiente de ruptura en el gas dentro de la cavidad y el momento en que apareció el primer electrón libre. Esta información es relevante para definir la energía con que se bombardea la superficie y es sin lugar a dudas, el tipo de descarga que mayor daño puede ocasionar en el aislamiento. Sirve también para la localización de esta descarga, ya que la gran cantidad de energía liberada en corto tiempo es mucho mayor que la que se encuentra en el medio ambiente como interferencias y que es causada por las transmisiones de radio y telefonía inalámbrica.

3.5.2 DESCARGAS PARCIALES ASOCIADAS A LA DEGRADACIÓN.

Las formas de onda inducidas por las DP en muestras que presentan degradación severa, se observan formas de onda del tipo lento, cuya duración se prolonga dos órdenes de magnitud más que en las ondas rápidas.



Fig. 3.5.2: Forma de onda típica de la corriente inducida por una DP lenta asociada a una fuerte degradación.

Es necesario resaltar que la escala de tiempos es 10 veces más lenta que la correspondiente a la descarga rápida.

Esta descarga lenta está relacionada con la formación de avalanchas sucesivas, generadas por una abundante cantidad de electrones libres provenientes de carga atrapada en la superficie degradada del aislamiento. Bajo estas condiciones, no se alcanzan niveles significativos de sobre tensión entre cada descarga y la duración de la descarga se extiende mientras la conducción de la superficie degradada permita la difusión de cada descarga anterior. Esta aseveración se confirmó al detectar zonas de inyección de cargas en la superficie, presentadas como áreas luminosas al barrido de un microscopio electrónico. Esto indica que los electrones necesarios para observar la imagen promueven la liberación de más carga inyectada, que se manifiesta como zonas luminosas. Esto significa que la zona de mayor degradación tiene menor resistividad superficial y volumétrica, por lo que promueve la difusión de carga dentro del volumen del aislamiento y con ello la degradación no sólo es superficial sino que avanza hacia los electrodos hasta provocar una falla.

3.6. NOCIVIDAD DE LAS DESCARGAS PARCIALES.

La degradación de un aislante sólido por las descargas parciales, es el resultado de un conjunto complejo de fenómenos.

- a) Elevación de la temperatura del gas encerrado proveniente de los choques elásticos entre electrones y moléculas gaseosas.
- b) Bombardeo iónico y electrónico de las paredes de la cavidad provocando su erosión.
- c) Acción de rayos ultravioleta producidas por átomos excitados y por la recombinación de portadores.
- d) Descarga química progresiva del material con producción de gases, particularmente hidrógeno.

La importancia de estos fenómenos, varía con el material dieléctrico considerado y las condiciones en las cuales es utilizado, las experiencias han demostrado que en un ambiente gaseoso químicamente inerte la degradación de un aislante obedece a un mismo tipo de evolución que comprende tres fases sucesivas:

- a) Inicialmente el proceso de ataque se limita a una erosión lenta, las cavidades se agrandan y pueden entrar en contacto con otra, debilitando localmente el muro del aislante.
- b) La segunda etapa puede aparecer en los puntos débiles de la cavidad a partir de las cuales las descargas se propagan al interior del dieléctrico sano formando caminos conductores.
- c) Cuando el campo eléctrico en la extremidad de una de las ramificaciones alcanza al gradiente disruptivo intrínseco del aislante se observa un desgaste rápido del material en esa dirección y cuando esta progresión de daño se produce también hacia el electrodo opuesto, la perforación completa del aislante produce una descarga total de una pieza conductora a otra.

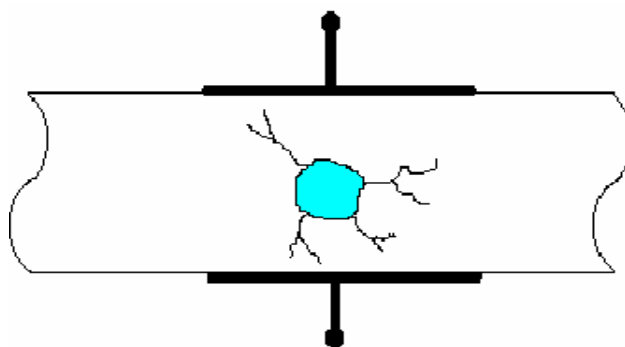


Fig. 3.6: Formación de árboles a partir de una cavidad.

3.7 PERTURBACIÓN ELÉCTRICA PRODUCIDA POR LAS DPs.

La descripción del proceso de ionización muestra que hay transferencia de carga en la región donde se produce la ionización. Esto significa que hay circulación de corriente en esta región y cierta potencia disipada. Como la corriente circula en un espacio restringido, la densidad de corriente local es extremadamente alta, lo que produce en la región un intenso calor. Esto provoca un fuerte incremento de presión en la cavidad, este efecto puede ser comparado con el de una explosión en miniatura. Así el material que rodea la zona es comprimido, generándose una onda de pulsos sónica y ultrasónica que se propaga a través del medio.

La transferencia de carga en la región donde se produce la ionización es acompañada por la correspondiente transferencia de carga en el circuito externo y la fuente de poder asociada. Por lo tanto, como resultado de esta transferencia de carga momentánea de corta duración, regular o aleatoria, se producen pulsos de corriente, los cuales se propagan a través del circuito externo, estos pulsos de corriente son de corta duración ya que son el resultado del movimiento extremadamente rápido de portadores de carga.

CAPITULO CUARTO.

MÉTODOS DE DETECCIÓN Y MEDICIÓN DE DESCARGAS PARCIALES EN TRANSFORMADORES Y REACTORES EN DERIVACIÓN DE POTENCIA.



CAPITULO CUARTO.

MÉTODOS DE DETECCIÓN Y MEDICIÓN DE DESCARGAS PARCIALES EN TRANSFORMADORES Y REACTORES EN DERIVACIÓN DE POTENCIA.

4.0 GENERALIDADES.

El aumento de las potencias, elevación de los voltajes y necesidades de transmitir a distancias cada vez mayores convierte a los transformadores en los equipos eléctricos de mayor importancia.

En la operación de los transformadores de potencia éstos están sujetos a esfuerzos térmicos, eléctricos y mecánicos, los cuales provocan cierta degradación en el sistema aislante. Las causas principales del fenómeno de degradación del sistema aislante son la temperatura excesiva, oxígeno y humedad combinados con los esfuerzos eléctricos, los cuales actúan como acelerador del proceso de degradación. Las causas secundarias que aceleran el envejecimiento del sistema aislante son los esfuerzos mecánicos, los ácidos y lodos. Un exceso de cualquiera de estos esfuerzos puede acelerar el proceso de degradación. El proceso de degradación del sistema aislante puede evolucionar gradualmente hasta que se presenta una falla en el transformador de potencia, la cual puede ser dañina. Estas fallas algunas veces ocurren sin ninguna alarma o señal de que un problema se está presentando. Pero en otras ocasiones existen pequeños indicios que indican la presencia de agentes dañinos o de deterioro. La detección oportuna de estos indicios puede ser la diferencia entre someter el transformador a una reparación, sustituir una pieza dañada o tener un equipo fallado con graves repercusiones. Las descargas parciales es uno de los problemas más frecuentes que se presentan en los transformadores de potencia y reactores.

La medición de las DP's en transformadores, revelan la existencia de puntos calientes con intensidades de campo excesivamente altas y defectos en los materiales, se han desarrollado métodos unos más precisos que otros, los cuales entregan información sobre fallas en el sistema aislante. Es importante medir la intensidad de las descargas parciales y localizarlas a fin de eliminarlas.

La tensión excesiva en la región débil puede ser resultado de las fallas de diseño, contaminación o desviación de las tolerancias permitidas en el proceso de fabricación, fallas en los materiales aislantes, etc. Otra posibilidad es el daño oculto en la protección causado por pruebas anteriores.

4.1 DETECCIÓN DE DP's EN EL AISLAMIENTO DE TRANSFORMADORES Y REACTORES.

Diversas instituciones de investigación y desarrollo tecnológico se han dedicado a desarrollar técnicas de medición de Descargas Parciales, siendo las mas notables: El Electric Power Research Institute (EPRI), el Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), la Conference Internationale des Grands Reseaux Electriques (CIGRE) y el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE).

La ruptura de una descarga parcial implica una transferencia de carga. Esta puede ser detectada ya sea como pulsos eléctricos de descargas individuales en un circuito externo o como un cambio en las pérdidas dieléctricas totales del sistema de aislamiento. La DP emite luz, calor, ondas ultrasónicas y radiación electromagnética. La descarga parcial produce cambios químicos y físicos en el medio en el cual se presenta, los cuales pueden ser detectados por medio de los métodos químicos, eléctricos y acústicos.

4.2 MÉTODO QUÍMICO (ANÁLISIS CROMATOGRÁFICO).

Los principales materiales que constituyen el sistema de aislamiento de los transformadores, son esencialmente, aceite, papel y cartón. Cuando éstos componentes del aislamiento reaccionan químicamente como consecuencia del calentamiento u otras condiciones dentro del transformador originan gases, los cuales tienen menor densidad que el aceite y tienden a desplazarse al nivel superior del mismo.

La composición química de la celulosa, la cual constituye el cartón es $(C_{12}H_{20}O_{10})_n$ en donde n varía de 300 a 750 aproximadamente, la formula química de los compuestos parafínicos del aceite aislante es C_nH_{2n} en donde n varía de 20 a 40. Los compuestos aromáticos y nafténicos del aceite están formados por átomos de carbono e hidrógeno, por lo tanto, la mayoría de los gases generados estarán constituidos por tres elementos químicos: Carbono, oxígeno y Nitrógeno.

El propósito de este análisis es conocer exactamente las diferentes sustancias que componen los gases disueltos extraídos del aceite del transformador. De acuerdo a la naturaleza de los gases disueltos en el aceite, se puede determinar la causa de la anomalía para prevenirla y solucionarla antes que se transforme en falla.

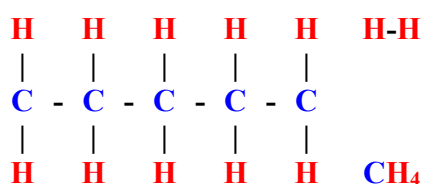
4.2.1 FALLAS QUE ORIGINAN GASES COMBUSTIBLES.

Los gases en exceso presentes dentro del transformador se originan por algunas de las siguientes fallas:

- | | | |
|--------------------------------|----------------|-------------|
| 1.- Corona ó Descarga Parcial. | 2.- Pirólisis. | 3.- Arqueo. |
|--------------------------------|----------------|-------------|

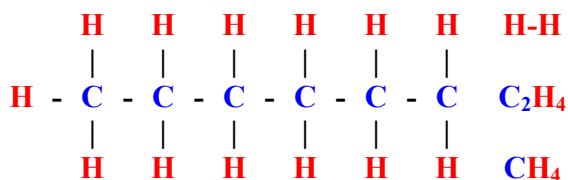
Cada una de éstas condiciones disipan cantidades de energía en niveles muy diferentes entre sí, la formación de arco disipa más energía que cualquiera de las otros dos y la falla corona disipa la menor energía. Esta energía causa la degradación de los materiales de aislamiento que son celulosa y aceite, ya que están involucrados diferentes niveles de energía en cada uno de los procesos, esto significa que se generan diferentes productos en cada uno de ellos como consecuencia del deterioro del aislamiento. La degradación del aceite produce hidrógeno e hidrocarburos mientras que la del papel produce óxidos de carbono.

CORONA EN EL ACEITE.



Al existir una falla corona en el aceite se tendrá suficiente energía para producir hidrógeno ya que los enlaces carbono-hidrógeno requieren relativamente poca energía para romperse, si se rompen dos enlaces de éste tipo se forma hidrógeno. Si la energía involucrada en el proceso es mayor, se puede romper un enlace carbono-carbono de un extremo y se produce metano.

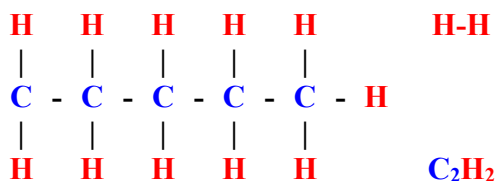
PIROLISIS DEL ACEITE.



En éste tipo de fallas se pueden distinguir dos etapas, la de alta y la de baja temperatura dependiendo de la cantidad relativa de energía que está disipando.

En baja temperatura se pueden romper enlaces interiores carbono-carbono en la molécula del aceite formándose metano y etano; con alta temperatura los enlaces carbono-hidrógeno del etano se rompen y se forma un doble enlace para producir acetileno e hidrógeno.

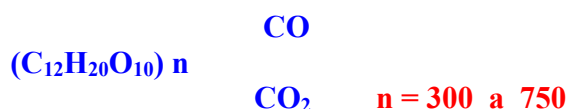
ARCO EN EL ACEITE.



Esta es la condición de mayor nivel de energía, la característica principal es la formación de acetileno. Mientras más energético sea el proceso, se tendrá presencia de mayor número y cantidad de compuestos producidos, sin embargo, lo más importante no es la cantidad de gases formados, si no la velocidad de aumento de cada uno de ellos.

PIROLISIS DE LA CELULOSA.

La celulosa del papel es termodinámicamente inestable, siempre se está descomponiendo en presencia de calor, sin embargo, en la operación normal del transformador el deterioro es lento.



Cantidades considerables de bióxido y monóxido de carbono presentes en el aceite, es señal de que una falla está involucrando a la celulosa, por lo que es importante vigilar las relaciones bióxido/monóxido y monóxido/bióxido, ya que un alto valor en la primera puede indicar oxidación del papel a alta temperatura en presencia de suficiente cantidad de oxígeno, mientras un alto valor en la segunda relación puede señalar que la celulosa se está descomponiendo rápidamente.

Cuando se detectan gases en cantidad suficiente como para suponer la existencia de una falla, es necesario conocer la severidad de ella, lo cual se determina en base a la tasa de crecimiento por día de cada gas en particular ó del total de gases combustibles:

a) ACETILENO (C_2H_2).

La presencia de acetileno en el gas en solución en el aceite es siempre debido a una falla eléctrica.

Si el C_2H_2 esta acompañado solamente de CH_4 y de H_2 , se trata de arco de duración limitada en el aceite. Si estos elementos son acompañados de CO y CO_2 éste arco compromete una aislación sólida.

Si estos mismos elementos sin CO ni CO_2 , son acompañados de C_2H_6 , C_3H_8 , C_2H_4 , C_3H_6 ellos son producto de fuertes DP's o de arcos en el aceite. Si además se observa CO , las descargas se producirían en una aislación sólida.

En el caso de pequeñas descargas parciales, éstas son más erosionantes para una aislación sólida cuanto más grande es la relación CO/CO_2 .

RODUCTO DE DEGRADACIÓN.	DIAGNÓSTICO POSIBLE.
$C_2H_2 + CH_4 + H$	Arco franco en aceite (duración limitada por protección).
$C_2H_2 + CH_4 + H_2 + CO + CO_2$	Arco franco en el papel (duración limitada por protección).
$C_2H_2 + CH_4 + H_2 + C_2H_6 + C_2H_4 + C_3H_8 + C_3H_6 + C_3H_4$	Fuertes descargas parciales en el aceite.
$C_2H_2 + CH_4 + H_2 + C_2H_6 + C_2H_4 + C_3H_8 + C_3H_6 + C_3H_4 + CO + CO_2$	Fuertes DP's en el papel impregnado (H_2 predominan los hidrocarburos no saturados).
$C_2H_2 + CH_4 + H_2 + C_2H_6 + C_2H_4 + C_3H_8 + C_3H_6 + C_3H_4 + CO + CO_2$	Pequeñas DP's en el papel impregnado (H_2 predominan los hidrocarburos saturados).

b) ETILENO (C_2H_4).

Si los productos de degradación contienen C_2H_4 sin (C_2H_2), se trata de una degradación térmica, si no hay CO_2 , en el punto caliente no interviene el aislamiento sólido.

La temperatura de esta falla será superior o inferior a $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ según sea mayor la cantidad de C_2H_4 o de CH_4 respectivamente entre los productos detectados. En general están acompañados de H_2, C_2H_6, C_3H_8 y C_3H_6 .

Cuando además en estos compuestos, se detecta la presencia de CO_2 y eventualmente de CO , la falla es en un punto caliente igual o superior a $130\text{ }^{\circ}\text{C}$. Mientras no se alcance la temperatura de $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ la razón de CO/CO_2 permanece del orden 0.1, el dióxido de carbono (CO_2) esta siempre presente en mayor concentración.

PRODUCTO DE DEGRADACIÓN.	DIAGNÓSTICO POSIBLE.
$C_2H_4 + CH_4 + H_2 + \text{Hidrocarburos Saturados } (C_2H_6 + C_3H_8 + C_3H_6).$	Punto caliente en el aceite < $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ predomina CH_4 . > $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ predomina C_2H_4 (a veces pequeñas cantidades de C_2H_2).
$C_2H_4 + CH_4 + H_2 + \text{Hidrocarburos saturados } (C_2H_6 + C_3H_8 + C_3H_6) + CO + CO_2$	Punto caliente en el papel impregnado. > $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ predomina CO_2 .

c) DIÓXIDO DE CARBONO (CO_2).

En ausencia de C_2H_2 y de C_2H_4 , el CO_2 , sólo o acompañado de un poco de CO o de CH_4 , es característico de un envejecimiento térmico normal del papel.

Cuando se observa además un fuerte predominio del H_2 y de hidrocarburos saturados ($C_2H_6+C_3H_8+C_3H_6$), con una relación de CO/CO_2 superior a 0.1, se trata de pequeñas descargas parciales que erosionan por largo tiempo el aislamiento sólido.

PRODUCTO DE DEGRADACIÓN.	DIAGNÓSTICO POSIBLE.
CO_2 CO_2+CH_4 (Metano). CO_2+CO	Envejecimiento térmico normal del papel.
H_2 +Hidrocarburos saturados ($C_2H_6+C_3H_8+C_3H_6$)+ $CO+CO_2$ ($CO/CO_2 > 0.1$).	Se trata de pequeñas descargas parciales que erosionan por largo tiempo el aislamiento sólido (papel impregnado).

d) HIDRÓGENO (H_2).

La presencia de H_2 (hidrógeno) solo o acompañado eventualmente de una cantidad de CH_4 (metano), se debe a descargas parciales, ya sea en el aislamiento, en la superficie libre del aceite o bien es la primera manifestación de una falla eléctrica mas grave.

PRODUCTO DE DEGRADACIÓN.	DIAGNÓSTICO POSIBLE.
H_2 (Hidrógeno). H_2+CH_4 (Metano)	Pequeñas DP's (gasificación del aceite). Primera manifestación de una falla eléctrica más grave.

e) COMPUESTOS DEL AIRE (O_2 , N_2).

En el caso de fallas en el relé Buchholz, puede ser que el gas sacado de éste contenga O_2 , N_2 . Si la proporción O_2 , N_2 es similar a la del aire, se puede tratar de una entrada de aire. Si la proporción de O_2 es mucho menor que la del aire, esto puede ser debido a un punto caliente de temperatura superior a 100 °C en efecto, el coeficiente de solubilidad del N_2 en los aceites minerales clásicos pasa por un máximo entre 80 y 100 °C.

PRODUCTO DE DEGRADACIÓN.	DIAGNÓSTICO POSIBLE.
N_2 (Nitrógeno)+ O_2 (Oxígeno).	Introducción de aire (si la proporción del N_2 , O_2 es similar a la del aire). Punto caliente que desgasifica el N_2 (si la proporción de O_2 es mucho menor que el aire).

4.2.2 CONCENTRACIONES LÍMITES “SEGURAS”, EN PPM DE GASES DISUELTOS EN ACEITE.

La siguiente tabla muestra las concentraciones límites seguras.

GAS	FORMULA	PPM LIMITE
Hidrógeno	H ₂	20n + 50
Metano	CH ₄	20n + 50
Etano	C ₂ H ₆	20n + 50
Etileno	C ₂ H ₄	20n + 50
Acetileno	C ₂ H ₂	5n + 10
Monóxido de Carbono	CO	25n + 500
Anhídrido Carbónico	CO ₂	100n + 1500
Total de gases combustibles	TGC	110n + 710

n = Número de años en servicio.

NOTAS:

1. Se considera en buenas condiciones los transformadores que presentan concentraciones de gases iguales o inferiores a los dados en la tabla.
2. Se consideran concentraciones peligrosas las comprendidas entre 5 y 10 veces los valores de tabla, para transformadores de instrumentos.
3. Todos los gases disueltos, excepto el nitrógeno y el anhídrido carbónico son combustibles. Por lo tanto debe considerarse el peligro de explosión, en especial en transformadores de poder pequeños y en transformadores de instrumentos.

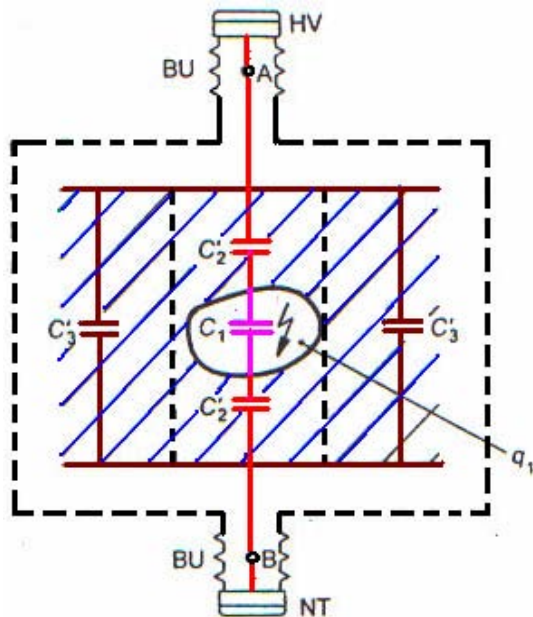
4.3 DETECCIÓN ELÉCTRICA DE DESCARGAS PARCIALES.

Estas técnicas son empleadas principalmente para detectar la presencia de descargas parciales en transformadores de potencia de alta tensión por medio de alta tensión por medio de dispositivos que registran la magnitud de las descargas. Este tipo de registro resulta de gran utilidad, sin embargo los métodos eléctricos no pueden determinar el origen o ubicación física de la fuente de DP's, Además este tipo de mediciones no pueden ser aplicadas en transformadores en servicio debido a los altos niveles de interferencia electromagnética que por lo general están presentes en el entorno en el cual se desempeña el transformador.

4.3.1 PRINCIPIO DE MEDICIÓN DE DESCARGAS PARCIALES.

Una descarga parcial, puede ser interpretada como el movimiento rápido de una carga eléctrica de una posición a otra. Para movimientos muy rápidos o durante el primer instante después del movimiento de la carga, los elementos de protección individuales

conectados entre dos terminales de línea de diferente potencial pueden considerarse como un número de capacitores conectados en serie.



BU = Boquilla.

HV = Alto voltaje.

NT = Terminal neutra.

$C_{1,2,3}$ = Parte activa del transformador (incluyendo el aceite).

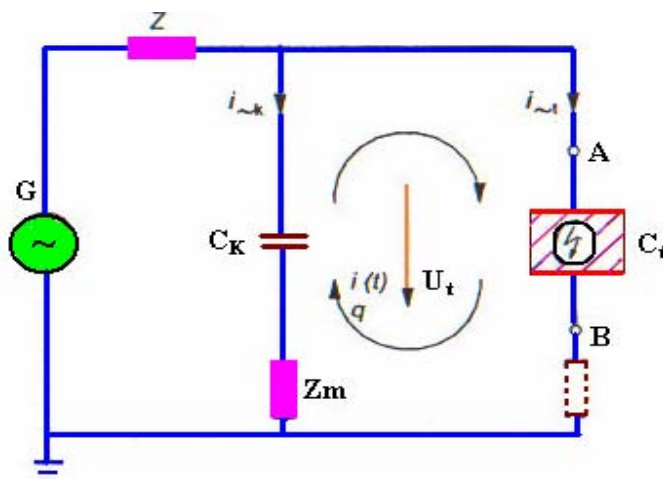
C_1 = Región débil.

C_t = Capacitancia del objeto bajo prueba (C'_2 y C'_3).

Figura 4.3.1: Representación esquemática de una parte del aislamiento del transformador.

Durante una típica medición de DP, la magnitud del valor de la actividad de la descarga parcial es grabada como una función del voltaje aplicado.

Si las dos terminales de línea son conectadas juntas vía un capacitor externo C_K (ver fig. 4.3.1a), los movimientos de carga dentro de los enlaces de protección conectados en serie (capacitancias C'_2 y C'_3) también serán reflejadas en la carga del capacitor externo C_K . Los movimientos de carga pueden ser detectados como impulsos de corriente $i(t)$ circulando en los condensadores C_K y C_t conectados en paralelo, a través de la impedancia de medición Z_m .



G = Fuente de voltaje.

q = Carga transferida

C_K = Capacitancia de acoplamiento.

$i(t)$ = Impulso de corriente de DP.

Z = Conexión de la fuente de voltaje

Z_m = Impedancia de medición

C_t = Capacitancia del objeto bajo prueba.

U_t = Voltaje del capacitor conectado en paralelo.

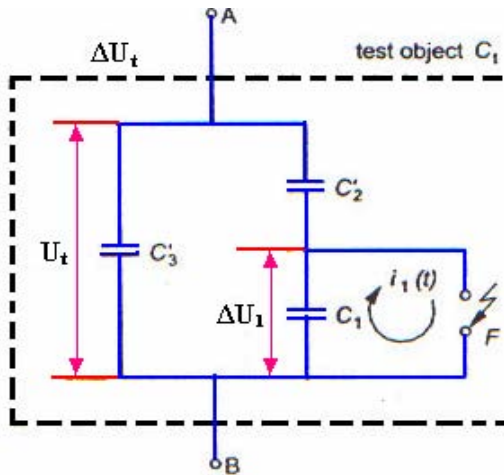
i_{K-t} = Corrientes de desplazamiento.

Fig. 4.3.1a: Circuito equivalente para la medición de DP.

Si se asume que la fuente de DP, es una pequeña cavidad en el aislamiento sólido, tendremos la siguiente relación entre las capacitancias:

$$C_t \approx C'_3 \gg C_1 \gg C'_2$$

La falla eléctrica dentro de la cavidad (capacitancia C_1) se representa por la distancia F entre los electrodos



La falla eléctrica dentro de la cavidad genera una corriente $i_1(t)$ en la DP, la cual es una corriente local y no puede ser medida en las boquillas.

La caída de voltaje ΔU_1 a través de la cavidad es causada por la corriente de descarga $i_1(t)$ y libera una carga $\Delta q_1 = \text{Carga verdadera}$.

$$\Delta q_1 = \Delta U_1 C_1 \quad (4.1)$$

Fig. 4.3.1b: Circuito para el análisis de carga aparente.

La descarga de C_1 causa una transferencia rápida de carga dentro de las capacitancias C'_2 y C'_3 . Esta transferencia de carga causa una caída de voltaje ΔU_t medible en la capacitancia del objeto bajo prueba C_t (en la conexión de la boquilla y el devanado).

$$\Delta U_t = \Delta U_1 \frac{C'_2}{C'_3 + C'_2} \quad (4.2)$$

$$C_t = C'_3 + \frac{C_1 C'_2}{C_1 + C'_2} \quad (4.3)$$

Asumiendo que:

$$C_t \approx C'_3 \gg C_1 \gg C'_2$$

La carga teóricamente medible q_t es:

$$q_t \approx q_3$$

$$q_3 = \Delta U_3 C_t$$

$$\Delta U_t \approx \Delta U_3$$

$$q_3 = \Delta U_1 \frac{C'_2}{C'_3 + C'_2} \left[C'_3 + \frac{C_1 C'_2}{C_1 + C'_2} \right]$$

$$\Delta U_1 = \frac{\Delta q_1}{C_1}$$

$$q_3 \approx \frac{\Delta q_1}{C_1} \frac{C'_2}{C'_3} C'_3$$

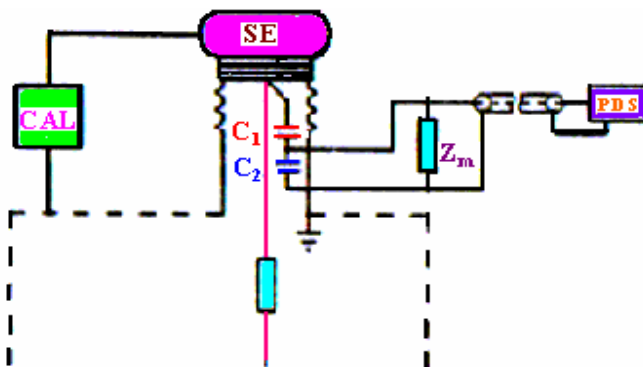
$$q_3 \approx \Delta q_1 \frac{C'_2}{C_1} = q_t \quad (4.4)$$

En un sistema aislante extendido, los valores de ΔU_t están en el rango de milivolts, mientras la magnitud de ΔU_1 (en la fuente de DP) puede estar en el rango de kilovolts. La carga teóricamente medible q_t es conectada a la carga verdadera q_1 vía las capacitancias C'_1 y C'_2 y se define como carga aparente. Debido a que no se conoce la ubicación de la fuente de DP, las capacitancias C_1 y C'_2 no pueden ser calculadas.

4.3.2 MEDICIÓN DE DPS. EN TRANSFORMADORES Y REACTORES.

Los impulsos de corriente, generados por una fuente externa de DP (en el circuito de prueba) o por una fuente de DP interna (en el sistema aislante del transformador) solo pueden ser medidos en las boquillas del transformador. La capacitancia de la boquilla C_1 , (ver figura 4.3.2) representa el condensador de acoplamiento C_K , que esta conectado en paralelo con la capacitancia C_1 (objeto bajo prueba = capacitancia total del sistema aislante del transformador).

En los transformadores de potencia, la impedancia de medición está conectada entre el grifo capacitivo de la boquilla y tierra, es decir en paralelo con la capacitancia C_2 .



Donde:

$C_1 = C_K$ = Capacitor de acoplamiento.

PDS = Sistema de DP.

CAL = Calibrador.

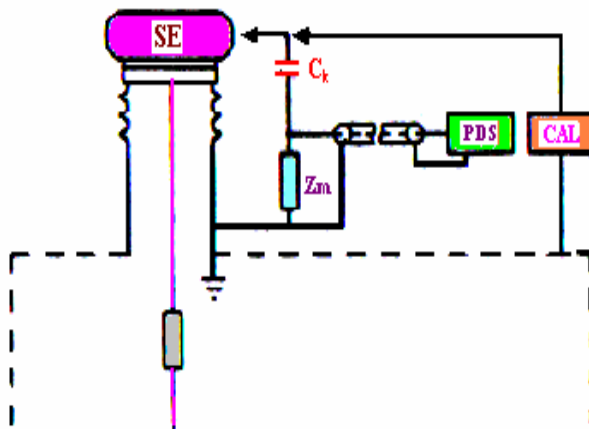
Z_m = Impedancia de medición.

SE = Electrodo protegido.

C_2 = Grifo capacitivo.

Fig. 4.3.2: Circuito de calibración para la medición de DP en transformadores boquilla con grifo capacitivo.

Para una boquilla sin placa capacitiva debe conectarse una capacitancia de acoplamiento externo C_K en paralelo con la boquilla.



C_K = Capacitor de acoplamiento.

SE = Electrodo protegido.

PDS = Sistema de DP.

CAL = Calibrador.

Z_m = Impedancia de medición.

Figura 4.3.2a: Circuito de calibración para la medición de DP en transformadores.

4.3.2.1 NORMAS IEC.

De acuerdo a IEC, las mediciones de DP se realizan midiendo la “carga aparente q ”, medida en (pC). La cual corresponde a la carga transferida durante la caída de voltaje ΔU causada en el objeto de prueba (descarga parcial interna en la boquilla o en el sistema aislante del transformador) ó en el circuito de prueba (descarga parcial externa).

Para la detección de la carga aparente se requiere la integración de los impulsos de corriente $i(t)$ de la DP, la cual puede ser llevada a cabo en el dominio del tiempo (osciloscopio digital) o en el dominio de la frecuencia (filtro pasa-banda).

Un sistema de medición de DP de banda-ancha consiste de un filtro pasa-banda. El sistema es conectado vía un cable coaxial a la impedancia de medición Z_m .

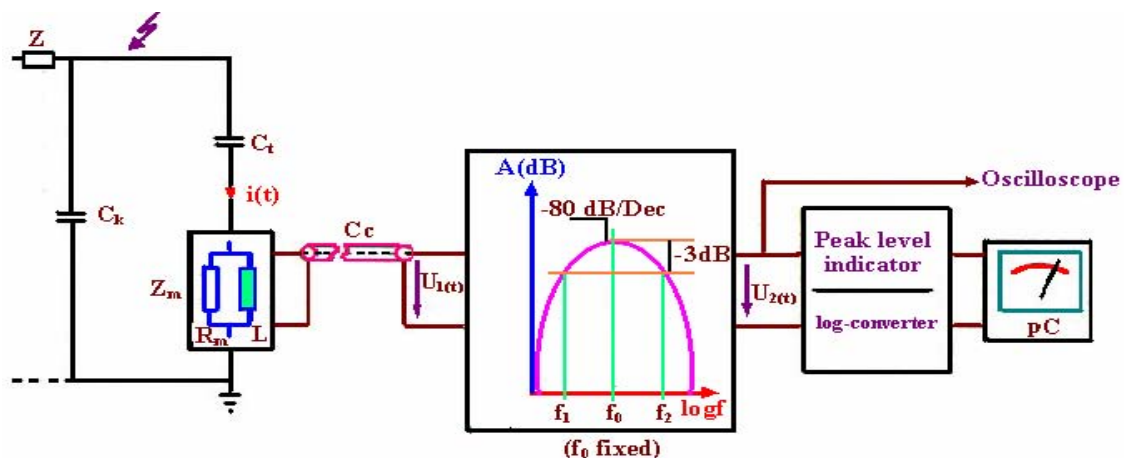


Figura 4.3.2.1: Filtro pasa banda-ancha.

Donde:

C_K = condensador de acoplamiento. Z = Conexiones de la fuente de voltaje
 C_t = Capacitancia del objeto bajo prueba. C_c = Capacitancia del cable de medición.
 Z_m = Impedancia de medición (tipo R,L,C). $i(t)$ = Impulso de corriente de DP.
 f_1 = Frecuencia de límite inferior del filtro. $U_1(t)$ = Respuesta de la impedancia de medición Z_m .
 f_2 = Frecuencia de límite superior del filtro. $U_2(t)$ = Respuesta del filtro pasa-banda.
 f_o = Frecuencia centro del filtro pasa-banda.

Los valores recomendados por IEC son: $f_1=50$ KHz, $f_2=150-400$ KHz.

La respuesta del filtro de ancha (amplitud S_{max}) debido a la excitación de un impulso de corriente de DP, es proporcional a la carga aparente q si la frecuencia de centro f_o del filtro corresponde al rango de la frecuencia de la corriente de impulso $F(f)=F(0)$.

La respuesta típica del filtro de banda-ancha se muestra en la figura 4.3.2.1a. En donde la amplitud: $S_{max} \sim F(0) = q$.

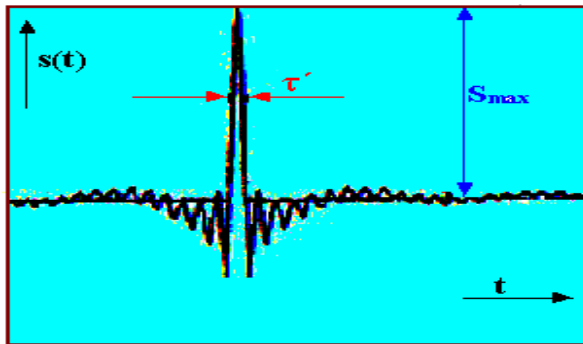


Figura 4.3.2.1a: Respuesta típica del filtro pasa banda-ancha

Donde:

S_{max} = Amplitud máxima $\sim q$.
 $F(0)$ = Amplitud del espectro de frecuencia a la frecuencia $F=0$ Hz.
 q = Carga aparente.
 τ' = Duración del impulso (respuesta del filtro).

Para la frecuencia de centro es válido:

$$f_o = \frac{f_1 + f_2}{2} \quad (4.5)$$

Donde:

f_o = Frecuencia del centro del filtro pasa-banda
 f_1 = Frecuencia de límite inferior del filtro pasa-banda.
 f_2 = Frecuencia de límite superior del filtro pasa-banda.

Las ventajas que proporciona el sistema de medición de DP de banda-ancha son:

- Distinguir la polaridad positiva y negativa de los impulsos de corriente de la DP.
- Alta capacidad de resolución para los impulsos de DP repetitivos. Con la típica duración de respuesta τ' del filtro entre $2 \mu S$ y $5 \mu S$, puede resolverse un impulso de DP con una frecuencia de 100 KHz.

Las desventajas del sistema de DP de banda-ancha son:

- Sensibilidad al ruido externo (no apropiado para laboratorios de HV no-protegidos).

4.3.2.2 NORMAS IEEE.

Las normas de IEEE requieren la medición de DP en “RIV” (RIV = Radio de voltaje de interferencia). Por medio de un filtro de “banda-angosta” se lleva a cabo la casi-integración de los impulsos de corriente de la DP.

La carga transferida (medida en μV) es el resultado de un proceso de compensación de la caída de voltaje ΔU en una de las capacitancias conectadas en paralelo C_t y la capacitancia de la boquilla $C_1 = C_K$.

El sistema RIV consta de un filtro pasa banda-angosto, el cual incluye el suplemento de circuito CISPR (curva psicométrica no lineal) para cuantificar las magnitudes de los impulsos repetidos. Las lecturas de este tipo de instrumento dependen tanto de la amplitud de carga aparente como del índice de repetición de los impulsos de DP (número de impulsos de DP por segundo).

Este sistema de medición de DP, consta de un filtro de banda-angosta con frecuencia de centro f_o variable y ancho de banda Δf . Los valores aceptados por IEEE son:

- Centro de frecuencia f_o entre 0.85–1.15 MHz (recomendados 1 MHz).
- Ancho de banda Δf entre 3-10 KHz (recomendados 9 KHz).

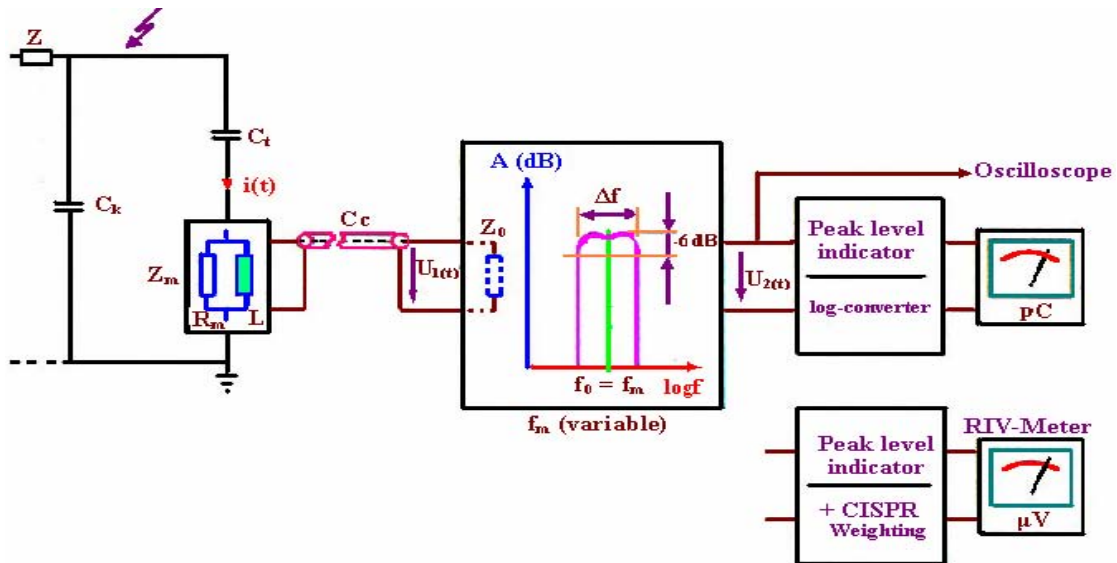
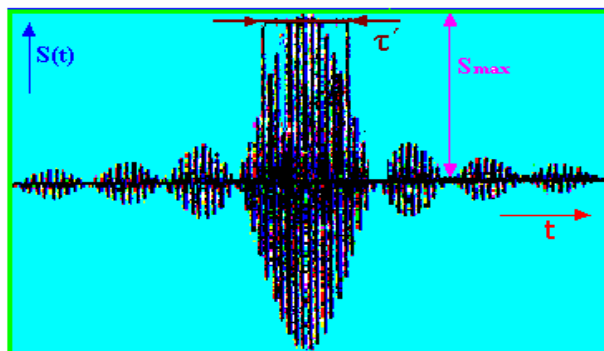


Figura 4.3.2.2.: Filtro pasa banda-angosto.

La amplitud S_{max} de la respuesta del filtro de banda-angosto debido a la excitación del impulso de corriente de DP es proporcional a la carga aparente q si la frecuencia de centro variable f_o del filtro corresponde al rango de frecuencia de la corriente de impulso donde $F(f) = F(0)$.



Donde:

S_{max} = Amplitud máxima $\sim q$.

τ' = Duración impulso
(respuesta del filtro).

Figura 4.3.2.2a: Respuesta típica del filtro pasa banda-angosto.

Las ventajas del sistema de DP de banda angosta son:

- a) Menos sensibilidad a las fuentes de DP externas (se puede usar en laboratorios de HV no protegidos).

Las desventajas del sistema de DP de banda-angosta son:

- a) No es posible distinguir la polaridad de los impulsos de DP (oscilación de la señal con la frecuencia de centro f_o).
- b) Baja capacidad de resolución de los impulsos repetitivos de DP, con la típica duración de respuesta del filtro $\tau' \sim 200 \mu S$ solamente un impulso de repetición de 4 KHz de frecuencia puede ser resuelta.

La duración de la respuesta del filtro de banda-angosta para la corriente de impulso de la DP puede ser calculada como:

$$\tau' = \frac{2}{\Delta f} \quad (4.6)$$

Donde:

τ' = Duración de impulso (respuesta del filtro).

Δf = Ancho de banda del filtro.

4.3.3 CALIBRACIÓN DEL CIRCUITO DE MEDICIÓN.

La calibración del circuito de prueba de DP se lleva a cabo usando un calibrador operado por batería. El calibrador consta de un generador de onda cuadrada con amplitud U_o regulable conectado en serie con un condensador pequeño C_o (C_o debe ser menor del 10% de C_K).

Para las mediciones de DP, el calibrador es conectado al otro lado de la boquilla ó al otro lado del condensador de acoplamiento conectado en paralelo con la boquilla. La calibración debe ser llevada a cabo por separado para cada boquilla.

Bajo la suposición que $C_o \ll C_K$, el impulso inyectado del generador de onda cuadrada corresponde a la carga q , que se fija a valores predeterminados (100 pC, 1000 pC, etc.) por el ajuste de la amplitud U_o .

IEC recomienda que el incremento de tiempo del impulso inyectado debe ser ≤ 60 ns, la amplitud U_o entre 2 y 50 V, polaridad seleccionable e índice de repetición de 100 Hz.

La ecuación básica para la determinación del nivel de carga aparente por el método directo de calibración es:

$$q_o = U_o.C_o \quad (4.7)$$

Donde:

q_o = Carga inyectada.

U_o = Voltaje regulable del generador de onda cuadrada.

C_o = Capacitancia de calibración.

4.3.4 SENSIBILIDAD DE LA MEDICIÓN DE DP.

La sensibilidad de la medición de DP (es decir, la carga aparente medible q_m en pC o la interferencia de voltaje en μV) está en función de los componentes del circuito de prueba; especialmente sobre el valor de la capacitancia de acoplamiento C_K (capacitancia de la boquilla) a la capacitancia del objeto de prueba C_t (sistema aislante del transformador).

Figura 4.3.4: Influencia del condensador de acoplamiento C_K sobre la sensibilidad de la medición.

Los procesos de transferencia de carga entre las capacitancias C_t y C_K causan una caída de voltaje residual ΔU_{res} . Si hay actividad de DP en el objeto de prueba (C_t), la carga real medible q_m liberada por la capacitancia de acoplamiento C_K se calcula como:

$$q_m = C_K \Delta U_{res} \quad (4.8)$$

La carga aparente q_t es:

$$q_t = C_t \Delta U_t = (C_t + C_K) \Delta U_{res} \quad (4.9)$$

La proporción de la carga real medible q_m y la carga aparente q_t (carga teóricamente medible) se define como:

$$\frac{q_m}{q_t} = \frac{C_K}{C_t + C_K} \quad (4.10)$$

Para mejorar la sensibilidad de la medición de la DP, debe ser instalada una capacitancia de acoplamiento C_K suficientemente grande, (ver fig. 4.3.4). En transformadores de potencia el valor de la capacitancia de acoplamiento del circuito de DP es determinado por el tipo de boquilla (de 200 a 600 pF).

La sensibilidad máxima para la detección de un impulso de corriente compensada $i(t)$ de DP es alcanzada para $C_K \gg C_t$ ($C_K = 100 C_t$). Cuando el valor de la capacitancia de acoplamiento C_K disminuye, la sensibilidad del circuito es reducida debido a la corriente mas baja compensada $i(t)$.

La capacitancia mínima de acoplamiento de cualquier circuito de prueba de DP es la capacitancia de pérdida C_s de los electrodos de alto voltaje (HV) a tierra. Un circuito de DP que usa una C_s como una capacitancia de acoplamiento tiene una sensibilidad muy baja debido a que $C_s \ll C_t$.

4.3.5 PROCEDIMIENTO DE MEDICIÓN DE DP.

El objetivo de esta prueba, es medir la magnitud de las descargas parciales internas en el transformador para comprobar que éstas no exceden el valor máximo normalizado ó el de garantía que disminuya su vida útil.

Esta prueba tiene por objeto comprobar el estado del aislamiento entre vueltas y entre las secciones que tienen un mismo devanado.

El procedimiento para la medición de DP es básicamente definido por el procedimiento de prueba de voltaje inducido.

La prueba se realiza induciendo en uno de los devanados del transformador bajo prueba (generalmente el de menos voltaje) una tensión tal que los volts/vuelta en el transformador sea dos veces la tensión nominal, de esta forma se logra que el aislamiento y secciones estén sujetos a esfuerzos dieléctricos correspondientes al doble de la tensión a la cual van a trabajar, es decir:

$$V_{\text{prueba}} = 2 V_{\text{nominal}} \quad (4.11)$$

En un circuito magnético la tensión inducida debido al flujo magnético en el núcleo será:

$$e_{\text{rms}} = 4.44 \Phi_{\text{max}} \cdot N \cdot f \times 10^{-8} \quad (4.12)$$

Donde:

Φ_{max} = Flujo máximo.

N = Numero de vueltas.

F = Frecuencia

El flujo máximo será:

$$\Phi_{\max} = \frac{E_{\text{rms}}}{4.44 N f \times 10^{-8}} \quad (4.13)$$

Por lo tanto, si la tensión se incrementa, el flujo en el transformador aumenta.

Como en esta prueba la tensión que se inducirá en el transformador será cuando menos dos veces la tensión nominal, el flujo debe limitarse para evitar la saturación del núcleo. Esto se logra incrementando la frecuencia.

Esta prueba se debe realizar con una frecuencia que tenga un valor mínimo de 120 c.p.s. y su tiempo de duración será el correspondiente a completar 7200 ciclos, es decir:

$$t = \frac{7200}{\text{Frecuencia empleada}} \quad (\text{Seg.}) \quad (4.14)$$

La frecuencia empleada es mayor que la de alimentación nominal, ya que si se mantiene ésta última, la corriente de excitación puede llegar a valores muy altos, por lo que se establece que la frecuencia mínima de esta prueba sea 120 c.p.s.

En un transformador trifásico esta prueba puede realizarse monofásicamente o trifásicamente, es decir; inducir el voltaje correspondiente de la prueba en una sola fase y sucesivamente en las restantes o en las tres al mismo tiempo.

La prueba se realiza alimentando al devanado de bajo voltaje, la tensión de prueba. Los otros devanados deben encontrarse en circuito abierto, el cambiador de derivaciones debe encontrarse en la posición de máximas vueltas efectivas. En la figura siguiente se muestra el circuito de medición de DP's.

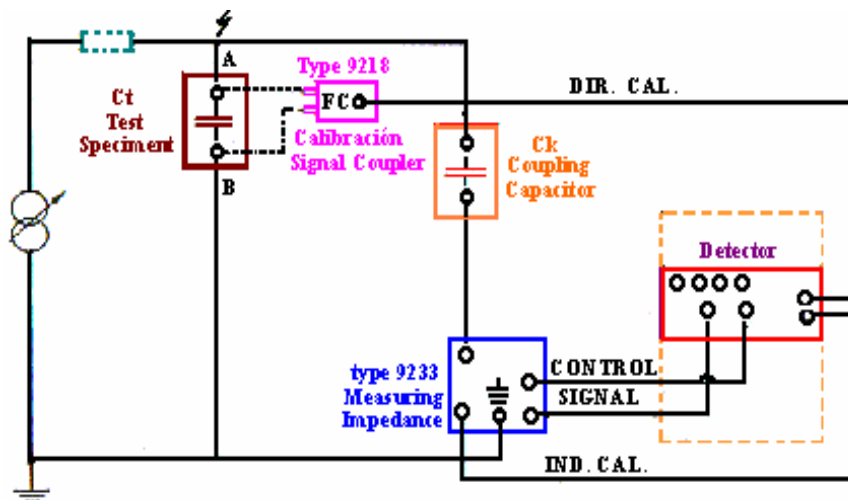


Figura 4.3.5: Circuito de medición de DP's.

En la siguiente tabla se indican los valores de prueba de voltaje inducido.

Niveles de aislamiento dieléctrico para transformadores de potencia clase II.						
Tensión nominal del sistema (KV).	Nivel básico de aislamiento al impulso por descarga atmosférica (NBAI)	Nivel de onda cortada	Nivel de impulso por maniobra (NBAIM)	Prueba de tensión inducida (fase a tierra)		Nivel de prueba de tensión aplicada (KV rcm)
				Nivel de una hora (kV rcm)	Nivel realizado (KV rcm)	
(KV)	(KV cresta)	(KN cresta)	(KV cresta)	(kV rcm)	(KV rcm)	(KV rcm)
Columna 1	Columna 2	Columna 3	Columna 4	Columna 5	Columna 6	Columna 7
15 y menor	110	120	-	-	-	34
25	150	165	-	-	-	50
34.5	200	220	-	-	-	70
46	250	275	-	-	-	95
60	250	275	-	-	-	95
	350	385	-	-	-	140
115	350	385	280	105	120	140
	450	405	375	105	120	185
	550	605	460	105	120	230
138	450	405	375	125	145	185
	550	605	460	125	145	230
	650	725	540	125	145	275
161	550	605	460	145	170	230
	650	715	540	145	170	275
	750	825	620	145	170	325
230	650	715	540	210	240	275
	750	825	620	210	240	325
	825	905	685	210	240	360
	900	990	745	210	240	395
400	1050	1155	870	210	240	460
	1300	1430	1080	365	415	-
	1425	1570	1180	365	415	-
	1550	1705	1290	365	415	-
	1675	1845	1390	365	415	-

Tabla 4.3.5: Niveles de aislamiento dieléctrico para transformadores de potencia clase II.

- Notas:
- 1.- Para pruebas de onda cortada, el tiempo mínimo de arqueado debería ser 3.0 μ S, excepto que para 110 KV NBAI este debería ser de 2.0 μ S.
 - 2.- A pesar de que la columna 4 establece los niveles de impulso por maniobra de fase a tierra, no siempre es posible probar a estos niveles en devanados de baja tensión.
 - 3.- Las columnas 5 y 6 indican los niveles de prueba de fase a tierra que se aplicarían a devanados en estrella. Cuando el nivel de tensión de prueba va a medirse fase a fase, como es el caso de devanados en delta, los niveles en la columna 5 deben multiplicarse por 1.732 para obtener el nivel de prueba de tensión inducida fase a fase requerida.
 - 4.- Los niveles de aislamiento para los devanados de alta y baja tensión de los transformadores de potencia clase II se deben seleccionar de acuerdo a esta tabla.
 - 5.- La prueba de tensión aplicada no es aplicable a las terminales de línea de los devanados en estrella, a menos que hayan sido especificados como apropiados para aplicaciones en sistemas no aterrizados.

La prueba se inicia energizando inicialmente el transformador con $\frac{1}{4}$ o menos de la tensión de prueba, incrementando la tensión en forma uniforme, llegando al valor de prueba en 15 segundos, sosteniendo la tensión durante el tiempo requerido para que se estabilice el voltaje, se toma la primera lectura después se aplica el realce de voltaje el cual deberá permanecer el tiempo previamente calculado y posteriormente se decrece la tensión en la misma forma. El transformador deberá soportar el valor de prueba durante 7200 ciclos De acuerdo con las normas IEC e IEEE.

La siguiente medición de DP's debe ser hecha en cada nivel de voltaje de prueba. En el siguiente formato se muestran los tiempos de prueba.

Testigo:			Orden de Trabajo:		
Probó:			Pedido:		
Hoja	Forma:				Fecha:
POTENCIAL INDUCIDO A 180 Hz. Norma Aplicada: NOM-J-169 Método de Prueba: Excitación monofásica en el devanado terciario.			MEDICIÓN DE DESCARGAS PARCIALES. Norma Aplicada: NOM-J-169 Método de Prueba: Medición de carga aparente en el devanado de A.T.		
	Señal cal.	Gan. Amp.	Lecturas (pC)		Constantes
			H		H
	100	100			1.00
	1000	1000			1.00
	Promedio de las constantes				1.00
KV en Terciario		kV en A.T.	Tiempo	Medición (pC)	Valores Corregidos (pC)
				H	H
21.6		365	10 Seg.	80	80
24.5		415	40 Seg.	380	380
21.6		365	0 min.	350	350
21.6		365	5 min.	280	280
21.6		365	10 min.	280	280
21.6		365	15 min.	280	280
21.6		365	20 min.	280	280
21.6		365	25 min.	280	280
21.6		365	30 min.	290	290
21.6		365	35 min.	290	290
21.6		365	40 min.	290	290
21.6		365	45 min.	290	290
21.6		365	50 min.	290	290
21.6		365	55 min.	290	290
21.6		365	60 min.	290	290
Ruido ambiente antes de la prueba				4	4
Ruido ambiente después de la prueba				70	70
Resultado: Satisfactorio			Garantía a 365 kV <= 300 pC		

Tabla 4.3.5a: Informe de pruebas del Transformador.

La prueba de DP's es considerada exitosa si la actividad ininterrumpida de DP no sobrepasa los valores establecidos por las normas y si no existe tendencia de incremento durante la prueba. Los valores aceptables recomendados de carga aparente dadas en las normas IEC son:

- a) 300 pC a 130% de U_m .
- b) 500 pC a 150% de U_m .
- c) El nivel de actividad de DP no debe exceder de 100 pC a 1.1 de U_m .

Donde:

U_m = Voltaje mas alto de acuerdo a IEC o voltaje r.m.s. fase a fase mas alto para el cual es diseñado el devanado del transformador.

4.4 DETECCIÓN ACUSTICA DE SEÑALES DE DESCARGAS PARCIALES.

Las técnicas acústicas detectan la actividad de descargas parciales por medio de sensores que se instalan en el tanque del transformador. Estos métodos además de medir la magnitud de las descargas pueden entregar la ubicación física de las fuentes de descargas parciales.

Una señal acústica, es una vibración mecánica en el medio elástico (onda acústica).

El método acústico, utiliza dos de los fenómenos producidos por las DP's. El primero, producto de la rápida transferencia de carga que se produce, provoca una perturbación eléctrica de alta frecuencia que se propaga a través del circuito externo.

El segundo, debido a la disipación de energía, la que provoca la generación de ondas sónica y ultrasónica, que se propagan a través del medio donde se produce la descarga parcial.

La perturbación eléctrica se propaga a una velocidad cercana a la de la luz (10^8 m/s) a través del circuito eléctrico y la velocidad de la onda sonora dependerá del medio por el cual se propague, pero en general mucho menor comparada con la perturbación eléctrica, esta diferencia de tiempo permite utilizar estos dos fenómenos para la localización de la descarga parcial. De esta forma, se puede considerar que la señal eléctrica aparece en los terminales del transformador instantáneamente. El intervalo de tiempo, será una medida de la distancia entre la descarga y el punto en el cuál se detecto la señal eléctrica.

En teoría, la fuente de DP actúa como un punto de origen de onda acústica. La intensidad de la onda acústica emitida es proporcional a la energía liberada durante la descarga.

$$\Delta W_1 = q_1 \Delta U_1 \quad (4.15)$$

Donde:

ΔW_1 = Energía liberada localmente.

ΔU_1 = Caída de voltaje local.

q_1 = Carga local.

La propagación de la señal acústica ocurre solo si la longitud de onda λ es pequeña comparada con la longitud de la trayectoria de propagación.

En un medio específico, la longitud de onda esta dada por:

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (4.16)$$

Donde:

λ = Longitud de onda.

v = Velocidad del sonido en un medio específico (en aceite 1400 m/s).

f = Frecuencia de la vibración mecánica (de onda acústica).

En el transformador, la propagación de la onda acústica es fuertemente influenciada por la estructura complicada del sistema aislante (barreras del devanado, núcleo y paredes del tanque), en donde la amplitud (atenuación) y la forma (absorción o dispersión) de la señal acústica emitida por una fuente de DP cambia a lo largo de su trayectoria de propagación.

Además del fenómeno de absorción y dispersión, en general dos tipos de ondas deben ser consideradas para el análisis de las señales acústicas de DP:

- a) **Ondas transversales.-** La atenuación esta en función del grosor de la pared.
- b) **Ondas longitudinales.-** Velocidad más alta que las ondas transversales (aproximadamente un factor de dos).

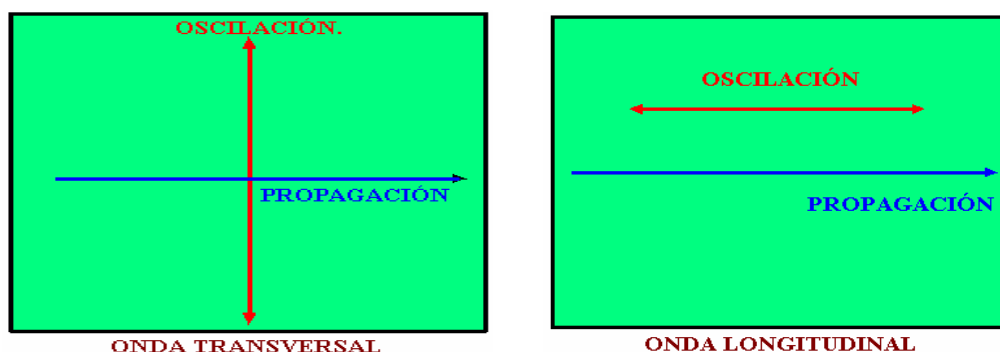


Figura 4.4: Representación esquemática de dos tipos de ondas acústicas.

Las trayectorias posibles de propagación de las ondas acústicas a partir de una fuente de DP en las paredes del tanque del transformador se muestran en la figura 4.4a. Las dos ondas (superpuestas) son creadas en una interfase por incidencia o por reflexión:

V_1 = velocidad de onda directa (en el aceite)

V_2 = Velocidad de onda en la pared.

Φ = Angulo de incidencia

Z = Distancia de la fuente de DP a la pared.

h = Grosor de la pared

$$\text{Sen } \Phi = \frac{V_1}{V_2} \quad (4.17)$$

La figura 4.4a: Posibles ondas acústicas en el sensor.

4.4.1 PROCEDIMIENTO DE MEDICIÓN.

Un mínimo de tres sensores acústicos (transductores piezoeléctricos) y un osciloscopio digital de cuatro canales son necesarios para localizar la fuente de DP.

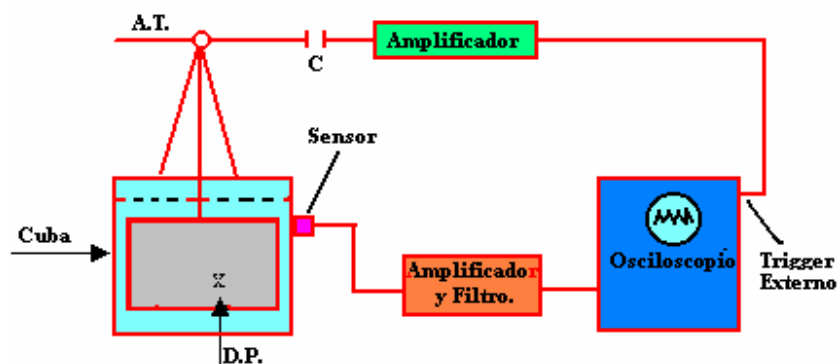


Figura 4.4.1: Esquema básico para un sistema de localización de DP's. por ultrasonido.

Los tres transductores (cristales piezoeléctricos) son colocados cerca uno del otro (triángulo equilátero con $L=0.15$ m) con el propósito de que la trayectoria de propagación de la onda acústica sea casi la misma.

Los sensores ultrasónicos transforman las emisiones ultrasónicas provenientes de los eventos en el interior del transformador y que inciden sobre sus paredes, en señales de tensión, las cuales son directamente proporcionales en amplitud y frecuencia a las señales ultrasónicas. Estas señales de tensión, son transmitidas a través de cables triaxiales hacia el acondicionador de señales, el cual acopla las señales proporcionadas por los sensores con el equipo de registro, los acondicionadores de señales transmiten vía cables coaxiales, las señales ya acondicionadas hacia un osciloscopio digital; el cual registra, almacena y procesa la información emitida por los sensores.

- 1.- Se colocan los sensores en la pared del tanque del transformador, se realiza un monitoreo ultrasónico por las cuatro caras del mismo.
2. Si en la posición inicial en la que se colocan los sensores no se detectan emisiones ultrasónicas después de un período corto de monitoreo, se realiza un barrido a lo largo de toda esa cara del transformador, cambiando los sensores a diferentes posiciones sobre la cara. Este procedimiento se repite en las demás paredes del mismo.
3. Al detectar emisiones ultrasónicas en alguna de las caras del transformador, se localiza el punto donde exista la mayor actividad ultrasónica, en este punto, la señal con menor tiempo de arribo tendrá por consecuencia una distancia menor al punto de emisión ultrasónica (fuente de DP).
4. Se toma como referencia esta señal, manteniendo la posición del sensor correspondiente y desplazando los otros sensores a distintas posiciones, de esta forma se podrá encontrar otra señal con un nuevo tiempo de arribo menor que el anterior y de mayor amplitud, lo cual indicaría que el punto de ubicación del sensor de esta nueva señal estará mas cerca del punto de emisión ultrasónica.
5. Se obtiene el espectro de frecuencia de las señales monitoreadas, a fin de determinar la frecuencia característica de las señales obtenidas y determinar si corresponden a señales generadas por eventos de DP's.
6. Con esta metodología, es posible estimar la localización aproximada de la DP's.

La ubicación de la fuente de DP en el sistema aislante, es calculada a partir del retraso de tiempo entre las señales eléctricas y acústicas de DP, usando el método de triangulación. Este método es aplicable para ondas directas; es decir, ondas acústicas propagadas a través del aceite solamente.

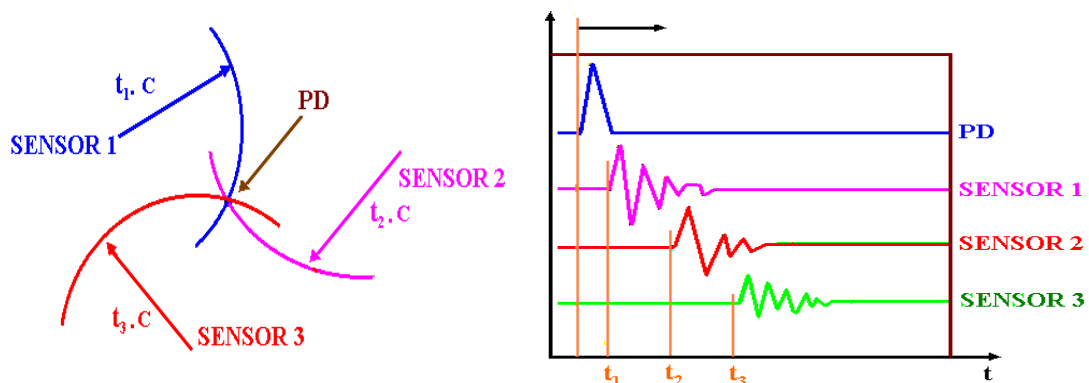


Figura 4.4.1.1: Localización de la fuente de DP, usando el método de triangulación.

Donde:

C = Velocidad de onda acústica.

t_1, t_2, t_3 = Tiempo de llegada de la señal en el sensor.

El análisis de la diferencia de tiempo entre las señales eléctricas y acústicas de DP, nos da posibilidad de distinguir entre la onda propagada directamente y la onda propagada en la pared para detectar las fuentes de DP. En teoría esta información esta oculta en el frente de onda de la señal acústica.

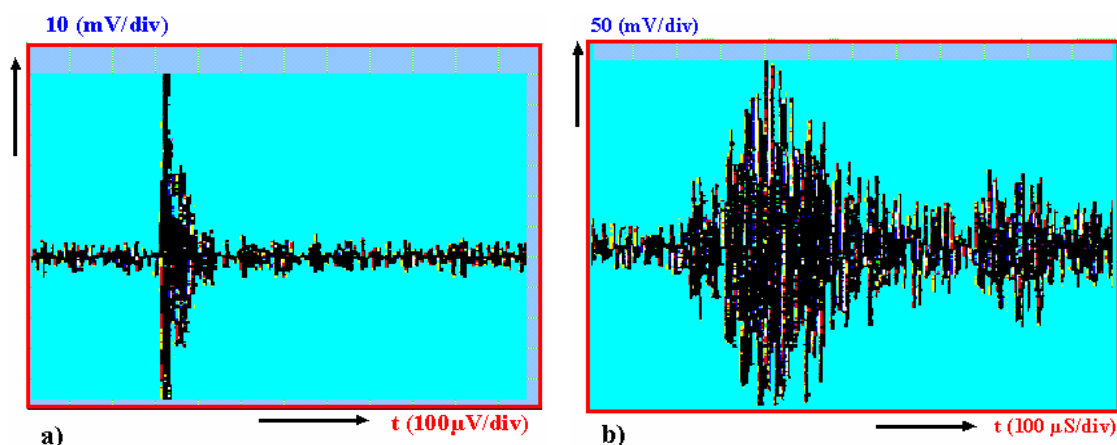


Figura 4.4.1.2: Análisis de ondas acústicas de fuentes de DP: a) Detección de onda acústica directa (a través del aceite), b) Detección de onda acústica reflejada u onda propagada a través de diferentes medios.

El procedimiento para localizar la fuente de DP, usando los resultados del detector de DPs. se da a continuación:

- Una decisión es tomada si una onda directa o una onda en la pared fue detectada por el análisis de la forma de la señal detectada.
- La “velocidad aparente”, es calculada por la expresión aproximada para distinguir entre la onda directa y la onda en la pared.

$$V_{aPP} = \frac{L}{\sqrt{\frac{2}{3} \left[(t_1 - t_2)^2 + (t_2 - t_3)^2 + (t_1 - t_3)^2 \right]}} \quad (4.18)$$

Donde:

L = Distancia entre transductores.

t_1, t_2, t_3 = Diferencia de tiempo entre las señales eléctricas y acústicas para los tres transductores.

- La velocidad aparente V_{app} es comparada con las velocidades del sonido en materiales relevantes para el sistema aislante del transformador, ver tabla 4.4.1.

MATERIAL	VELOCIDAD (M/S)	DENSIDAD (Kg./m ³)
Aceite	1400	950
Pressboar	2000 (paralelo a la fibra)	1250
Pressboar	3500 (perpendicular a la fibra)	1250
Acero, Placa	3200 (onda transversal)	7900
Acero, Placa	5200 (onda longitudinal)	7900

Tabla 4.4.1: Ejemplo de velocidades del sonido.

Existen tres condiciones diferentes para calcular la velocidad aparente V_{app} :

$V_{app} > V_{transversal} \geq$ Onda directa con ángulo de incidencia superficial.

$V_{app} \approx V_{transversal} \geq$ Onda transversal.

$V_{app} < V_{transversal} \geq$ No debe ocurrir (en paredes delgadas).

Nota: La velocidad aparente V_{app} siempre es más alta que V_{oil} (1400 m/s).

- Una vez localizada la zona de mayor actividad ultrasónica (punto de falla), es necesario revisar los planos de diseño del transformador, que aunado a la experiencia del ingeniero de campo, permite determinar las partes involucradas en la posible falla, así como la gravedad del problema y tomar las acciones correspondientes en caso de ser requeridas.
- Las acciones a tomar pueden ser programar una inspección visual, sacar de operación la unidad, realizar pruebas eléctricas adicionales, reducir la carga que alimenta para no acelerar el proceso de degradación y/o tomar muestras periódicas del aceite aislante a fin de monitorear la evolución de la falla.

4.4.2 SENSIBILIDAD DE LA MEDICIÓN.

Localizar los defectos de DP que emite la onda acústica directamente en el aceite, similar a una partícula metálica aparente sobre la superficie, puede ser detectada fácilmente (amplitud de carga aparente > 100 pC).

Los defectos de DP ocultos en el aislamiento sólido similar a una partícula metálica en el aislamiento, son muy difíciles de detectar (amplitud de carga aparente > 1000 pC), debido a las diferentes velocidades de propagación en materiales diferentes y debido al fenómeno de reflexión de la onda acústica en el sistema aislante del transformador.

La detección de señales acústicas de DP, deben ser llevadas a cabo en un nivel de voltaje de prueba cerca del inicio de la fuente de DP para conseguir una correlación confiable entre las señales de DP eléctricas y acústicas. En el voltaje de prueba mas alto el número de impulsos de DP por ciclo generalmente aumenta y es posible que admitan a fuentes de DP adicionales.

4.5 PROCEDIMIENTO PARA LA INVESTIGACIÓN DE FUENTES DE DP.

Si se detecta que la actividad de DP's sobrepasa los límites establecidos por las normas, las reglas de calidad o los requisitos del cliente, el tipo de fuente de DP's y su ubicación (externa o interna en el aislamiento) debe ser investigada. El procedimiento para investigar la fuente de DP debe ser adaptado al comportamiento de la actividad de DP registrada.

4.5.1 INVESTIGACIÓN DE FUENTES EXTERNAS DE DP's.

El primer paso es excluir todas las fuentes posibles de DP's. Las típicas fuentes externas de DP son:

- a) Partículas conductoras sobre la superficie de la boquilla.
- b) Puntas agudas no protegidas sobre el transformador o en el circuito de prueba.
- c) Malas conexiones sobre electrodos protegidos.
- d) Objetos metálicos no aterrizados cerca del transformador.
- e) Ruido o DP interna de la fuente de voltaje de alimentación.

Las descargas eléctricas en aire (corona) generadas por la punta de los electrodos pueden ser detectadas usando un detector ultrasónico portátil (pistola corona). Un problema de DP en la fuente de voltaje puede ser fácilmente verificado midiendo la fuente de voltaje por separado.

4.5.2 INVESTIGACIÓN DEL TIPO DE FUENTE DE DP.

Un tipo de fuente de DP es definido por su comportamiento estadístico específico (modelo de DP). El comportamiento estadístico de la fuente de DP es influenciado por la disponibilidad de los electrones libres que provocan una descarga eléctrica en la región débil del sistema aislante del transformador. La disponibilidad de los electrones libres esta en función de la fuente misma de DP (material conductor o no conductor) y sobre la posición de la fuente de DP con respecto al electrodo metálico.

La estructura de los sistemas aislantes extendidos, como los del transformador, lentamente atenúan la amplitud de los impulsos de corriente interna de la DP, pero no cambian su comportamiento estadístico.

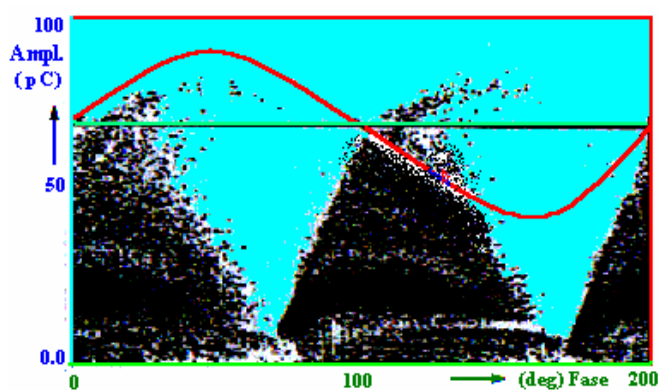


Figura 4.5.2: Registro de impulsos de DP (burbujas y descarga superficial); sistema de DP avanzado (análisis estadístico de los impulsos de DP).

Un sistema avanzado o un sistema convencional de DP, son utilizados para grabar un modelo de DP. El sistema avanzado realiza un análisis estadístico y produce un modelo de DP. En el voltaje de prueba específico, la actividad de DP es gravada como una función de la posición de fase (ángulo) y de la amplitud de carga aparente (analizador multicanal bidimensional). La tercera dimensión (color) indica el número total de los impulsos de DP coleccionados durante el tiempo de medición programado.

Para el análisis estadístico de una fuente de DP se necesita un mínimo de 3000 ciclos (para 50 Hz el tiempo de medición programado debe ser 60 segundos).

Un sistema convencional de DP entrega información de la resolución de fase acerca de la actividad de la DP sólo en un ciclo.

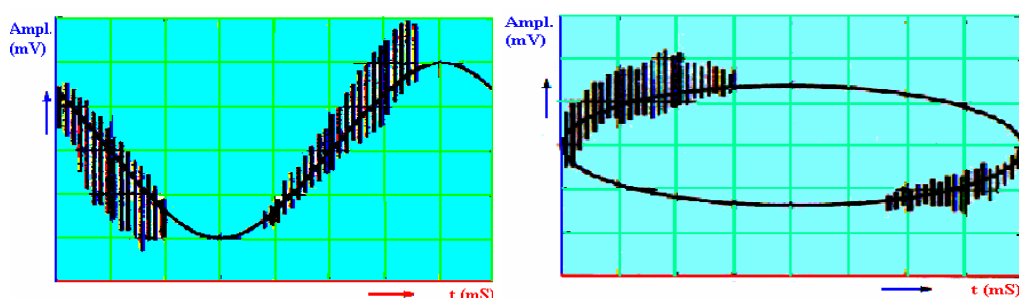


Figura 4.5.2a: Registro de los impulsos de DP (burbujas y descargas superficiales), del sistema convencional de DP en un ciclo.

El análisis de resolución de fase de DP, es importante para la identificación del tipo de fuente de DP por las siguientes razones:

- Los modelos de DP identifican un tipo específico de fuente de DP. (Ver tablas 4.5.2b,c,d).
- Los modelos de DP no son influenciados por la función de transferencia de señal del sistema aislante (el comportamiento estadístico no cambia).
- Los modelos de DP pueden ser usados para distinguir entre los defectos superpuestos de DP a base del comportamiento estadístico diferente.

Para investigar las fuentes de DP, el primer modelo de DP debe ser grabado bajo las condiciones de prueba siguientes:

- a) Voltaje de inicio de la fuente de DP.
- b) 10% encima del voltaje de inicio.
- c) Voltaje de extinción de la fuente de DP.

El análisis del modelo de DP esta basado en comparar el modelo de DP real grabado con los tipos de modelos de DP representados en la tabla 4.5.2. Las características básicas que deben ser analizadas del modelo de DP son:

- a) La posición de fase de las señales de DP.
- b) La simetría de las señales de DP durante el seno de la onda positiva y negativa.
- c) Número de señales de DP por ciclo.
- d) Reproducibilidad del modelo de DP.

La interpolación y revisión correcta de los resultados del tipo de modelo de DP a partir del modelo real de DP, requieren de experiencia y una capacidad de interpolación fuerte.

Descripción de la fuente de DP.	Dibujo esquemático de la fuente de DP.	Modelo típico de DP.
Material conductor (punta de electrodo) con contacto directo al electrodo metálico.		MODELO DE DP TIPO 1
Material conductor sin ningún contacto al electrodo metálico.		MODELO DE DP TIPO 2
Material no conductor (cavidad) con contacto directo al electrodo metálico		MODELO DE DP TIPO 3
Material no conductor (cavidad) sin ningún contacto al electrodo metálico.		MODELO DE DP TIPO 4
Material no conductor (cavidad) sin ningún contacto al electrodo metálico con cambios en la superficie debido a la descarga parcial.		MODELO DE DP TIPO 5

Tabla 4.5.2: Modelos típicos de DP (fuentes típicas de DP en el sistema aislante del transformador).

Las tablas 4.5.2 b,c,d), muestra las fuentes típicas de DP en el sistema aislante del transformador junto con su modelo de DP y su comportamiento durante la prueba:

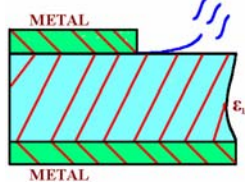
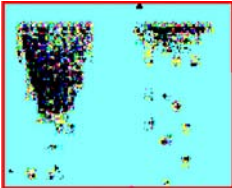
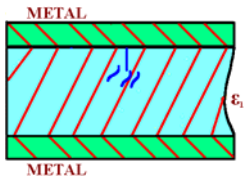
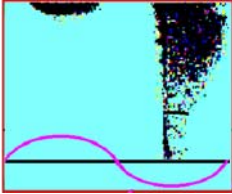
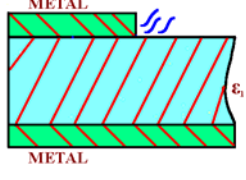
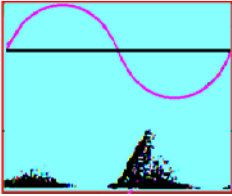
Descripción del defecto de DP.	Dibujo esquemático de la fuente de DP.	Medición del modelo de DP: electrodo de punta dentro del aceite.	Comportamiento típico durante la prueba.	Procedimiento recomendado.
Punta del electrodo dentro del aceite.			Demora en el inicio de la DP. Cambio del modelo de DP.	Condición de la punta del electrodo por la prueba de larga duración. Atención: podría causar una falla eléctrica.
Punta del electrodo dentro del material aislante sólido.			Cambio del modelo de DP. Pueden generarse huellas carbonizadas. Modelo de DP tipo 5.	Prueba de larga duración para la observación del comportamiento del modelo de DP. Atención: puede ocurrir una falla eléctrica.
Punta del electrodo sobre la superficie del material aislante sólido.			Cambio del modelo de DP. Descargas superficiales. Modelo de DP tipo 5 Pueden generarse huellas carbonizadas.	Prueba de larga duración para la observación del comportamiento del modelo de DP. Atención: puede ocurrir una falla

Tabla 4.5.2b: Fuentes típicas de DP en el sistema aislante del transformador, material conductor = modelo de DP tipo 1.

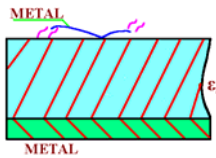
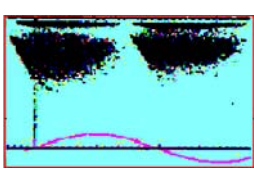
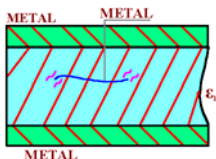
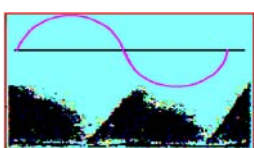
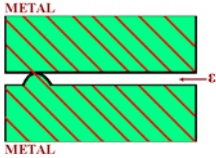
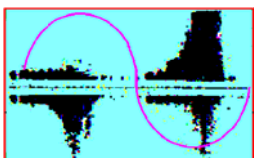
Descripción del defecto de DP.	Dibujo esquemático de la fuente de DP.	Medición del modelo de DP: electrodo de punta dentro del aceite.	Comportamiento típico durante la prueba.	Procedimiento recomendado.
Partícula conductora dentro del aceite.			Demora en el inicio de la DP. Cambio de modelo de DP.	Condición de la punta del electrodo por la prueba de larga duración. Atención: podría causar una falla eléctrica.
Partícula conductora dentro del material aislante.			Cambio de modelo de DP. Pueden generarse huellas carbonizadas. Modelo de DP tipo 5.	Prueba de larga duración para la observación del comportamiento del modelo de DP. Atención: puede ocurrir una falla eléctrica.
Mal contacto.			Cambio de modelo de DP. Descargas superficiales. Modelo de DP tipo 5 Pueden generarse huellas carbonizadas.	Prueba de larga duración para la observación del comportamiento del modelo de DP. Atención: puede ocurrir una falla

Tabla 4.5.2c: Defectos típicos de DP en el sistema aislante del transformador, material conductor = modelo de DP tipo 2.

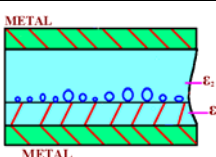
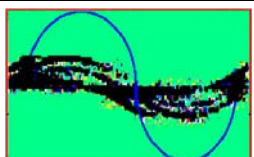
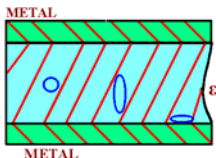
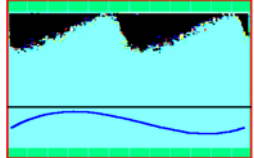
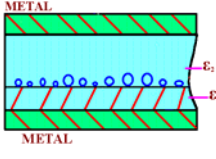
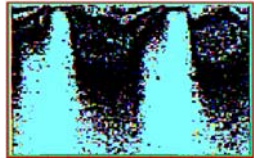
Descripción del defecto de DP.	Dibujo esquemático de la fuente de DP.	Medición del modelo de DP: electrodo de punta dentro del aceite.	Comportamiento típico durante la prueba.	Procedimiento recomendado.
Burbujas en el aceite.			Demora en el inicio de la DP. Cambio del modelo de DP.	Condición de la punta del electrodo por la prueba de larga duración. Atención: podría causar una falla eléctrica.
Burbujas en el material aislante sólido (papel, Cartón prensado y pegamento).			Cambio del modelo de DP. Pueden generarse huellas carbonizadas. Modelo de DP tipo 5.	Prueba de larga duración para la observación del comportamiento del modelo de DP. Atención: puede ocurrir una falla
Burbujas debido a la humedad del sistema aislante (humedad local).			Cambio del modelo de DP. Descargas superficiales. Modelo de DP tipo 5 Pueden generarse huellas carbonizadas.	Prueba de larga duración. Observar el comportamiento del modelo de DP. Atención: puede ocurrir una falla

Tabla 4.5.2d: Defectos típicos de DP en el sistema aislante del transformador; burbujas = modelo de DP tipo 3 y 4.

4.6 INVESTIGACIÓN DETALLADA DE FUENTES DE DP.

Una investigación detallada de la fuente de DP va mas allá de los requisitos especificados en las normas IEC e IEEE. Este procedimiento es adaptado al comportamiento de la fuente de DP. El objetivo de la investigación, es encontrar la fuente de DP tan pronto como sea posible.

La investigación detallada de la fuente de DP requiere el siguiente equipo:

- a) **Transformador de corriente de alta frecuencia (HF CT, 100 KHz-30MHz):** Se utiliza como una impedancia de medición Z_m para detectar los impulsos de corriente real de DP. Los HF CTs son conectados a cada boquilla del transformador (multi-terminal de medición).
- b) **Analizador de espectro:** Se utiliza para analizar los impulsos de corriente de DP en el dominio de la frecuencia para la localización de las fuentes de DP y como un filtro pasa-banda variable (casi-integración de los impulsos de corriente de DP) para detectar señales de DP como el procesador frontal del sistema de DP avanzado.
- c) **Sistema avanzado de DP:** El ICM o el ICMsys8, se utiliza para grabar y analizar el comportamiento estadístico de la señal de DP para la investigación del tipo de fuente de DP.
- d) **Osciloscopio Digital:** Se utiliza como un dispositivo de control para señales digitalizadas y como un dispositivo analizador para señales de resolución de tiempo, cuando se localiza la actividad de DP.

4.6.1 INVESTIGACIÓN DE LA FUENTE DE DP.

La investigación de la fuente de DP debe ser llevada a cabo en la siguiente secuencia:

- a) Análisis del espectro de frecuencia de los impulsos de corriente de la DP.
- b) Análisis de los modelos de DP (análisis estadístico de la señal de DP).
- c) Localizar la fuente de DP usando el análisis de las señales eléctricas de DP en el dominio de la frecuencia.
- d) Localizar la fuente de DP usando el análisis de las señales eléctricas en el dominio del tiempo.

Los pasos mencionados anteriormente deben repetirse en los siguientes niveles de voltaje de prueba:

- a) En el voltaje de inicio de la fuente de DP.
- b) En el voltaje de extinción de la fuente DP.
- c) En diferentes niveles de voltaje de prueba hasta el nivel de voltaje de prueba requerido.
- d) Como una función del tiempo del voltaje aplicado.

El análisis de los resultados, se basa principalmente en comparar el comportamiento real de la señal de DP con el comportamiento característico del sistema aislante específico. El comportamiento característico del sistema aislante del transformador bajo prueba, debe ser definido por un procedimiento de calibración especial.

4.6.2 LOCALIZACIÓN DE LA FUENTE DE DP.

La localización de las fuentes de DP's (impulsos de corriente de DP) se basa en la siguiente teoría:

Las señales de DP (impulsos de corriente de DP), se propagan a partir de la fuente de DP a través de la red RLCM del transformador, La respuesta de esta red a la excitación por una corriente de impulso de DP en cualquier ubicación en el sistema de aislamiento, puede solamente ser detectado en las boquillas. Los impulsos de corriente de DP real medidos en las boquillas, son comparados con los valores característicos obtenidos durante el procedimiento de calibración tanto en el dominio del tiempo como en el dominio de la frecuencia.

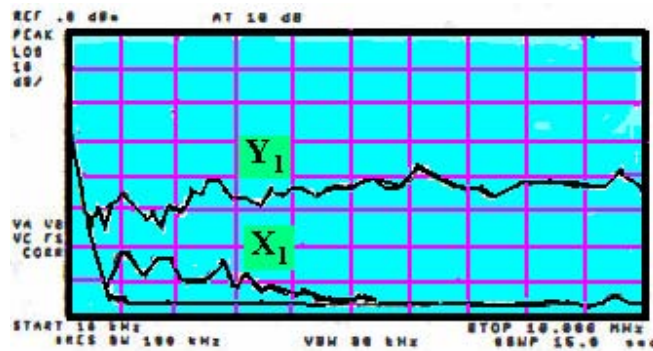
4.6.3 ANÁLISIS DE LOS IMPULSOS DE CORRIENTE DE DP EN EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA.

Para definir totalmente la condición de ruido de fondo del circuito de prueba (espectro de frecuencia de fondo), el primer registro de datos, se lleva a cabo usando un analizador de espectro en aproximadamente un 10% de U_r en todas las boquillas. El espectro de frecuencia de fondo sirve como base para la identificación de la actividad repetida de la DP detectada en la boquilla específica.

Para cada nivel de voltaje siguiente, los espectros de frecuencia son verificados y comparados con el espectro de frecuencia en cada boquilla. Cualquier actividad de DP en el circuito de prueba genera un cambio en el ruido de fondo del espectro de frecuencia (interpretación visual).

La corriente de impulso de la DP en el dominio de la frecuencia detectada en la boquilla puede ser caracterizada por dos espectros de frecuencia:

- Espectro de frecuencia típico generado por señales muy rápidas (cerca del grifo de medición).
- Espectro de frecuencia típico generado por señales de DP atenuadas (dentro del sistema aislante).

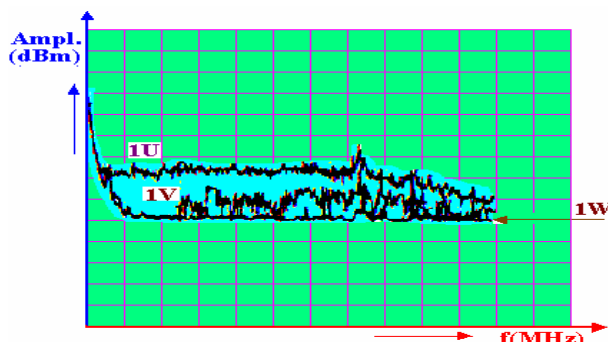


X_1 = Acoplamiento vía la red RLCM.

Y_1 = Medición cerca de la parte superior.

Figura 4.6.3: Análisis de la señal de DP en el dominio de la frecuencia.

Las señales de DP cerca de la boquilla, generan un espectro de frecuencia similar a la señal de calibración



$1U$ = Fuente de DP cerca del boquilla.

$1V$ = Señal de DP acoplada de la fase U.

$1W$ = Ruido de fondo.

Fig. 4.6.3a: Señal de DP real en el dominio de la frecuencia detectadas en diferentes boquillas.

Las señales de DP transferidas a la boquilla vía la red RLCM del sistema aislante del transformador generan un espectro con resonancias definidas.

Las características básicas del espectro de frecuencia que deben ser analizadas son:

- Amplitud del espectro de potencia en dBm.
- Rango de frecuencia del espectro de potencia.
- Resonancias típicas.
- Reproducibilidad del espectro de potencia.

La comparación de los espectros de frecuencia de la señal de DP con los resultados de la caracterización del transformador, da la primera indicación de la localización de la fuente de DP.

Nota: El análisis de la señal de DP en el dominio de la frecuencia se lleva a cabo solo para señales repetitivas. Las señales de DP eventuales pueden ser registradas con un detector de pico máximo (sistemas de medición de DP convencional o avanzado).

4.6.4 ANALISIS DE LOS IMPULSOS DE CORRIENTE DE DP EN EL DOMINIO DEL TIEMPO.

Los impulsos de corriente de DP, son también analizados en el dominio del tiempo (osciloscopio). La amplitud más alta de la corriente de DP, es usada como un disparador de señal para el osciloscopio (canal de HV) y la respuesta de la red RLCM en todas las boquillas es analizada en forma sistemática en el segundo canal (NT). La grabación simultánea adicional de cuatro canales específicos pueden ser usados para confirmar los resultados previos.

Las señales de corriente de DP grabadas en el dominio del tiempo, son comparados con las señales calibradas (interpretación visual). Las señales de DP cerca de la boquilla, generan una señal de resolución de tiempo similar a la señal calibrada.

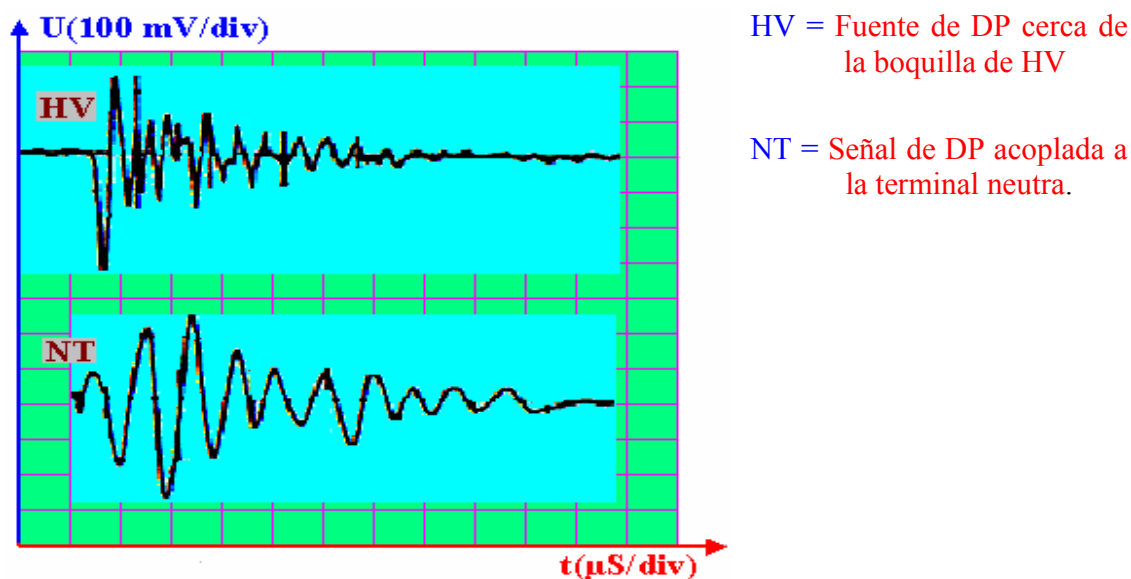


Figura 4.6.4: Señal de DP real en el dominio del tiempo.

Las señales de DP transferidas a la boquilla vía la red RLCM del sistema aislante del transformador, generan una señal de resolución de tiempo que es comparable con la respuesta del filtro RLC.

Las características básicas de la señal de DP de resolución de tiempo, que deben ser analizadas son:

- a) Amplitud máxima de la señal de corriente de DP en mV.
- b) Incremento de tiempo de la señal de corriente de DP.
- c) Oscilaciones de las señales de corriente de DP.
- d) Reproducibilidad de las señales de corriente de DP.

La comparación de las señales de DP grabadas en el dominio del tiempo con los resultados de la caracterización del transformador, da la segunda señal de la localización de la fuente de DP.

Nota: En el caso de fuentes de DP superpuestas, es posible distinguir entre dos diferentes señales de corriente de DP cambiando el nivel del disparador.

4.6.5 ANÁLISIS FINAL DE LOS RESULTADOS.

Todos los resultados grabados durante la investigación de la fuente de DP bajo condiciones diferentes de prueba, debe ser analizado (una persona experimentada toma al menos 4 horas).

El análisis de todos los resultados, identificará el tipo de fuente de DP (modelo de DP), dará la información sobre la ubicación del defecto de DP y proveerá una idea básica de que tan peligroso es la fuente de DP para el sistema aislante del transformador.

El comportamiento de la fuente de DP durante el procedimiento de investigación, permite distinguir entre fuentes peligrosas y fuentes no peligrosas de DP. La amplitud de la carga aparente no es siempre un criterio significativo para esta decisión.

Las fuentes peligrosas de DP para el sistema aislante del transformador son:

- a) Fuente de DP con voltaje de inicio debajo del 100% de U_r .
- b) Fuente de DP con voltaje de extinción debajo del 100 de U_r .
- c) Fuente de DP oculta en el aislamiento sólido.
- d) Fuente de DP con cambio ininterrumpido en el modelo de DP.
- e) Fuente de DP donde la amplitud de carga aparente aumenta con el tiempo del voltaje aplicado.
- f) Fuente de DP donde el número de señales de DP por ciclo aumenta con el tiempo del voltaje aplicado.

Las fuentes menos peligrosas de DP para el sistema aislante del transformador son:

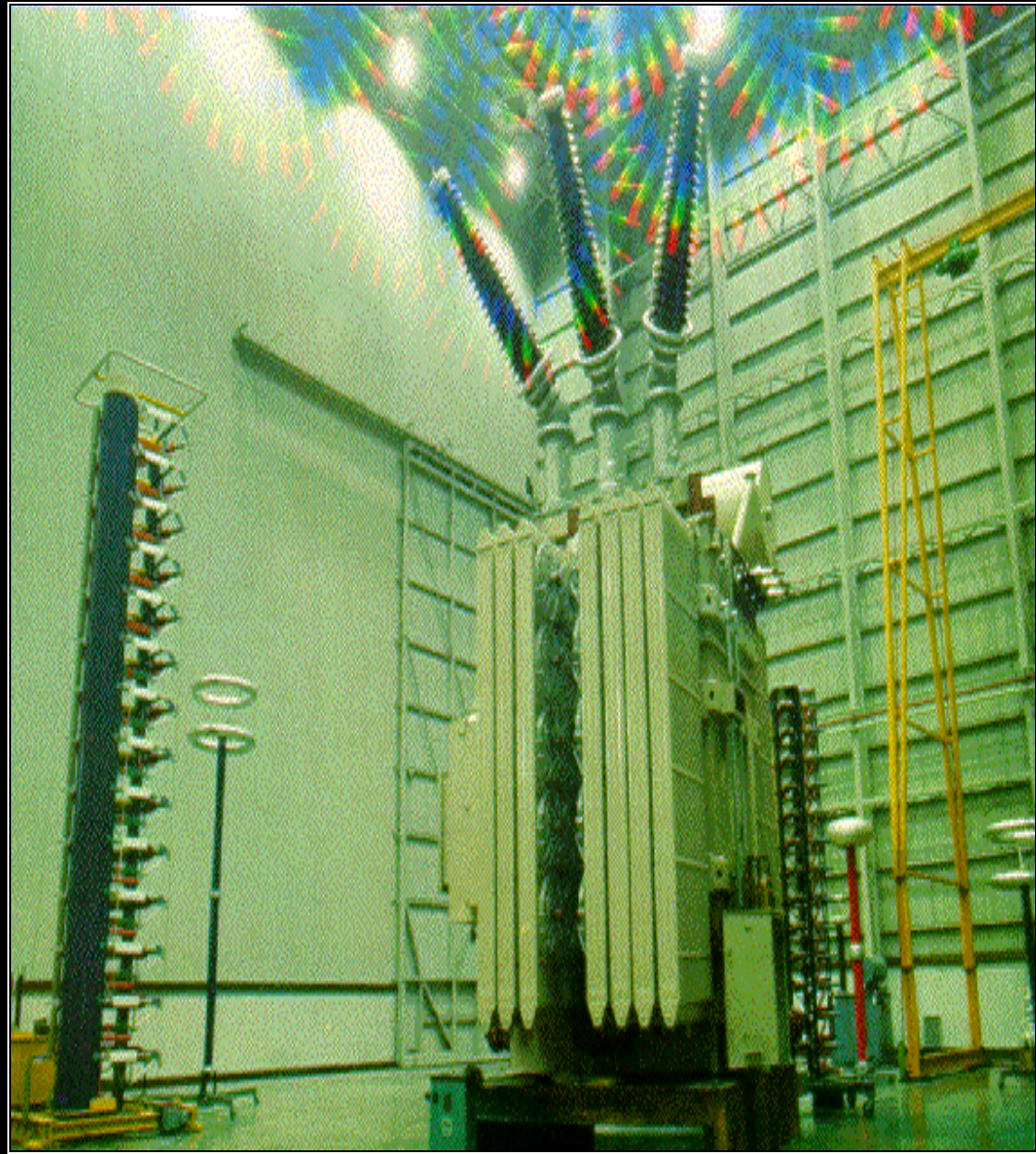
- a) Fuente de DP con suministro de voltaje por encima del nivel de protección.
- b) Fuente de DP con voltaje de extinción por encima del 100% de U_r .
- c) Burbujas de gas en el aceite.
- d) Fuente de DP con un modelo de DP constante.
- e) Fuente de DP donde el número de señales de DP por ciclo disminuye con el voltaje aplicado.

La solución exitosa del problema de DP puede ser alcanzado por la discusión de los resultados con los ingenieros de diseño para encontrar la causa verdadera de la fuente de DP. Dependiendo de los resultados del debate, los próximos pasos en el procedimiento será:

- a) Calibración adicional.
- b) Investigación adicional de la fuente de DP en laboratorio de HV.
- c) Condicionar la fuente de DP.
- d) Resecar la protección del transformador.
- e) Modificar la región débil identificada (causa del defecto de DP).
- f) Desarmar el transformador.

CAPITULO QUINTO.

EJEMPLO DE APLICACIÓN.



CAPITULO QUINTO.

EJEMPLO DE APLICACION.

Detección y localización de descargas parciales utilizando el método ultrasónico en un transformador de 860 MVA, 345 KV.

5.0 PROCEDIMIENTO DE MEDICIÓN.

Al realizar la prueba de voltaje inducido con medición de descargas parciales utilizando el método convencional, conectando en las boquillas de H.V. impedancias de medición, se detectó la presencia de descargas parciales superiores a los valores establecidos por las normas de calidad.



Figura 5.0: Transformador en el piso de pruebas.

5.1 PROCEDIMIENTO PARA LOCALIZAR LA FUENTE DE DESCARGAS PARCIALES.

Para localizar la fuente de DPs se utilizó el método acústico. Se instrumentaron tres sensores ultrasónicos distribuidos en la cubierta del transformador (ver figura 5.2). Después de monitorear las señales recibidas y cambiar repetidamente de posición a los sensores se logro confinar a una determinada área la fuente de DPs.

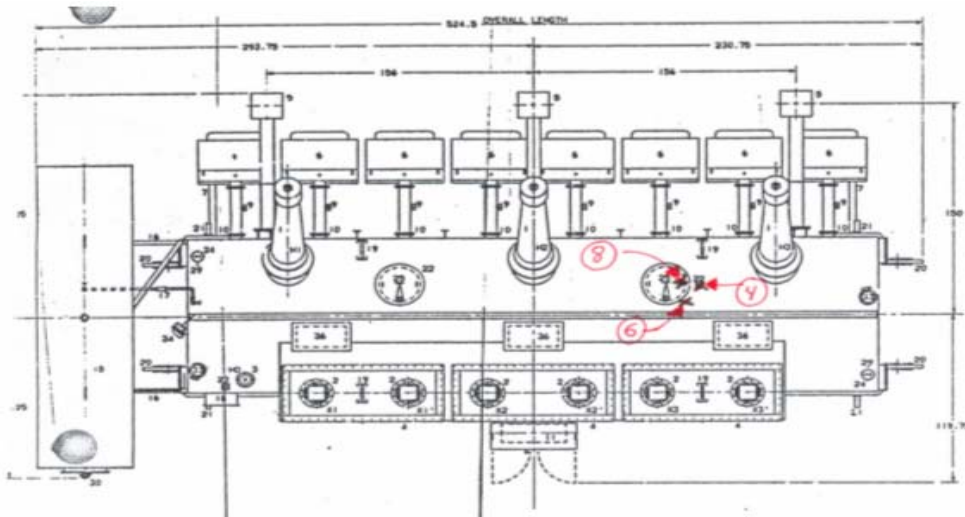


Figura 5.1: Ubicación de los sensores en el dibujo del transformador.

Las señales acústicas emitidas por los sensores y la señal eléctrica son recibidas en el osciloscopio del equipo detector de descargas parciales. El tiempo de aparición de la señal eléctrica y las señales acústicas representa el tiempo que le toma a la onda acústica en viajar desde donde se produce la descarga hasta los sensores. (Ver figura 5.2a).

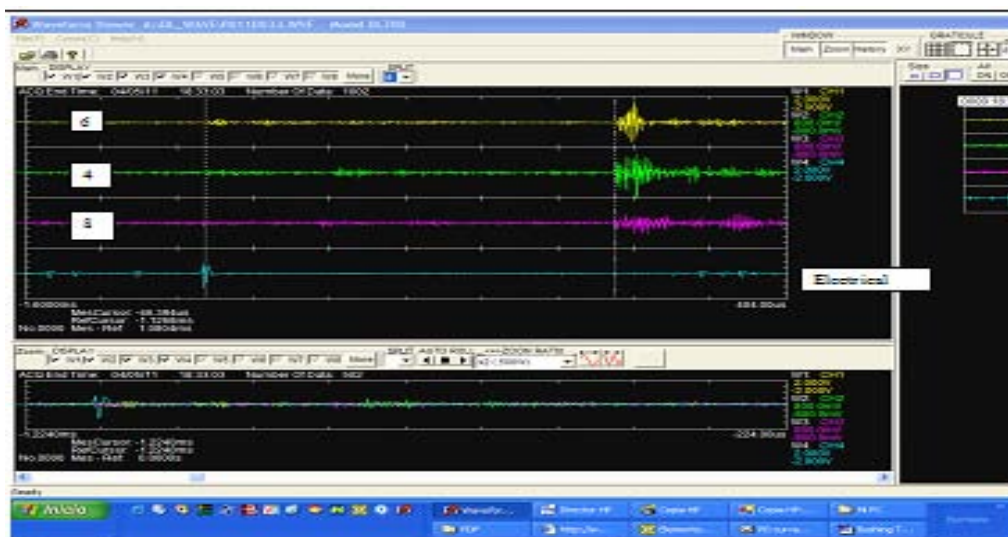


Figura 5.1a: Señales acústicas y eléctrica en el osciloscopio digital.

En base al análisis del comportamiento estadístico de la señal de DPs, se obtiene un modelo de la descarga parcial, posteriormente se hace una comparación con los modelos propuestos en el capítulo cuatro, en base a esta comparación podemos determinar el tipo de falla; en este caso en particular se trató de partículas metálicas dentro del material aislante.

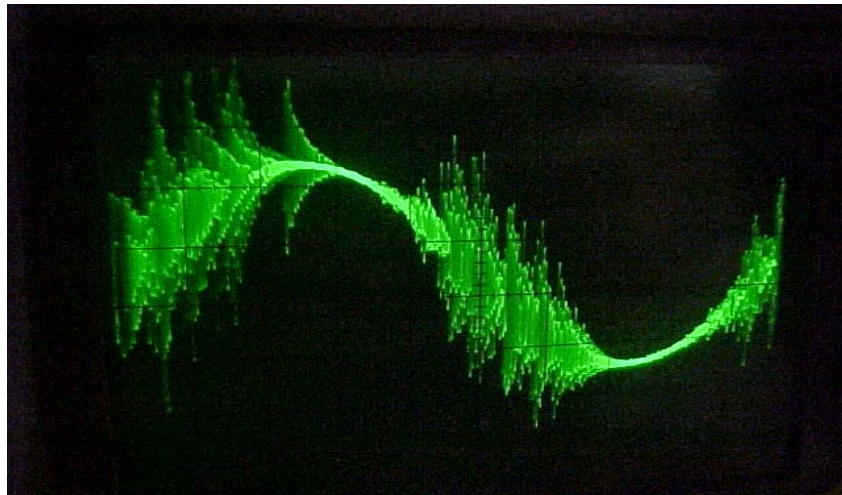


Figura 5.1b: Modelo de la descarga parcial en el equipo de medición.

En base al retraso de tiempo de la señales y de la velocidad del aceite se calcula la distancia aproximada a la cual se encuentra la descarga parcial. Con estos datos se analiza los planos del transformador y se determina la posible causa de falla y el lugar donde se está produciendo la descarga.

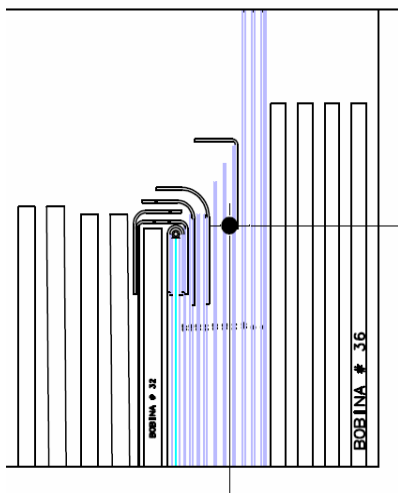


Figura 5.1c: Dibujo esquemático donde se indica el punto donde se encuentra la descarga.



Figura 5.1d: Indicación del punto detectado sobre las bobinas del transformador (se estimó la debajo de este punto, en la parte interna de las bobinas).

Posteriormente se procedió a desarmar el transformador y se corroboró que la falla se encontraba cerca de la zona que se había calculado. En las siguientes figuras podemos ver partes carbonizadas del aislamiento debido a las descargas parciales.



Figura 5.1e: Muestra la condición en que se encuentra el aislamiento (después de desarmar el transformador), donde se indica la existencia de la descarga (partes quemadas).

5.2 CONCLUSIONES.

En base al análisis de los resultados obtenidos de la prueba y después de desarmar el transformador se confirmó que el origen de la causa de las descargas parciales fue la acumulación de partículas metálicas (mostradas en la figura 5.2e). Este problema ocurrió, debido a problemas con las bombas; las cuales durante el llenado y recirculación de aceite del transformador introdujeron partículas metálicas.

CONCLUSIONES.

En este trabajo se hizo una recopilación de información, el cual proporciona los elementos teórico-prácticos que permite entender el fenómeno de Descargas Parciales y sus efectos en el sistema de aislamiento de los transformadores y reactores.

Los conocimientos y experiencias que se obtienen al realizar este trabajo, permite ver la importancia que tiene en la ingeniería eléctrica, el estudio de los diferentes métodos de detección y medición de DPs, los cuales nos proporcionan información, que nos ayudan a identificar y localizar las causas de fallas en los transformadores.

Para obtener un diagnóstico más preciso de las causas de la degradación del sistema aislante de los transformadores y reactores, es necesario utilizar simultáneamente las diferentes técnicas de detección de descargas parciales, ya que cada una de ellas nos proporciona cierta información que permite identificar con mayor certeza la causa de falla.

El desarrollo y la aplicación de técnicas de diagnóstico en transformadores y reactores en derivación de potencia, tienen como objetivos principales:

- *. Detectar y localizar áreas dentro del transformador que están expuestas a tensiones que a la larga pueden ser perjudiciales para la operación segura del equipo.
- *. Incremento de la confiabilidad del sistema.
- *. Reducción del índice de fallas.
- *. Incremento de la vida útil de los equipos.
- *. Reducción de los costos de mantenimiento al delimitar la zona de falla.

Los conocimientos que proporciona este trabajo, lo aplicamos en el ejemplo final y podemos corroborar que es de gran ayuda para identificar y localizar el origen de la falla. Además al realizar las inspecciones internas, se ha demostrado la utilidad que tiene este trabajo como una herramienta útil en la detección y localización de DPs y/o arcos en el interior de transformadores y reactores.

BIBLIOGRAFÍA.

- 1.- TESTING OF POWER TRANSFORMERS.**
Carlson, Ake, Frth
ABB, First Edition, Octubre 2003.
- 2.- DETECTION OF PARTIAL DISCHARGES IN TRANSFORMERS USING ACOUSTIC EMISSION TECHNIQUES.**
Howell, E., Norton, E.T.
PES Summer Meeting, México, Julio 1997.
- 3.- TRANSFORMER ENGINEERING.**
Blume, LF.
2a. Edición, Enero 1951.
- 4.- IEEE GUIDE FOR PARTIAL DISCHARGE MEASUREMENTS IN LIQUID-FILLED POWER TRANSFORMERS AND REACTORS.**
IEEE C57.113-1991
- 5.- MÁQUINAS ELÉCTRICAS.**
Chapman.
Ed. Mc Graw Hill, 3a. Edición.
- 6.- TRANSFORMADORES Y MOTORES DE INDUCCIÓN.**
Enríquez Harper.
Ed. Limusa, 4a. Edición, 2004.
- 7.- LIBRO PRÁCTICO DE LOS GENERADORES, TRANSFORMADORES Y MOTORES ELÉCTRICOS.**
Enríquez Harper.
Ed. Limusa, 2004.
- 8.- TRANSFORMER CONNECTIONS.**
L.F. Blume, A. Boyajian.
General Electric, Schenectady, N.Y., October 1951.

- 9.- IEEE STANDARD TERMINAL MARKING AND CONNECTIONS FOR DISTRIBUTION AND POWER TRANSFORMERS.**
C57.12.2000.
Rev. Dic. 2002.
- 10.- TRANSFORMERS FOR ELECTRICAL POWER INDUSTRY.**
Beam, R. Moore, H. Hentz, E. Chackan, N.
Westinghouse Corporation.
Ed. Mc Graw Hill, 1959.
- 11.- CIRCUITOS MAGNÉTICOS Y TRANSFORMADORES.**
M.I.T.
Ed. Reverte, 1981.
- 12.- TRANSFORMADORES DE POTENCIA, DE MEDIDA Y DE PROTECCIÓN.**
Ras Oliva, Enrique
Ed. Marcombo, 1975.
- 13.- MÁQUINAS ELÉCTRICAS.**
Fitzgerald A. E. Kingsley, Charles y Kusko Alexander.
Ed. Mc Graw Hill, 1975.



Facultad de Estudios Superiores Aragón

DIRECCIÓN

DIONICIO URBINA DOMINGUEZ

Presente

Con fundamento en el punto 6 y siguientes, del Reglamento para Exámenes Profesionales en esta Escuela, y toda vez que la documentación presentada por usted reúne los requisitos que establece el precitado Reglamento; me permito comunicarle que ha sido aprobado su tema de tesis y asesor.

TÍTULO:

DETECCIÓN Y MEDICIÓN DE DESCARGAS PARCIALES
EN TRANSFORMADORES Y REACTORES EN DERIVACIÓN DE POTENCIA.

ASESOR: Ing. RODRIGO OCON VALDEZ

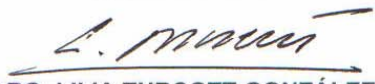
Aprovecho la ocasión para reiterarle mi distinguida consideración.

Atentamente

"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"

San Juan de Aragón, México, 27 de enero de 2006.

LA DIRECTORA


ARQ. LILIA TURCOTT GONZÁLEZ





C p Secretaría Académica
C p Jefatura de Carrera de Ingeniería Mecánica Eléctrica
C p Asesor de Tesis

LTG/AIR/

ccp. Lic. Ma. Teresa Luna Sánchez - Jefe del Depto. de Servicios Escolares

ccp. M. en C. Rodrigo Ochoa Vázquez, Asesor

ccp. alumno