

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CENTRO DEL PERU



FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA Y ELECTRÓNICA

**“ANÁLISIS DE LA REPERCUCIÓN DEL CAMPO ELÉCTRICO EN
LAS PRUEBAS DE AISLAMIENTO A TRANSFORMADORES DE
CORRIENTE”**

TESIS

PRESENTADO POR:

Jaime Dante, Canchanya Gutierrez

PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO ELECTRICISTA

HUANCAYO – PERU

2009

ASESOR:

Ing. Hugo Lozano Nuñez

A MIS PADRES,

HERMANOS

Y DEMÁS FAMILIARES

INTRODUCCIÓN

En los primeros tiempos del desarrollo eléctrico las redes y sistemas existentes eran pocos y pequeños. Las medidas a tomar también eran pocas y los aparatos de medida empleados se construían especialmente para aquella aplicación. Pronto fueron aumentando de tamaño y complejidad las redes eléctricas y la fabricación de aparatos de medida especiales para cada uno de los diferentes puntos en que se quería medir se fue haciendo más y más difícil. Es claro que hacer un amperímetro que pueda medir una corriente de 100 A es complicado y lo mismo si se trata de fabricar una bobina voltimétrica cuyos extremos deban estar aislados entre sí a 10.000 V. Hoy en día es frecuente tener que medir intensidades de 4.000 A y tensiones de 765 kV.

Al continuar el crecimiento y la complejidad de las redes eléctricas, la medición se iba haciendo necesaria cada vez en más puntos, y para poder controlarlas era deseable conseguir una centralización de las medidas en cuadros de control que permitiesen una supervisión conjunta de todo el sistema. Esto obligaba a montar muchos aparatos de medida semejantes en un mismo panel y resultaba evidente que cuanto más pequeños y más parecidos fueran todos, más económicos saldrían estos montajes y más fáciles de vigilar los sistemas representados en los cuadros de control.

Los transformadores de medida (T.M.) permiten reducir los valores de intensidad y de tensión, del punto de la red en que están conectados, a valores proporcionales a aquéllos pero más pequeños. En estas condiciones es posible fabricar todos los

aparatos de medida para valores apropiados a las posibilidades tecnológicas actuales, en lo que se refiere a materiales y tamaño de los mismos.

Al ser su tamaño más reducido, es más fácil su colocación en paneles de control. Siendo los valores de intensidad y tensión que a ellos llegan suficientemente reducidos, su manipulación, entretenimiento y colocación no resultan peligrosos para el personal. Además, si convenimos en que siempre reduciremos los valores de intensidad y tensión a los mismos valores finales, resulta que los aparatos de medida serán intercambiables y se podrán fabricar en grandes series, lo que reducirá sus costos enormemente y facilitará su instalación al ser siempre iguales. Efectivamente se ha llegado a bastante unanimidad en este punto y la casi totalidad de los T.T. (Transformadores de Tensión) reducen los valores de la tensión a que están conectados a 110 V ó 100 V y los T.I. (Transformadores de Intensidad) reducen la intensidad a 5 A ó 1 A.

No quisiera cerrar esta introducción sin antes dejar de mencionar a mi Asesor **Ing. Hugo Rósulo Lozano Nuñez**; quien se dignó en dirigir y corregir errores de la presente tesis. **Además quiero agradecer de una manera muy especial a la plana Docente de la Facultad de Ingeniería eléctrica y Electrónica de la UNCP**, quienes me dieron una formación verdaderamente sólida.

J.D.C.G.

RESUMEN

La tesis trata de esclarecer los efectos del campo eléctrico que pueden repercutir en los transformadores de corriente, básicamente se sabe que estos transformadores pueden trabajar como transformadores de medida ó como transformadores de protección, y se determino que un campo eléctrico puede afectar fuertemente en el accionar de estos transformadores de corriente.

Transformador de medición. Los transformadores cuya función es medir, requieren reproducir fielmente la magnitud y el ángulo de fase de la corriente. Su precisión debe garantizarse desde una pequeña fracción de corriente nominal del orden del 10%, hasta un exceso de corriente del orden del 20%, sobre el valor nominal.

Transformadores de protección. Los transformadores cuya función es proteger un circuito, requieren conservar su fidelidad hasta un valor de veinte veces la magnitud de la corriente nominal, cuando se trata de grandes redes con altas corrientes puede ser necesario requerir treinta veces la corriente nominal.

En el caso de los relés de sobrecorriente, sólo importa la relación de transformación, pero en otro tipo de relés, como pueden ser los de impedancia, se requiere además de la relación de transformación, mantener el error del ángulo de fase dentro de valores predeterminados.

Para un mejor estudio del problema uno de los puntos que se tuvo que darle mayor énfasis fue el estudio de los aislamientos de los que están construidos los transformadores de corriente, y también el campo eléctrico en las pruebas de aislamiento en los transformadores de corriente; aquí se vio lo referente al campo eléctrico estático en dieléctricos, Cálculo del campo eléctrico, el campo eléctrico

en transformadores de medida, en transformadores de media tensión, en transformadores de intensidad, en transformadores de alta tensión y la importancia del estudio del campo eléctrico.

Debo resaltar que las mediciones se llevaron a cabo en tres lugares, Salesianos, parque industrial y concepción y se pudo corroborar que la diferencias en las mediciones son aceptables.

INDICE

DEDICATORIA

INTRODUCCION

RESUMEN

INDICE

CAPITULO 1

PLANTEAMIENTO Y GENERALIDADES DE LA TESIS

1.1 Planteamiento del problema	15
1.2 Objetivos de la investigación	17
1.3 Marco teórico	17
1.4 Formulación de la hipótesis	22
1.5 Método de investigación	22
1.6 Transformadores de medida	23
1.6.1 Función	25
1.6.2 Constitución	25
1.6.3 El problema del aislamiento	26
1.6.4 Tipos	28
1.7 Transformadores de corriente	29
1.7.1 Tipos de medidores de corriente	35
1.7.2 Descripción de los transformadores de corriente	36
1.7.3 Parámetros de los transformadores de corriente	40
1.7.4 Transformador de intensidad para medida	47
1.7.4.1 Clase de precisión	49
1.7.4.2 Transformadores de gama extendida	50
1.7.4.3 Verificación	50
1.7.5 Identificación de bornes	51
1.7.6 Condiciones de servicio	53
1.7.7 Requerimientos de aislación	53

1.7.8 Requerimientos de exactitud	54
1.7.9 Elección de un transformador de corriente	58
1.8 Carga	60
1.9 Resistencia a los cortocircuitos	60
1.10 Calificación de ensayos según IEC 60185/95	62

CAPITULO 2

AISLAMIENTO EN LOS TRANSFORMADORES DE CORRIENTE

2.1 Introducción	65
2.2 Materiales aislantes	67
2.2.1. Materiales aislantes sólidos	67
2.2.2 Fluidos dieléctricos	68
2.2.3 Gases aislantes	69
2.2.4 Barnices y resinas	70
2.3 Control de calidad y ensayos	70
2.3.1 Ensayos dieléctricos de rutina	71
2.3.2 Ensayos de vida	71
2.3.3 Ensayos eléctricos	71
2.4 Ensayos de aislamiento en transformadores	72
2.5 Principales ensayos dieléctricos	76
2.5.1 Ensayos de impulso	77
2.5.2 Ensayos de alto potencial	77
2.5.3 Medición de la resistencia de aislamiento	78
2.5.4 Medición del factor de potencia y factor de potencia	78
2.5.5 Pruebas para la verificación de la calidad del aceite	80
2.5.6 Detección de gases disueltos en el aceite	81
2.5.7 Detección de descargas parciales	81

CAPITULO 3

EL CAMPO ELECTRICO EN PRUEBAS DE AISLAMIENTO

3.1 Campo eléctrico	84
3.1.1 Campo eléctrico estático en dieléctricos	86
3.1.2 Cálculo del campo eléctrico	92
3.2 El campo eléctrico en transformadores de medida	94

3.2.1 En transformadores de media tensión	95
3.2.2 En transformadores de intensidad	95
3.2.3 En transformadores de alta tensión	96
3.2.4 Implicancia del estudio del campo eléctrico	97

CAPITULO 4

ANALISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN LAS PRUEBAS

4.1 Transformadores utilizado en las pruebas	98
4.2 Características constructivas	99
4.2.1 Devanado Primario	99
4.2.2 Devanados secundarios y núcleos	100
4.2.3 Impregnación	100
4.2.4 Tanque y aislador	101
4.2.5 Sistema de expansión	101
4.3 Características de operación	101
4.3.1 Clima	101
4.3.2 Vida útil	102
4.3.3 Resistencia a la corrosión	102
4.3.4 Rigidez sísmica	102
4.4 Pruebas de aislamiento y campo eléctrico	102
4.5 Campo eléctrico	104
4.6 Prueba de factor de potencia	107
4.7 Prueba de la tangente delta	109
4.8 Prueba de la resistencia de aislamiento	111

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

BIBLIOGRAFIA

ANEXOS

CAPITULO I

PLANTEAMIENTO Y GENERALIDADES DE LA TESIS

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los transformadores de corriente antes de salir de fábrica, son sometidos a diversas pruebas de control del aislamiento, tales como los ensayos dieléctricos y de descargas parciales; lo cual permite determinar el correcto funcionamiento de los mismos.

En general, las pruebas realizadas a los transformadores de corriente se pueden ver afectadas por el campo eléctrico existente en la vecindad tanto del transformador como del equipo de medición, por lo que se pretende investigar para determinar que tan verídica es esta suposición; determinando así la confiabilidad de los resultados obtenidos en las mediciones.

Para esta investigación se realizarán las pruebas en tres lugares donde se analizarán básicamente los transformadores de corriente, los cuales constituyen una pequeñísima muestra de la amplia gama de máquinas eléctricas existentes y que de igual manera se pueden ver afectadas por el campo eléctrico, esta elección se realizará basada en la disponibilidad que existe de estos transformadores en las empresas donde se realizarán las pruebas.

La importancia de la realización de este estudio, radica en las ventajas que puede traer a la empresa tener conocimiento de los efectos que se producen a la hora de realizar pruebas en campo, permitiendo así, tomar las prevenciones necesarias para tratar de que se minimice el porcentaje de error que se pueda generar en las mediciones que constantemente se realizan como parte del mantenimiento preventivo que se le da a las subestaciones; dichas pruebas las empresas las realizan con el fin de determinar el estado de los equipos, por ejemplo, en el caso de los transformadores permiten conocer el deterioro de los espesores del dieléctrico y los efectos producidos en el contorno exterior del transformador, los cuales son parámetros de gran importancia para el buen funcionamiento de los mismos.

- Variable dependiente

- Analizar y describir las pruebas de aislamiento a transformadores de corriente.

- Variable independiente

- Repercusión del campo eléctrico en las pruebas de aislamiento a transformadores de corriente.

- PROBLEMA GENERAL

El tipo de problema es descriptivo

- ¿Cuál será la repercusión del campo eléctrico en las pruebas de aislamiento a transformadores de corriente?.

- PROBLEMAS PARTICULARES

¿ Como se realizará un cálculo adecuado del Cálculo del campo eléctrico?.

¿Como se realizará la Prueba de la resistencia de aislamiento eléctrico?.

- JUSTIFICACIÓN DEL TEMA

La tipología de justificación es **práctica**, porque se puede dar un uso aplicativo al tema planteado.

1.2 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

Objetivo general

1. Analizar y describir la repercusión que produce el campo eléctrico en las pruebas de aislamiento de los transformadores de corriente.

Objetivos específicos

1. Determinar el cálculo adecuado del campo eléctrico.
2. Realizar y determinar la prueba de la resistencia de aislamiento eléctrico

1.3 MARCO TEÓRICO

En la actualidad existen muchas literaturas que abarcan los conceptos de campo eléctrico y transformadores de corriente; sin embargo, literaturas donde podamos encontrar la relación existente entre transformadores de Corriente y campo eléctrico en las pruebas de aislamiento, y los efectos que producen lo segundo en los transformadores de corriente en las pruebas es casi nulo a excepción de las fábricas de máquinas eléctricas.

El conocimiento de las influencias del campo eléctrico en la prueba de aislamiento es importante porque como sabemos los ensayos de aislamiento

en transformadores, y en general en cualquier equipo eléctrico, se realizan para verificar que el aislamiento posea características óptimas ya sea en el proceso de fabricación, o bien durante los períodos de mantenimiento del equipo una vez que este ha entrado en servicio.

Como sabemos los objetivos principales de los transformadores de medida son:

1. Aislar o separar los circuitos y aparatos de medida, de la alta tensión
2. Evitar perturbaciones electromagnéticas de las corrientes fuertes, y reducir corrientes de cortocircuito a valores admisibles en delicados aparatos de medida.
3. Obtener intensidades de corriente, o tensiones, proporcionales a las que se desea medir o vigilar, y transmitir las a los aparatos apropiados.

El desarrollo de este trabajo es de mucha importancia ya que nos brindará una buena elección en transformadores de corriente, que nos proporcionará la debida precisión y garantizar la seguridad del personal y de la instalación, así como proteger a los aparatos.

Los transformadores son dispositivos electromagnéticos que transforman la energía eléctrica, mediante la alteración de la relación de corriente y tensión.

El funcionamiento de los transformadores está basado en el fenómeno de la inducción electromagnética y están constituidos, en su forma más simple, por un núcleo formado por láminas de hierro en cuyas columnas van montadas

dos bobinas devanadas de cobre o aluminio. Estas bobinas o devanados se denominan *primario* y *secundario*, y se encuentran físicamente enrolladas una sobre la otra, de forma tal que la bobina de menor tensión se encuentra situada en la parte interna (más cerca del núcleo), lo que simplifica el problema de aislamiento del devanado de alta tensión desde el núcleo.

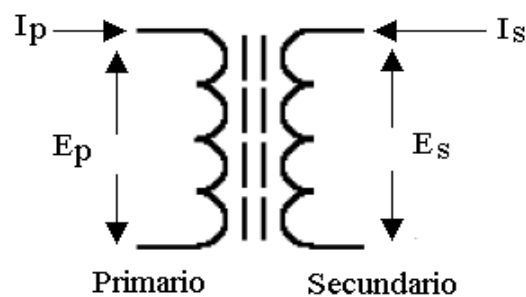


Figura A. 1 Diagramas del transformador

Básicamente consiste en aplicar una fuerza electromotriz alterna en el devanado primario, provocando que las variaciones de corriente y sentido de la corriente alterna introduzcan un campo magnético variable dependiendo de la frecuencia de la corriente.

Transformadores de corriente

En función de sus aplicaciones los transformadores de corriente se dividen en:

Transformadores de corriente para Medición:

Se utilizan para proteger los aparatos alimentados por el transformador, en caso de cortocircuito en la red en la cual está intercalado el primario, básicamente se conectan a aparatos de medición, contadores de electricidad o equipos similares.

Transformadores de corriente para Protección:

Son los transformadores de intensidad destinados a alimentar relés de protección. Por lo que deben asegurar una precisión suficiente para corrientes de valor igual a varias veces la intensidad nominal.

La diferencia entre ambas ejecuciones radica en sus características de transformación en la gama de la sobrecarga de corriente. Los transformadores de corriente para fines de medición no deben transformar el valor total a partir de un determinado valor de sobrecarga mientras que los transformadores de corriente para fines de protección, si deben transformar hasta un determinado valor de sobrecarga.

Campo Eléctrico

Al igual que cualquier máquina eléctrica, los transformadores están sometidos a un campo eléctrico, cuando este campo se encuentra perfectamente controlado dentro de parámetros aceptables, se logran transformadores cuyo comportamiento es muy fiable.

Las formas de determinar el campo eléctrico comúnmente son fórmulas matemáticas aplicables a formas de electrodos muy determinados o bien métodos experimentales difícilmente extensibles a los contornos y dimensiones de las máquinas reales.

En los últimos años, con la aparición de las potentes computadoras, se han desarrollado sistemas de cálculo aplicables a cualquier forma de electrodo, dimensión de los mismos y dieléctricos diferentes, con

resultados prácticamente exactos, lo que permite poderosas alternativas de diseño.

El campo eléctrico en los transformadores

Transformadores de media tensión

Son aparatos de relativa sencillez de fabricación y en los que el conocimiento del campo eléctrico así como de los gradientes ayuda a determinar espesores del dieléctrico, habitualmente resina sintética, así como a delimitar óptimamente los contornos exteriores del transformador para evitar o reducir el efecto de las descargas superficiales con el tiempo.

En los transformadores de aislamiento en resina y servicio a la intemperie, el problema de las descargas superficiales se acentúa debido a la contaminación atmosférica, humedad, etc.

Un aislante orgánico sometido a estos fenómenos y al campo eléctrico, puede degradarse superficialmente en tiempos relativamente cortos.

Los problemas de diseño aumentan a medida que el nivel de tensión aumenta.

Los dieléctricos más normales son el papel-aceite y la porcelana para subestaciones al aire libre, y el gas SF₆ y la resina para subestaciones blindadas.

El estudio del campo eléctrico tiene gran aplicación en la determinación de formas de cajas de baja tensión, receptáculo de los núcleos y arrollamientos secundarios de los transformadores de intensidad, así como la definición de espesores mínimos de aislamiento.

1.4 FORMULACIÓN DE LA HIPÓTESIS

1. Las pruebas de aislamiento practicadas al transformador de corriente no serán afectadas por el campo eléctrico existente en la vecindad del equipo de prueba.
2. La prueba de Aislamiento del transformador de corriente es relevante y suficiente para concluir que el transformador está en buenas condiciones.
3. El análisis de los resultados obtenidos en las pruebas de factor de potencia del aislamiento, tangente delta y resistencia de aislamiento que se aplican al transformador, se puede determinar que la diferencia entre los valores obtenidos en las dos Empresas eléctricas fue mínima

1.5 METODO DE INVESTIGACIÓN

El método de la investigación es analítico.

Para lograr cumplir con los objetivos anteriormente mencionados, se realizarán las siguientes actividades:

Fuentes Secundarias

1. Se recopilará información (textos, revistas, Internet) todo lo referente a los transformadores de corriente, tal como funcionamiento, aplicación, formas constructivas, diseño, etc.
2. Se analizarán y estudiarán las pruebas de aislamiento practicadas por el ICE a los transformadores de corriente.
3. **(Fuentes primarias)** Se realizarán las pruebas de aislamiento con Ingenieros y técnicos experimentados a los transformadores de corriente, dichas pruebas se elaboraron tanto en campo como en el laboratorio, y ambos resultados se

estudiarán y compararán, con el objetivo de determinar la influencia que pudo tener el campo eléctrico sobre estas pruebas. Seguidamente se realizarán las conclusiones, según los resultados esperados, respecto a la teoría y a las normas de los transformadores de corriente.

4. Finalmente, con los resultados obtenidos en las pruebas, se elaborará un informe, en el cual se expondrá el procedimiento a seguir más recomendado para obtener los mejores resultados en la realización de las pruebas de aislamiento en el campo.

1.6 TRANSFORMADORES DE MEDIDA¹

Son transformadores de características especialmente diseñadas para medir. Como transformadores, son máquinas eléctricas que aprovechan las propiedades electromagnéticas de las corrientes alternas y de los materiales ferromagnéticos para conseguir su finalidad, que es obtener de la energía eléctrica que sale de ellos un reparto diferente en tensión e intensidad que de la que entra a ellos.

Las corrientes eléctricas alternas crean flujos magnéticos alternos que son capaces, a su vez, de inducir otras corrientes eléctricas alternas en materiales conductores que se hallen bajo su influencia.

Las corrientes eléctricas alternas que pasan a través de conductores arrollados crean campos magnéticos muy concentrados en el interior de los arrollamientos.

¹ Nessler, Herber y otro: *Construcción y funcionamiento del transformador*. Pag. 34

Los materiales ferromagnéticos tienen la propiedad de conducir muy bien los flujos magnéticos. En el transformador aprovechamos esta cualidad para conducir el flujo magnético que genera el arrollamiento primario en el interior del núcleo ferromagnético.²

Al atravesar el flujo magnético al arrollamiento secundario se induce en él una corriente eléctrica alterna semejante a la primaria que ha generado el flujo magnético, pero que puede tener características diferentes de aquella si los arrollamientos no son iguales.

Podríamos definir un transformador como una máquina eléctrica que, aprovechando los fenómenos electromagnéticos, varía las características eléctricas que se dan a su entrada hasta obtener las deseadas en su salida con pérdida mínima de energía.

La aplicación adecuada de los transformadores de corriente y de tensión implica la consideración de varios requisitos, como son: construcción mecánica, tipo de aislamiento (seco o líquido), relación en función de las corrientes o tensiones primarias y secundarias, régimen térmico continuo, regímenes de tiempo corto térmico y mecánico, clase de aislamiento, nivel de impulso, condiciones de servicio, precisión y conexiones.

1.6.1 FUNCIÓN

La función de los transformadores de medida, es reducir a valores no peligrosos y normalizados, las características de tensión e intensidad de una red eléctrica.

² Nessler, Herber y otro: *Construcción y funcionamiento del transformador*. Pag. 45

De esta manera, se evita la conexión directa entre los instrumentos y los circuitos de alta tensión, que sería peligroso para los operarios y requeriría cuadros de instrumentos con aislamiento especial. También se evita utilizar instrumentos especiales y caros, cuando se quieren medir corrientes intensas.

1.6.2 CONSTITUCION

- Un primario, que es un arrollamiento conductor conectado a la red de alimentación.
- Un núcleo de material ferromagnético que hace de eslabón entre el primario y el secundario transfiriendo la energía de uno a otro, y
- Un secundario, que es un arrollamiento conductor conectado a los instrumentos de medida y/o protección.

La diferencia constructiva entre primario y secundario es la que hace variar las características con que se manifiesta la energía en uno y otro. La diferencia más destacada es la que hace referencia al número de espiras. En un transformador se cumple aproximadamente que:

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

I_1 : Intensidad primaria

V_1 : Diferencia de potencial primaria

N_1 : Número de espiras primarias

I_2 : Intensidad secundaria

V_2 : Diferencia de potencial secundaria

N_2 : Número de espiras secundarias

A este cociente se le llama relación de transformación del transformador.

Los transformadores de medida se distinguen entre los diversos tipos de transformadores que hay (de potencia, separadores de circuitos, variadores de frecuencia, para soldadura, etc.), fundamentalmente porque tratan de conseguir que esa relación sea lo más precisa posible.

Supuesto que el estado eléctrico de un punto en un sistema viene determinado por los valores de la tensión e intensidad que en él se midan, los T.M. (Transformadores de Medida) se especializan en conseguir que su relación de transformación fije muy exactamente la proporción entre sus intensidades primaria y secundaria, con lo que tendremos los T.I. (Transformadores de Intensidad); o que lo sea la proporción entre sus tensiones primaria y secundaria, y entonces estaremos ante los T.T. (Transformadores de Tensión).

1.6.3 EL PROBLEMA DEL AISLAMIENTO

Como en todos los transformadores, en el T.M. (Transformador de Medida) hay que aislar y separar convenientemente unos circuitos de otros entre sí y del exterior.

Así, en cada uno de los arrollamientos primario y secundario, debe aislarse cada espira de la siguiente para que la corriente las atraviese ordenadamente una después de otra y no todas a la vez. En el caso de hilos de cobre al comprarlos esmaltados, o sea con un recubrimiento

continuo de esmalte aislante, ya se tiene un primer aislamiento entre espiras que luego se reforzará con sucesivas capas de papel. Si no vinieran aislados los hilos habría que proceder a su aislamiento, como se hace en el caso de pletinas y cintas desnudas que se aíslan con fundas o cartones.

El papel impregnado de gas aislante (hexafluoruro de azufre: SF₆) o de aceite es mucho mejor aislante que el papel solo. Esta circunstancia se utiliza en el aparato completo al realizar una impregnación con estos elementos.

Para aislar un arrollamiento del otro también se recurre a papel impregnado o a resina en algún caso (T.I. de M.T.: Transformadores de Intensidad de Media Tensión). Este mismo tipo de aislamiento se da al núcleo respecto a cada uno de los arrollamientos.

El aislamiento del aparato frente al ambiente se consigue a base de aceite y porcelana en los de servicio exterior o intemperie y a base de resina epóxida en los de servicio interior. Algunos aparatos de exterior se aíslan en resina cicloalifática.

Hemos de consignar también el aislamiento que se procura entre cada una de las finas chapas que componen el núcleo. De lo que se trata en este caso es de impedir que el núcleo, que está hecho de material que además de ser muy buen conductor del flujo magnético (que es lo que queremos) es un mediano conductor de la corriente eléctrica (cualidad que no deseamos), se dedique a funcionar como si de un secundario más

se tratara. Aislando entre sí las chapas se interrumpen las corrientes eléctricas que el flujo magnético genera en ellas, manteniéndolas así muy pequeñas (pérdidas de Foucault). Este aislamiento lo da el mismo fabricante de las chapas proporcionándoles un recubrimiento superficial aislante.

La forma y calidad del aislamiento depende en cada caso de múltiples factores, siendo el principal el valor de la tensión que existe entre los dos extremos a aislar. Aquí conviene tener presente que la relación entre espesor de aislante y tensión aplicada no es lineal, así que no se cumple que a doble tensión aplicada doble espesor de aislante a interponer, sino que habrá que atenerse a lo que en cada caso corresponda a la naturaleza del dieléctrico. (Material dieléctrico es cualquier material aislante, es decir, un mal conductor).

1.6.4 TIPOS

Como las mediciones se hallan referidas, en última instancia, a la apreciación de tensión y corriente, se dispone de dos tipos fundamentales de transformadores de medida:

- Transformadores de tensión.
- Transformadores de corriente.

Transformadores de intensidad, en los cuales la intensidad secundaria es, en las condiciones normales de uso, prácticamente proporcional a la intensidad primaria y desfasada con relación a la misma un ángulo próximo a cero, para un sentido apropiado de las conexiones.

Transformadores de tensión, en los cuales la tensión secundaria es, en las condiciones normales de uso, prácticamente proporcional a la tensión primaria y desfasada con relación a la misma un ángulo próximo a cero, para un sentido apropiado de las conexiones

Tabla 1.1 Equivalencias de funciones en los transformadores de instrumentos.

Concepto	Transformador	
	Tensión	Corriente
Norma IEC / IRAM	60186 / 2271	60185 / 2344 - 1
Tensión	Constante	Variable
Corriente	Variable	Constante
La carga se determina	Corriente	Tensión
Causa del error:	Caída de tensión en serie	Corriente derivada en paralelo
La carga secundaria aumenta cuando:	Z_2 disminuye	Z_2 aumenta
Conexión del	En paralelo	En serie
Conexión de los	En paralelo	En serie

1.7 TRANSFORMADORES DE CORRIENTE

Un transformador de corriente, es aquel en el cual el devanado primario se encuentra en serie con el circuito al cual se quiere medir la corriente. En el devanado secundario se conectan en serie los instrumentos. Normalmente estos dispositivos tienen a una muy baja impedancia que prácticamente mantienen el t/C en condiciones de cortocircuito en el secundario.

Para que el transformador pueda cumplir con su función de indicar exactamente el valor de la corriente circulante en el circuito primario, se debe mantener si es posible, el valor de la carga, por lo cual se trata de reducir al

mínimo la corriente magnetizante. Para esto, el diseño debe considerar un núcleo magnético muy compacto, con entrehierros casi nulos y pérdidas en el fierro muy pequeñas.

En la figura 1.1, se muestra el esquema físico de un transformador de corriente:

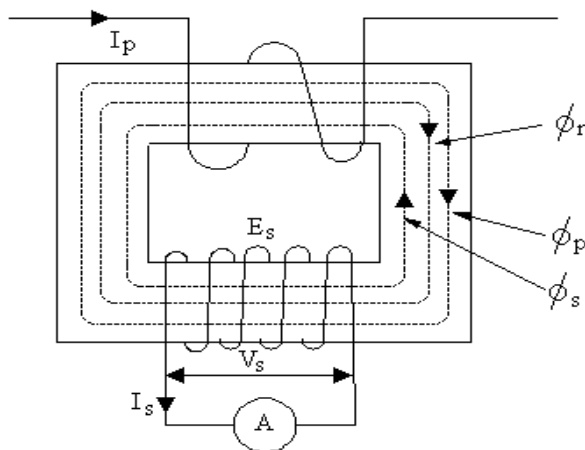


Figura 1.1 Circuito simplificado de un transformador de corriente

$$N_1/N_2 = V_1/V_2 = I_2/I_1$$

El número de espiras en el TC se calculan a partir del hecho que los amperes-vueltas del primario y del secundario deben ser iguales.

En la práctica, esta relación no es exactamente igual, ya que los flujos de ambos bobinados, no son exactamente iguales, entonces se tiene un flujo magnético resultante, cuyo valor se calcula como :

$$\Phi_r = \Phi_p - \Phi_s$$

Este flujo resultante Φ_r da origen a una inducción magnética B en el núcleo del transformador de valor bajo, pero que es suficiente para producir en el

devanado secundario un voltaje inducido. Es que mantiene la corriente que se mide.

Si por alguna razón se abre el devanado secundario, la variación del flujo con el tiempo ($d\Phi/dt$), induce un valor de tensión alto que puede ser peligroso. Por esta razón el secundario debe estar conectado a tierra y nunca debe estar en circuito abierto. Se recomienda cortocircuitar el secundario ANTES de retirar el instrumento.

Los transformadores de corriente, son aparatos en que la corriente secundaria, dentro de las condiciones normales de operación, es prácticamente proporcional a la corriente primaria, aunque ligeramente desfasada.

Desarrollan dos tipos de función:

- Transformar la corriente
- Aislar los instrumentos de protección y medición conectados a los circuitos de alta tensión.

El primario del transformador, que consta de muy pocas espiras, se conecta en serie con el circuito cuya intensidad se desea medir y el secundario se conecta en serie con las bobinas de corriente de los aparatos de medición y de protección que requieran ser energizados.

Las espiras del arrollamiento primario suelen ser una o varias como se muestra en la figura 1.2³, las cuales se pueden a su vez dividir en dos partes iguales y conectarse en serie o paralelo para cambiar la relación, y atraviesan

³ Nessler, Herber y otro: *Construcción y funcionamiento del transformador*. Pag. 65

el núcleo magnético, cuya forma suele ser cerrada tipo toroidal o puede tener un cierto entrehierro, sobre el cual se arrollan las espiras del secundario de una forma uniforme, consiguiendo así reducir al mínimo el flujo de dispersión. Este arrollamiento es el que se encarga de alimentar los circuitos de intensidad de uno o varios aparatos de medida conectados en serie.

Se puede dar también la existencia de varios arrollamientos secundarios en un mismo transformador, cada uno sobre su circuito magnético, uno para medida y otro para protección. De esta forma no existe influencia de un secundario sobre otro.

Si el aparato tiene varios circuitos magnéticos, se comporta como si fueran varios transformadores diferentes. Un circuito se puede utilizar para mediciones que requieren mayor precisión, y los demás se pueden utilizar para protección. Por otro lado, conviene que las protecciones diferenciales de cables o transformadores de potencia y de distancia se conecten a transformadores de corriente independientes.

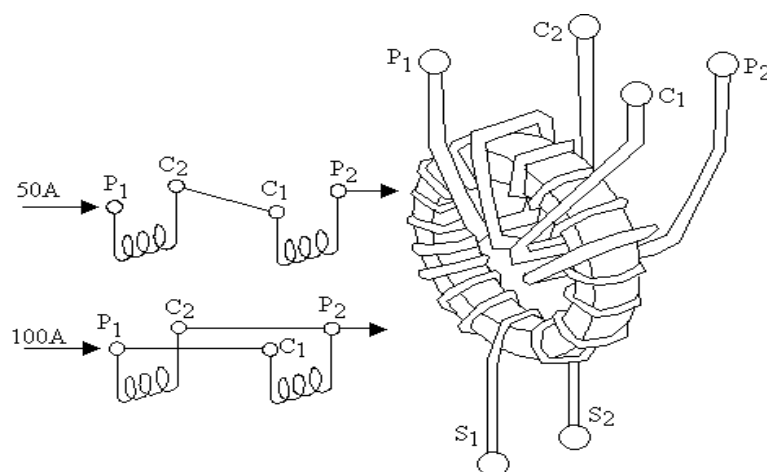
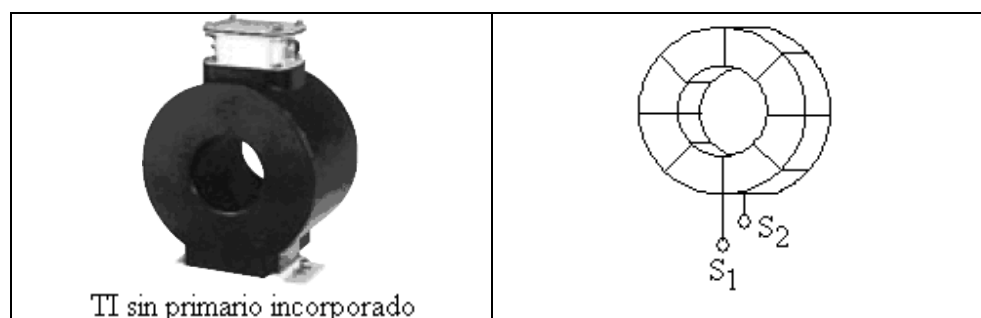


figura1.2 TI de doble relación primaria: 50-100/5A.

Los transformadores de corriente se pueden fabricar para servicio interior o exterior. Los de servicio interior son más económicos y se fabrican para tensiones de servicio de hasta 36 kV, y con aislamiento en resina sintética. Los de servicio exterior y para tensiones medias se fabrican con aislamiento de porcelana y aceite, o con aislamientos a base de resinas que soportan las condiciones climatológicas. Para altas tensiones se continúan utilizando aislamientos a base de papel y aceite dentro de un recipiente metálico, con aisladores pasatapas de porcelana. Actualmente se utilizan resinas dentro de un aislador de porcelana, o gas SF₆ y cubierta de porcelana.

La tensión del aislamiento de un transformador de corriente debe ser, cuando menos, igual a la tensión más elevada del sistema al que va a estar conectado. Para el caso de los transformadores utilizados en protecciones con relés digitales se requieren núcleos que provoquen menores saturaciones que en el caso de los relés de tipo electromagnético, ya que las velocidades de respuesta de las protecciones electrónicas son mayores.

El núcleo de los transformadores de corriente, normalmente, es de forma toroidal con el secundario uniformemente repartido, para reducir al mínimo el flujo de dispersión.



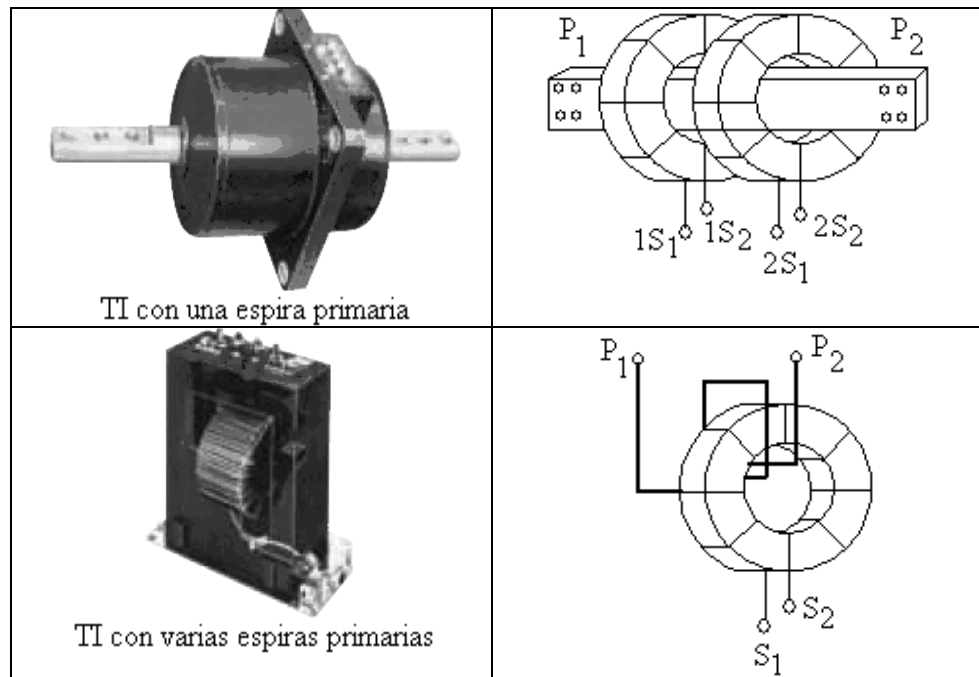


Figura 1.3 diversos tipos de transformadores de corriente

El primario consta de una o varias espiras que se conectan en serie con la línea. También existen transformadores de corriente en los que no está incorporado el primario. En este caso, el aislamiento principal puede estar en el primario (cables, pasamuros, etc.) o en el propio transformador. En la figura 1.3, vemos diversos tipos de TI.

1.7.1 TIPOS DE MEDIDORES DE CORRIENTE

a) TRANSFORMADOR DE MEDICIÓN

Los transformadores cuya función es medir, requieren reproducir fielmente la magnitud y el ángulo de fase de la corriente. Su precisión debe garantizarse desde una pequeña fracción de corriente nominal del orden del 10%, hasta un exceso de corriente del orden del 20%, sobre el valor nominal.

b) TRANSFORMADORES DE PROTECCIÓN

Los transformadores cuya función es proteger un circuito, requieren conservar su fidelidad hasta un valor de veinte veces la magnitud de la corriente nominal, cuando se trata de grandes redes con altas corrientes puede ser necesario requerir treinta veces la corriente nominal.

En el caso de los relés de sobrecorriente, sólo importa la relación de transformación, pero en otro tipo de relés, como pueden ser los de impedancia, se requiere además de la relación de transformación, mantener el error del ángulo de fase dentro de valores predeterminados.

c) TRANSFORMADORES MIXTOS

En este caso, los transformadores se diseñan para una combinación de los dos casos anteriores, un circuito con el núcleo de alta precisión para los circuitos de medición y uno o dos circuitos más, con sus núcleos adecuados, para los circuitos de protección.

d) TRANSFORMADORES COMBINADOS

Son aparatos que bajo una misma cubierta albergan un transformador de corriente y otro de tensión.

Se utilizan en estaciones de intemperie fundamentalmente para reducir espacios.

1.7.2 DESCRIPCIÓN DE LOS TRANSFORMADORES DE CORRIENTE.

Los componentes básicos son:

a) AISLAMIENTO EXTERNO

El aislamiento externo consta de una envolvente cerámica con una línea de fuga lo suficientemente larga como para que ningún arco pueda contornearse bajo condiciones de contaminación, como lluvia, niebla, polvo, etc.

b) AISLAMIENTO INTERNO

Puede variar según sus características constructivas. Un caso es aquél en que las partes activas se moldean en resina de epoxy que las fija, las separa y las aísla, existiendo una cámara de aire entre el aislamiento externo de porcelana y el cuerpo de resina. Esta cámara se sella herméticamente con juntas de caucho nitrílico y se la rellena con aceite aislante o gas SF₆.

Existe otro tipo constructivo, indicado para potencias de precisión elevadas y grandes intensidades de cortocircuito, en que el aislamiento interno suele ser cartón prespán impregnado en aceite para el conjunto de los núcleos, arrollamientos secundarios y la bajante de los conductores que unen los arrollamientos secundarios con sus cajas de bornes. Esta bajante lleva incorporada en el interior de su aislamiento una serie de pantallas metálicas de forma cilíndrica, estando todo ello envuelto por un tubo metálico

en forma decreciente, de forma cónica. Este conjunto constituye un capacitor que permite un reparto uniforme de tensión a lo largo de todo el aislamiento interno. El aceite que se utiliza para impregnar el cartón es desgasificado y filtrado, y cuando se rellena el transformador se hace bajo condiciones de vacío. Los transformadores con aislamiento de cartón impregnado en aceite suelen disponer de un depósito de expansión (donde va a parar el aceite sobrante cuando éste se calienta) en su extremo superior. Conviene indicar que la parte superior del transformador, donde se halla el conjunto del núcleo y arrollamiento secundario, está moldeada en resina epoxy, formando una cabeza donde da cabida también al depósito de expansión de aceite. Este tipo constructivo de transformador se utiliza para tensiones desde 36 hasta 765 kV.

c) **NÚCLEO**

Los transformadores de intensidad, tanto de medida como de protección, se construyen con núcleos de chapa magnética de gran permeabilidad. Cabe diferenciar que cuando un núcleo va destinado para un transformador de medida se utiliza una chapa de rápida saturación, mientras que si va destinado para protección, la chapa a utilizar será de saturación débil o lenta. Veamos las siguientes curvas de imantación:

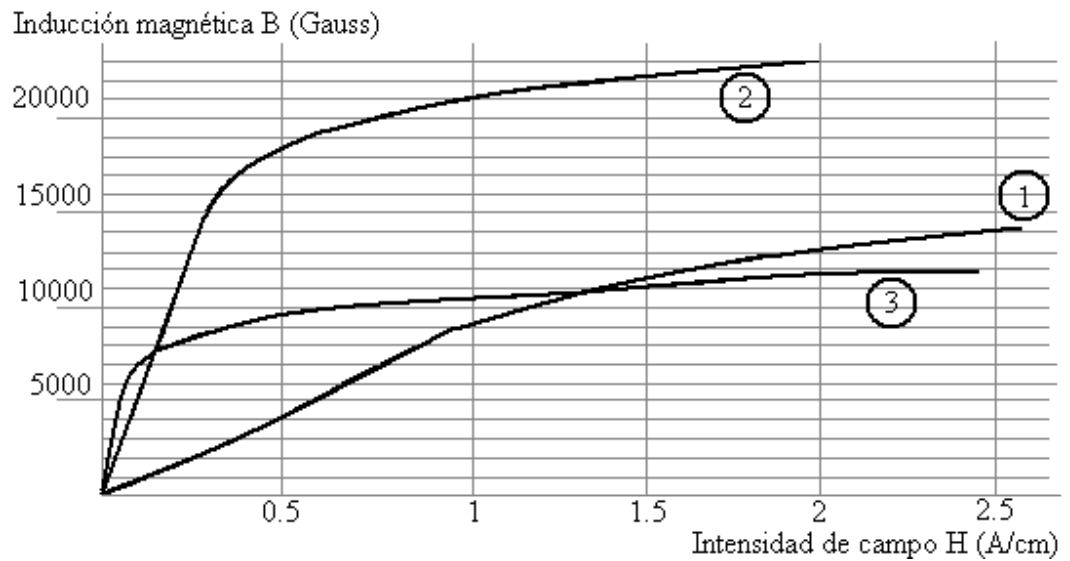


Figura 1.4 Curvas de Imantación

1.- Chapa con alto porcentaje de silicio.

2.- Chapa de aleación ferromagnética a base de níquel (30% al 70%) de gran permeabilidad magnética y débil poder de saturación.

3.- Ídem anterior pero con gran poder de saturación.

Las chapas de las curvas 2 y 3 se llaman comercialmente Mu – Metal o Permalloy.

Con esta distinción de núcleos se garantiza, cuando se utiliza una chapa de gran permeabilidad y de rápida saturación en los transformadores para medida, una buena precisión para corrientes primarias no superiores al 120 % de la corriente primaria nominal, mientras que las sobreintensidades y cortocircuitos no se transfieren al secundario gracias a la rápida saturación de la chapa.

Por otra parte, cuando se elige una chapa de gran permeabilidad y saturación débil para transformadores de protección, se garantiza el mantenimiento de la relación de transformación para valores de intensidad primaria varias veces superior a la nominal, con lo que en el secundario se pueden obtener valores proporcionales a las corrientes de sobrecarga y cortocircuito aptos para poder accionar los dispositivos de protección.

Con estos razonamientos en la elección del tipo de chapa para los núcleos se puede comprender que se instalen núcleos separados cuando se desea tener en un mismo transformador un devanado secundario para medida y otro para protección.

d) ARROLLAMIENTO PRIMARIO

Es de pletina de cobre electrolítico puro, en barra pasante o formando varias espiras distribuidas por igual alrededor del núcleo. Existe la posibilidad de construir el arrollamiento partido con acceso a los extremos de cada parte para que a base de realizar conexiones en serie o paralelo de las partes del arrollamiento, se puedan obtener diferentes relaciones de transformación.

e) ARROLLAMIENTO SECUNDARIO

Es de hilo de cobre electrolítico puro, esmaltado, uniformemente distribuido alrededor del núcleo. Existe la posibilidad de cambio de relación de transformación por tomas secundarias. Es el

arrollamiento que alimenta los circuitos de intensidad de los instrumentos de medida, contadores, y relés.

f) BORNES TERMINALES PRIMARIOS

Pueden ser de latón, bronce o aluminio, están ampliamente dimensionados y son de forma cilíndrica, planos o con tornillos.

g) BORNES TERMINALES SECUNDARIOS

Son de latón y se hallan alojados en una caja de bornes de baja tensión

1.7.3 PARÁMETROS DE LOS TRANSFORMADORES DE CORRIENTE.⁴

a) Corrientes.

Las corrientes primaria y secundaria de un transformador de corriente deben estar normalizadas de acuerdo con cualquiera de las normas nacionales (IRAM) o internacionales en uso (IEC, ANSI)

b) Corriente primaria.

Para esta magnitud se selecciona el valor normalizado inmediato superior de la corriente calculada para la instalación.

Para estaciones de potencia, los valores normalizados son: 100, 200, 300, 400, 600, 800, 1.200, 1.500, 2.000 y 4.000 amperes.

⁴ Nessler, Herber y otro: *Construcción y funcionamiento del transformador*. Pag. 78

c) Corriente secundaria.

Valores normalizados de 5 A ó 1 A, dependiendo su elección de las características del proyecto.

d) Carga secundaria o prestación

Es el valor de la impedancia en Ohms, reflejada en el secundario de los transformadores de corriente, y que está constituida por la suma de las impedancias del conjunto de todos los medidores, relés, cables y conexiones conectados en serie con el secundario y que corresponde a la llamada potencia de precisión a la corriente nominal secundaria. Es decir, una potencia de precisión de 30 VA para una corriente nominal secundaria de 5 amperes, representa una impedancia de carga de:

$$\frac{30}{5^2} = 1,20\Omega$$

La carga se puede expresar también, por los volt - amperes totales y su factor de potencia, obtenidos a un valor especificado de corriente y frecuencia.

El valor del factor de potencia normalizado es de 0,9 para los circuitos de medición y de 0,5 para los de protección. Todos los aparatos, ya sean de medición o de protección, traen en el catálogo respectivo la carga de acuerdo con su potencia de precisión.

e) Límite térmico

Un transformador debe poder soportar en forma permanente, hasta un 20% sobre el valor nominal de corriente, sin exceder el nivel de temperatura especificado. Para este límite las normas permiten una densidad de corriente de $2 \text{ A} / \text{mm}^2$, en forma continua.

f) Límite de cortocircuito

Es la corriente de cortocircuito máxima que soporta un transformador durante un tiempo que varía entre 1 y 5 segundos. Esta corriente puede llegar a significar una fuerza del orden de varias toneladas. Para este límite las normas permiten una densidad de corriente de $143 \text{ A} / \text{mm}^2$ durante un segundo de duración del cortocircuito.

g) Tensión secundaria nominal

Es la tensión que se levanta en los terminales secundarios del transformador al alimentar éste una carga de veinte veces la corriente secundaria nominal.

Por ejemplo, si se tiene un transformador con carga nominal de 1,20 ohms, la tensión secundaria generada será de:

$$1,20 \text{ ohms} \times 5 \text{ amperes} \times 20 \text{ veces} = 120 \text{ volts.}$$

h) Relación de transformación real

Es el cociente entre la corriente primaria real y la corriente secundaria real.

i) Relación de transformación nominal

Es el cociente entre la corriente primaria nominal y la corriente secundaria nominal.

j) Error de corriente

Error que el transformador introduce en la medida de una corriente y que proviene del hecho de que la relación de transformación real no es igual a la relación de transformación nominal. Dicho error viene expresado por la fórmula:

$$\text{Error de corriente \%} = \frac{k_n \cdot I_S - I_P \cdot 100}{I_P}$$

Donde: k_n es la relación de transformación nominal. I_P es la corriente primaria real. I_S es la corriente secundaria real correspondiente a la corriente I_P en las condiciones de la medida.

k) Error de fase (válido sólo para intensidades senoidales)

Es la diferencia de fase entre los vectores de las intensidades primaria y secundaria, con el sentido de los vectores elegido de forma que este ángulo sea nulo para un transformador perfecto. El error de fase se considera positivo cuando el vector de la intensidad secundaria está en avance sobre el vector de la intensidad primaria. Se expresa habitualmente en minutos o en centiradianes.

l) Potencia nominal o de precisión

Es la potencia aparente secundaria que a veces se expresa en volt-amperes (VA) y a veces en ohms, bajo una corriente nominal determinada y que se indica en la placa de características del aparato.

Para escoger la potencia nominal de un transformador, se suman las potencias de las bobinas de todos los aparatos conectados en serie con el devanado secundario, más las pérdidas por efecto joule que se producen en los cables de alimentación, y se selecciona el valor nominal inmediato superior.

Los valores normales de la potencia de precisión son: 2,5 - 5 - 10 – 15 - 30 y hasta 60 VA.

Para los secundarios de 5 amperes, la experiencia indica que no se deben utilizar conductores con secciones no inferiores a los 4 mm². Este conductor sobredimensionado, reduce la carga y además proporciona alta resistencia mecánica, que disminuye la posibilidad de una ruptura accidental del circuito, con el desarrollo consiguiente de sobretensiones peligrosas.

m) Frecuencia nominal

Valor de la frecuencia en la que serán basadas todas las especificaciones y que será de 60 Hz.

n) Clase de precisión para medición

La clase de precisión se designa por el error máximo admisible, en por ciento, que el transformador puede introducir en la medición, operando con su corriente nominal primaria y la frecuencia nominal.

o) Clase de precisión para protección

Los transformadores con núcleos para protección, se diseñan para que la corriente secundaria sea proporcional a la primaria, para corrientes con valores de hasta 30 veces el valor de la corriente nominal.

p) Resistencia de los transformadores de corriente a los cortocircuitos

Esta resistencia está determinada por las corrientes de límites térmico y dinámico definidas como:

➤ **Corriente de límite térmico.** Es el mayor valor eficaz de la corriente primaria que el transformador puede soportar por efecto joule, durante un segundo, sin sufrir deterioro y con el circuito secundario en cortocircuito. Se expresa en kiloamperes eficaces o en múltiplos de la corriente nominal primaria.

La elevación de temperatura admisible en el aparato es de 150°C para aislamiento de clase A. Dicha elevación se obtiene con una densidad de corriente de 143A/mm² aplicada durante un segundo.

La corriente térmica se calcula a partir de:

$$I_{TH} = \frac{MVA_{CC}}{\sqrt{3}kV}$$

Donde

I_{TH} = Valor efectivo de la corriente de límite térmico.

MVA = Potencia de cortocircuito en MVA.

kV = Tensión nominal del sistema en kV.

La corriente térmica en 1 segundo es $I_{TH} = 80 I_n$ (kAef)

➤ ***Corriente de límite dinámico***

Es el valor de pico de la primera amplitud de corriente que un transformador puede soportar por efecto mecánico sin sufrir deterioro, con su circuito secundario en cortocircuito.

Se expresa en kiloamperes de pico, de acuerdo con la expresión

$$I_{din} = 1,8\sqrt{2}I_{TH} = 2,54I_{TH} = 200I_n$$

Donde:

I_{din} = Valor de pico de la corriente dinámica.

En la práctica, para construir transformadores resistentes a los cortocircuitos se requieren grandes secciones de cobre en los bobinados, lo que reduce el número de espiras del primario.

Como la potencia de precisión varía sensiblemente con el cuadrado del número de amper - vueltas del primario, la precisión de los transformadores que pueden resistir cortocircuitos disminuye considerablemente. O sea, para tener

un transformador con características elevadas de resistencia al cortocircuito, habría que limitar la precisión al mínimo.

q) Placa de características

Los transformadores de intensidad deben llevar una placa de características, indeleble, en la que deben figurar, l a s siguientes indicaciones según norma IEC 60185.

- Nombre del constructor o cualquier otra marca que permita su fácil identificación.
- Número de serie y designación del tipo.
- Corrientes nominales primaria y secundaria en amperes (400/5 A).
- Frecuencia nominal en Hz.
- Potencia de precisión y clase de precisión correspondiente a cada núcleo.
- Tensión más elevada de la red (145 kV).
- Nivel de aislamiento nominal (275/650 kV).

1.7.4 TRANSFORMADOR DE INTENSIDAD PARA MEDIDA

Son los transformadores de intensidad destinados a alimentar los aparatos de medida, contadores y otros aparatos análogos.

Para proteger los aparatos alimentados por el transformador, en caso de corto-circuito en la red en la cual está intercalado el primario, se tiene en cuenta el “Factor nominal de seguridad”, que se define como:

$$F_s = I_{ps}/I_{pn}$$

Donde: I_{ps} es la “intensidad nominal de seguridad”

I_{pn} es la “intensidad primaria nominal”

La intensidad nominal de seguridad, es la intensidad primaria, para la que, el transformador ha comenzado a saturarse. En este momento, la intensidad secundaria multiplicada por la relación de transformación nominal, debe ser menor o igual a 0,9 veces la intensidad primaria. Se puede escribir entonces:

$$K_n I_{ss} < 0,9 I_{ps}$$

En la figura 1.5 vemos la relación entre las intensidades primaria y secundaria, para $F_s < 5$.

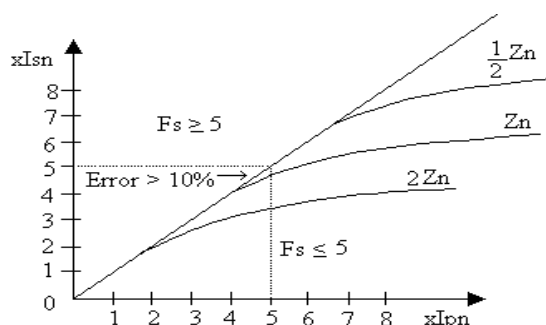


Figura 1.5 relación entre las intensidades primaria y secundaria, para $F_s < 5$.

Para que un transformador de intensidad pueda realizar una clase de precisión elevada con un factor nominal de seguridad bajo, es necesario utilizar en la construcción del núcleo, chapa magnética de gran permeabilidad y de saturación rápida. Esto se logra normalmente, aunque no siempre es posible, con chapa de alto porcentaje de níquel (por ejemplo: Mumetal), de elevado coste. Por ello, antes de escoger F_s ,

debemos comprobar si es necesaria su aplicación, y en caso afirmativo consultar con el fabricante la posible modificación del precio del transformador.

1.7.4.1 CLASE DE PRECISIÓN

La clase de precisión de un transformador de intensidad para medida, está caracterizada por un número (índice de clase) que es el límite del error de relación, expresado en tanto por ciento para la intensidad nominal primaria estando alimentando el transformador la “carga de precisión”.

Las clases de precisión de los transformadores de intensidad para medida son: 0,1, 0,2, 0,5, 1 y 3.

Guía de aplicación:

- Clase 0,1 - Laboratorio.
- Clase 0,2 - Laboratorio, patrones portátiles, contadores de gran precisión.
- Clase 0,5 - Contadores normales y aparatos de medida.
- Clase 1 - Aparatos de cuadro.
- Clase 3 - Para usos en los que no se requiere una mayor precisión.

1.7.4.2 TRANSFORMADORES DE GAMA EXTENDIDA

Son transformadores de intensidad para medida, cuyas características de precisión y calentamiento se extienden a valores de la intensidad primaria, superiores al 120% de la nominal.

Es normal considerar como límite de la gama el 150% y el 200% de la intensidad primaria nominal.

Para aplicaciones especiales, en los TI de clase 0,2 y 0,5 con $I_{sn} = 5A$ puede extenderse la precisión hasta el 1% de I_{pn} , pasando las clases a denominarse 0,2S y 0,5S.

1.7.4.3 VERIFICACIÓN⁵

La verificación de la clase en los transformadores de intensidad para medida, consiste en medir su relación de transformación con una precisión que debe ser necesariamente del orden de 0,01%.

La realización de este ensayo, en forma absoluta, solamente es posible en laboratorios especializados.

Afortunadamente, utilizando transformadores patrones, debidamente contrastados, es posible obtener, por comparación, en puentes de verificación, los errores de cualquier transformador, con la precisión necesaria.

Tabla 1.2 precisiones normalizadas en transformadores de corriente

Clase.	Utilización.
0.1	Aparatos para mediciones y calibraciones de laboratorio.
0.2 a 0.3	Mediciones de laboratorio y alimentaciones para los kilowátmetros hora de alimentadores de potencia.
0.5 a 0.6	Alimentación para de kilowátmetros hora de facturación en circuitos de distribución e industriales.
1.2	Alimentación a las bobinas de corriente de los aparatos de medición en general, indicadores o registradores y a los relés de las protecciones diferencial, de impedancia y de distancia.
3 a 5	Alimentación a las bobinas de los relés de sobrecorriente.

⁵ Nessler, Herber y otro: *Construcción y funcionamiento del transformador*. Pag. 89

Para verificar el factor de seguridad, podemos utilizar dos métodos:

- Alimentando el arrollamiento primario con la intensidad nominal de seguridad, verificando que el error en el secundario, con su carga de precisión, es mayor o igual al 10%.
- Excitar el transformador a través del arrollamiento secundario hasta obtener en bornes secundarios:

$$U_o = F_s I_{sn} Z_t, \text{ y comprobando que } I_o \geq 0,1 F_s I_{sn}.$$

Es importante recordar que el factor de seguridad depende de la carga secundaria, aumentando su valor, en la misma proporción en que la carga total disminuye.

1.7.5 IDENTIFICACIÓN DE BORNES

Los bornes de los arrollamientos primario y secundario deben poder ser identificados con fiabilidad. Para ello, en la norma IEC 60185 se indica el criterio a seguir para su nomenclatura, siendo aquellos bornes que empiecen con P y C los del arrollamiento primario, y los que empiecen con S los del arrollamiento secundario. En las figuras 1.6 se visualizan los diferentes casos.

1. Transformador de simple relación.
2. Transformador con toma intermedia en el secundario.
3. Transformador con dos secciones en el arrollamiento primario para su conexión en serie o paralelo.
4. Transformador con dos arrollamientos secundarios y núcleos independientes.

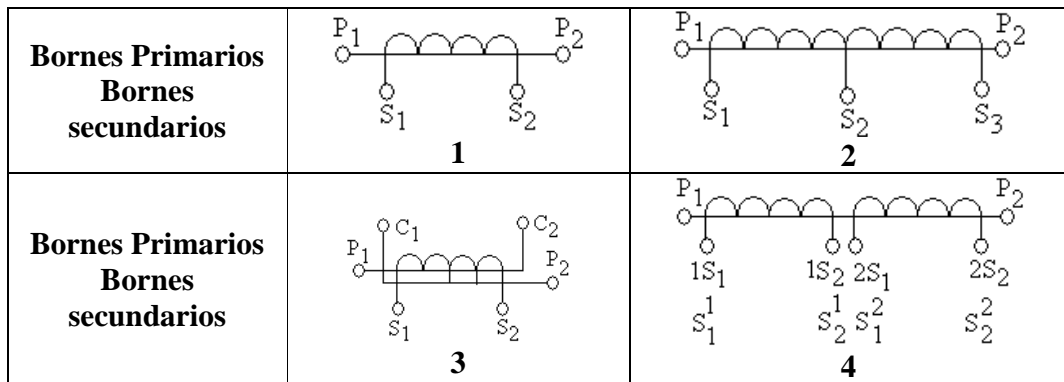


Figura 1.6 dos posibilidades de identificación de los bornes secundarios.⁶

Todos los terminales identificados con P1, S1 y C1 deben tener la misma polaridad en el mismo instante.

Los bornes terminales deben marcarse o identificarse clara e indeleblemente sobre su superficie o en su inmediata vecindad

La identificación consiste de letras seguidas, o precedidas donde fuera necesario, por números. Las letras deben ser siempre mayúsculas.

1.7.6 CONDICIONES DE SERVICIO.⁷

Los transformadores son apropiados para su empleo bajo las siguientes condiciones de servicio, según IEC 60185.

- **Temperatura ambiente.**

Temperatura máxima 40 °C

Valor máximo de la media en 24 horas 35 °C

- **Temperatura mínima.**

Transformadores para interiores - 5 °C

Transformadores para intemperie - 25 °C

⁶ Nessler, Herber y otro: *Construcción y funcionamiento del transformador*. Pag. 98

⁷ Nessler, Herber y otro: *Construcción y funcionamiento del transformador*. Pag. 102

- **Humedad relativa del aire.**

Transformadores para interiores hasta 70 %

Transformadores para intemperie hasta 100 %

1.7.7 REQUERIMIENTOS DE AISLACIÓN⁸

El nivel de aislación nominal del bobinado primario de un transformador de corriente está en relación con la máxima tensión permanente admisible de servicio del sistema (Um). Para bobinados comprendidos entre 3,6 kV o superiores, pero menores de 300 kV, el nivel de aislación nominal es determinado por las tensiones nominales resistidas a frecuencia industrial e impulso de rayo y deben ser elegidas según la tabla 1.3 de la IEC 60185/95.

Tabla 1.3⁹

Tensión Máxima Permanente Admisible de Servicio Um kV	Tensión Nominal Resistida a Frecuencia Industrial (Valor Eficaz) kV	Tensión Nominal Resistida a Impulso de Rayo (Valor Pico) kV
3,6	10	20
		40
7,2	20	40
		60
12	28	60
		75
17,5	38	75
		95
24	50	95
		125
36	70	145
		170
52	95	250
72,5	140	325
100	185	450
123	185	450
	230	550
145	230	550
	275	650
170	275	650
	325	750
245	395	950
	460	1050

Nota: Para instalaciones expuestas es recomendable elegir los niveles de aislación mas altos

⁸ Nessler, Herber y otro: *Construcción y funcionamiento del transformador*. Pag. 104

⁹ Nessler, Herber y otro: *Construcción y funcionamiento del transformador*. Tabla 12 pag. 110

1.7.8 REQUERIMIENTOS DE EXACTITUD

Los transformadores de corriente para medida son aquellos especialmente concebidos para alimentar equipos de medida, siendo una de sus características fundamentales el hecho de que deben ser exactos en las condiciones normales de servicio.

El grado de exactitud de un transformador de medida se mide por su clase o precisión, la cual nos indica en tanto por ciento el máximo error que se comete en la medida.

La norma IEC especifica que la clase o precisión debe mantenerse siempre y cuando la corriente que circula por el arrollamiento primario se encuentre por debajo del 120 % de la corriente primaria nominal debiendo también mantenerse dicha precisión cuando la carga conectada al secundario del transformador esté comprendida entre el 25 y el 100 % de la carga nominal.

Los grados de precisión se dividen en dos grupos: clases de precisión normales y clases de precisión especiales.

Los transformadores de clase de precisión especial son los que se utilizan para aquellos equipos de medida que garantizan su exactitud entre el 20 y el 120 % de la corriente nominal del secundario del transformador. El valor de corriente del secundario de estos transformadores es de 5 A.

Ambas clases de precisión quedan reflejadas en las tablas 1.4. y 1.5¹⁰:

Tabla 1.4

Clases de Precisión Normales de los Transformadores de Corriente de Medida.								
Clase de precisión	Error de relación ($\pm\varepsilon_i$) en % para los valores de la corriente en % de la corriente nominal.				Error de fase ($\pm\delta_i$) en minutos para los valores de la corriente en % de la corriente nominal.			
	5	20	100	120	5	20	100	120
0,1	0,4	0,2	0,1	0,1	15	8	5	5
0,2	0,75	0,35	0,2	0,2	30	15	10	10
0,5	1,5	0,75	0,5	0,5	90	45	30	30
1	3	1,5	0,1	0,1	180	90	60	60

Tabla 1.5

Clases de Precisión Especiales de los Transformadores de Corriente de Medida de Gama Extendida. ($I_{2n} = 5 A$)										
Clase de precisión	Error de relación ($\pm\varepsilon_i$) en % para los valores de la corriente en % de la corriente nominal.					Error de fase ($\pm\delta_i$) en minutos para los valores de la corriente en % de la corriente nominal.				
	1	5	20	100	120	1	5	20	100	120
0,2 S	0,75	0,35	0,2	0,2	0,2	30	15	10	10	10
0,5 S	1,5	0,75	0,5	0,5	0,5	90	45	30	30	30

Los transformadores de corriente para protección son los destinados a alimentar relés de protección, por lo que deben garantizar una precisión suficiente para corrientes primarias que sean varias veces superiores a la corriente primaria nominal.

Para estos transformadores ya no se considera el mismo error que representa la clase de precisión en los transformadores de medida, sino que se considera el error compuesto, el cual se define como el valor eficaz de la diferencia integrada en un periodo entre los valores

¹⁰ Nessler, Herber y otro: *Construcción y funcionamiento del transformador*. Pags. 112 -113

instantáneos de la corriente primaria y el producto de la relación de transformación nominal por los valores instantáneos de la corriente secundaria real.

Este valor se expresa en tanto por ciento y viene expresado por:

$$\sum_c = \frac{100}{I_p} \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (k_n \cdot I_s - I_p)^2 dt}$$

Donde:

I_p es la corriente nominal primaria

I_s es la corriente secundaria real

k_n es la relación de transformación nominal

T es el periodo de integración.

Si las intensidades I_p e I_s son senoidales, el error compuesto es la suma vectorial del error de relación y del error de fase quedando la fórmula.

$$\sum_c = \sqrt{\varepsilon_i^2 - \delta_i^2}$$

Definiéndose como corriente límite de precisión nominal aquella corriente primaria más elevada para la cual, estando el transformador con la carga de precisión, se asegura que no se sobrepasará el error compuesto. A partir de este concepto de error compuesto, las clases de precisión para los transformadores de corriente para protección son las de la tabla 1.6.

Tabla 1.6

Clases de Precisión Normales de los Transformadores de Corriente de Protección.			
Clase de precisión.	Error de relación ($\pm\varepsilon_i$) en % para la corriente nominal.	Error de fase ($\pm\delta_i$) en minutos para la corriente nominal.	Error compuesto en % para la corriente límite de precisión.
5 P	± 1	± 60	5
10 P	± 3	-	10

Por ejemplo, 10 P 30 significa que el transformador de protección presenta un error total compuesto del 10 por 100, a una corriente 30 veces mayor que la nominal.

Dada la diferencia entre los conceptos de precisión en los transformadores de corriente para medida y para protección, cuando se construyen transformadores de corriente con dos o más arrollamientos, se los hará con núcleos independientes, ya que las características de un núcleo de un transformador al que se le exige una precisión determinada para una corriente primaria que no supere el 120 % de la corriente nominal, no pueden ser las mismas que las de un núcleo de un transformador al que se le existe mantener una determinada precisión para valores de corriente primaria varias veces superior a la corriente nominal primaria.

1.7.9 ELECCIÓN DE UN TRANSFORMADOR DE CORRIENTE

Es conveniente, para una correcta instalación de un transformador de corriente, un estudio detallado para la elección del mismo, del cual dependerá el funcionamiento y seguridad de la instalación. A título orientativo se recomienda seguir las siguientes pautas:

- Tipo de instalación: si es de interior o intemperie. Se deberá tener en cuenta la altitud para alturas superiores a 1.000 metros sobre el nivel del mar.

- Nivel de aislamiento: definido por tensión máxima permanente admisible de servicio U_m en kV
- Relación de transformación nominal: las relaciones de transformación nominal deberán ser normalizadas, tal y como quedan indicadas en la norma IEC. Se recomienda no seleccionar un transformador de corriente con una corriente primaria excesivamente elevada con respecto a la que le corresponda, dado que de ello depende que se mantenga la precisión del transformador. En caso de que sea necesario recurrir a un sobre dimensionamiento del valor de intensidad primaria, a la doble y a la triple relación y a la gama extendida en caso que sea necesario.
- Clase de precisión: se seleccionará la clase de precisión en función de la utilización que vaya a recibir el transformador. Las clases de precisión quedan reflejadas en las tablas dadas.
- Potencia nominal: según la carga a conectar en el secundario se adoptará uno de los valores de potencia de precisión especificados en la norma. Conviene no sobredimensionar excesivamente la potencia del transformador. Si el secundario tiene una carga insuficiente, se puede intercalar una resistencia para compensar.
- Frecuencia nominal: si no se especifica otra distinta, se tomará por defecto 60 Hz.

- Número de secundarios: si se desea realizar medida y protección a partir de un mismo transformador, serán necesarios tantos secundarios como usos se deseen obtener del mismo.
- Resistencias a los esfuerzos térmicos y dinámicos: vendrán determinados por los respectivos valores de intensidad límite térmica e intensidad límite dinámica. Conviene no sobredimensionar estos valores para no encarecer mucho el transformador.

1.8 CARGA

Es la impedancia del circuito exterior alimentado por el arrollamiento secundario, expresada en Ohmios, con indicación de su factor de potencia. Puede ser indicada también por su factor de potencia y la potencia aparente en voltio-amperios, que absorbe para la intensidad secundaria nominal. Por ejemplo: Potencia de precisión 30VA para $I_{sn} = 5 A$

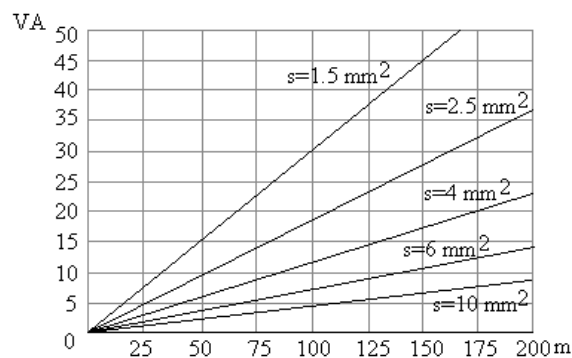


Figura 1.7 Consumo en VA de los cables normalmente utilizados.

Al calcular la carga secundaria, hay que añadir a la carga de los aparatos de medida, la carga de los cables de conexión. Veamos a continuación la tabla 1.7, en la que se indican los consumos en VA, de bobinas amperimétricas usuales.

1.9 RESISTENCIA A LOS CORTOCIRCUITOS

Por estar conectados en serie a las líneas de alimentación, los transformadores de intensidad están sometidos a las mismas sobretensiones y sobreintensidades que éstas.

Tabla 1.7 Consumo de algunos aparatos alimentadores por TI

Aparato	VA a In
Amperímetros	
- Indicadores	0.25 a 2
- Registradores	1.5 a 9
- Contadores	0.5 a 3
Vatímetros	
- Indicadores	1 a 3
- Registradores	1.5 a 8
Fasímetros	
- Indicadores	2 a 6
- Registradores	6 a 12
- Maximetros	3
- Convertidores de potencia	3 a 6
Relés	
- De sobreintensidad, de tiempo inver.	5 a 8
- De sobreintensidad, temporizados	1 a 5
- De sobreintensidad, instantáneos	1 a 10
- direccionales	1.5 a 10
- De potencia, temporizados	1.5 a 3
- diferenciales	3 a 12
- De distancia	6 a 20
- Reguladores	10 a 150

En general, estas sobreintensidades son muy superiores a las intensidades nominales de los TI y originan efectos térmicos y dinámicos que pueden dañar el transformador. Los efectos térmicos obligan a dimensionar adecuadamente el primario del TI. Se considera que todo el calor producido queda almacenado en el conductor primario, cuyo calentamiento máximo se determina en cada norma.

Para evitar que el transformador se rompa por los esfuerzos dinámicos que se producen en el primario, es necesario adecuar una sujeción mecánica en dicho primario.

Estos esfuerzos mecánicos, son función del valor máximo de cresta de la intensidad de cortocircuito.

Conocida la potencia máxima de cortocircuito de la línea en la que está colocado el TI, podemos calcular la intensidad térmica con la fórmula:

$$I_{term} = \frac{P}{\sqrt{3}.V}$$

Donde

I_{term} = Intensidad térmica de cortocircuito (kA ef.)

P = Potencia de cortocircuito (MVA)

V = Tensión compuesta (kV)

La intensidad dinámica de corto se obtiene a partir de la térmica, teniendo en cuenta que ésta viene dada en valor eficaz y aquélla en valor de cresta máximo. El coeficiente debido a la componente aperiódica, se considera normalmente 1,8 (normas CEI, UNE, etc.). Por tanto:

$$I_{din} = 1.8\sqrt{2}I_{term} = 2,5I_{term}$$

donde:

I din = Intensidad dinámica de cortocircuito (kA cr.)

La resistencia a los cortocircuitos de los transformadores de intensidad, se determina por las intensidades límite térmica y dinámica.

1.10 CLASIFICACIÓN DE ENSAYOS SEGÚN IEC 60185/95

Los ensayos especificados en la norma IEC son clasificados como ensayos de tipo, ensayos de rutina y ensayos especiales.

El ensayo de tipo es el efectuado sobre un transformador de cada tipo para demostrar que todos los transformadores construidos con la misma especificación cumplen con los requerimientos no cubiertos por los ensayos de rutina.

El ensayo de rutina se efectúa en forma individual sobre cada transformador.

Los ensayos especiales son aquellos acordados entre el fabricante y el cliente.

Ensayos de tipo.

Los siguientes deben ser efectuados e efectos de verificar el diseño.

- Corrientes de corta duración: I_{th} e I_{din}
- Calentamiento.
- Tensión de impulso de rayo.
- Tensión de impulso de maniobra.
- Tensión aplicada a frecuencia industrial bajo lluvia para los transformadores de intemperie.
- Determinación de errores.

Todos los ensayos dieléctricos de tipo deben ser efectuados sobre el mismo transformador.

Después que los transformadores han sido sometidos a los ensayos dieléctricos de tipo deben ser sometidos a todos los ensayos de rutina.

Ensayos de rutina.

- Verificación de la identificación de los bornes terminales.
- Tensión aplicada a frecuencia industrial sobre el bobinado secundario.
- Tensión aplicada a frecuencia industrial entre secciones del bobinado secundario.
- Medida de la sobretensión secundaria intermitente a circuito abierto.
- Tensión aplicada a frecuencia industrial sobre el bobinado primario.
- Medida de descargas parciales.
- Determinación de errores.

Ensayos especiales

- Tensión de impulso de rayo con onda cortada.
- Medida de la capacidad y del factor de disipación dieléctrica ($\tan\delta$)
- Tensión de impulso de rayo repetitiva con onda cortada en el bobinado primario.
- Pruebas mecánicas.

CAPITULO 2

AISLAMIENTO EN LOS TRANSFORMADORES DE CORRIENTE

2.1 INTRODUCCIÓN

Los materiales aislantes se definen como: “aquellos materiales no conductores, por lo tanto, que no dejan pasar la electricidad, debido a que los electrones de sus átomos están fuertemente unidos a sus núcleos, por lo que prácticamente no permite sus desplazamientos y, por ende, el paso de la corriente eléctrica cuando se aplica una diferencia de tensión entre dos puntos del mismo.”

La elección del tipo de aislamiento de los transformadores requiere de un trabajo muy elaborado, ya que debido al rol que cumplen estos equipos en un sistema eléctrico deben ser de alta confiabilidad, por lo que es necesario el empleo de distintos materiales en el diseño de la estructura del aislamiento.

Los materiales aislantes empleados en transformadores están presentes en todos los estados de la materia y la mayoría de las veces se combinan elementos sólidos con líquidos o gases dieléctricos.

Aunque el objetivo principal de un transformador de medida (TM) es transformar con precisión las magnitudes de tensión o intensidad a valores normalizados, tanto en régimen transitorio como establecido, si está

conectado a una línea de alta tensión su función de aislamiento eléctrico adquiere gran importancia.

La aparición de resinas sintéticas de tipo epoxi permitió utilizar el mismo aislante para el aislamiento interno y externo en los TM de media tensión y servicio interior (figura 2.1a). Posteriormente con resinas de tipo cicloalifático o materiales como el butilo con mejores características ante los arcos eléctricos superficiales y rayos ultravioleta, se ha podido utilizar la misma técnica para el diseño de TM de servicio exterior (figura 2.2 b)). No obstante en estos casos la línea de fuga debe ser superior a la utilizada en los aisladores de porcelana debido a su carácter orgánico y consiguiente menor resistencia a los citados arcos eléctricos.

Es posible combinar las ventajas de fabricación del aislamiento sólido con una elevada resistencia externa, donde se combinan la resina epoxi con la porcelana en un TM de media tensión.

En este caso debe garantizarse la estanqueidad de la cámara entre ambos elementos para evitar que se humedezca y como consecuencia de ello se produzca un arco entre alta y baja tensión a través de dicha cámara.

A pesar de diversas experiencias en la utilización de estos materiales en alta tensión, se ha comprobado que no son aconsejables para tensiones superiores a 72 kV por lo que se sigue empleando el papel-aceite como aislamiento interno, aunque es un procedimiento más laborioso, y porcelana para el exterior.

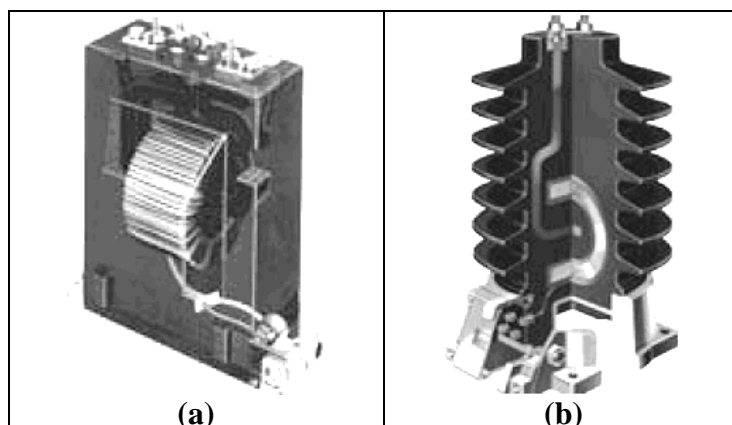


Figura 2.1 a) TI de servicio interior b) TI de servicio exterior¹¹

2.2 MATERIALES AISLANTES

2.2.1 MATERIALES AISLANTES SÓLIDOS

Entre los aislantes sólidos más utilizados en la actualidad en los sistemas de aislamiento de transformadores destacan las cintas sintéticas PET (tereftalato de polietileno), PEN (naftalato de polietileno) y PPS (sulfido de polifenileno) que se utilizan para envolver los conductores magnéticos de los bobinados, razón por la cual estas cintas deben exhibir, además de excelentes propiedades dieléctricas, buena adherencia sobre los alambres magnéticos, que poseen cobertura de barniz. Otro elemento de gran importancia en el aislamiento entre vueltas de las bobinas de transformadores es el cartón prensado o pressboard, el cual da forma a estructuras de aislamiento rígidas.

¹¹ **Ras Oliva, Enrique:** *Máquinas Eléctricas*. Mc. Graw-Hill, Bogotá, Colombia, **Hayden, Michael** pag. 213

2.2.2 FLUIDOS DIELECTRICOS

Los fluidos o líquidos dieléctricos cumplen la doble función de aislar los bobinados en los transformadores y disipar el calor al interior de estos equipos. El líquido dieléctrico más empleado es el aceite mineral, el cual se obtiene a través de procesos de refinación del petróleo de manera similar a los aceites lubricantes. El principal inconveniente del aceite mineral es su carácter inflamable, por lo que se han elaborado fluidos dieléctricos sintéticos o hidrocarburos con alto punto de inflamación (sobre 300 °C).

En lo que respecta a los líquidos aislantes sintéticos, el más utilizado desde principios de la década de 1930 hasta fines de los 70's fue el ascarel o PCB. Los ascareles poseían buenas propiedades dieléctricas y además se caracterizaban por no ser inflamables. Estas características justificaron la utilización de los PCB's en transformadores con clases de tensión de hasta 34.5 kV, no obstante, el ascarel dejó de utilizarse debido a su impacto ambiental, ya que se trata de un líquido extremadamente contaminante.

En la actualidad se han desarrollado fluidos sintéticos de características biodegradables o bien con alto punto de inflamación; dentro de estos nuevos líquidos sintéticos destacan las siliconas y los poly-alfa-olefines. El alto costo de estos nuevos aislantes sumado a su menor disponibilidad constituyen los principales obstáculos para generalizar el uso de estos líquidos sintéticos en el aislamiento de transformadores.

2.2.3 GASES AISLANTES¹²

Los gases aislantes más utilizados en los transformadores son el aire y el nitrógeno, este último a presiones de 1 atmósfera. Los transformadores que emplean estos gases como parte de su aislamiento son por lo general de construcción sellada.

Recientemente se han desarrollado transformadores de alta capacidad aislados con SF₆ (Hexafloruro de sodio), los cuales aún se construyen sólo a nivel de prototipos. El SF₆ se caracteriza por no ser inflamable ni contaminante. Este gas tiene menor capacidad de disipación de calor que el aceite mineral, lo cual se puede mejorar aumentando la presión del SF₆ en el tanque del transformador.

El SF₆ es muy conocido por su utilización en subestaciones blindadas. La presión de trabajo suele ser de 3,5 a 4,5 bares absolutos, ya que sus características dieléctricas mejoran notablemente con la presión, pero cuidando que no se produzca condensación a baja temperatura. Este aspecto es importante en los TM ya que se instalan al exterior con temperaturas de -25oC o inferiores.

Un inconveniente de este aislante es que así como en las subestaciones blindadas se realiza un control riguroso de la presión del gas, desconectando el sistema cuando ésta baja, en los TM resulta complicado utilizar métodos similares.

¹² **Ras Oliva, Enrique:** *Máquinas Eléctricas*. Mc. Graw-Hill, Bogotá, Colombia, **Hayden, Michael** pag. 245

2.2.4 BARNICES Y RESINAS

Los barnices y resinas aislantes se utilizan para cubrir, con una capa delgada y flexible, los conductores magnéticos que componen las bobinas de un transformador y además, para encapsular de manera global las bobinas de los transformadores denominados del tipo seco a través de un proceso conocido como VPI (vacuum pressure impregnated). Los barnices más utilizados en la actualidad son aquellos conocidos como solventless, fabricados a base de resina epóxica y poliéster.

2.3 CONTROL DE CALIDAD Y ENSAYOS

Existen normas sobre transformadores de medida (CEI 60044-1, 60044-2, IEEE C57 13 etc.Ver anexo 2) en las que se indican diversos ensayos de tipo y de rutina, en base a los cuáles puede establecerse en cierto modo la calidad de los aparatos.

Sin embargo es necesario completar estos medios de control con otros que garanticen de la mejor manera posible la calidad total de la fabricación. La norma ISO 9000 sobre

Sistemas de Calidad establece, en función del nivel elegido, los procesos o aspectos a controlar en la fabricación, como son: Diseño, Documentos, Proveedores, Inspección en Proceso, Registros, etc.

A continuación comentaremos algunos ensayos finales cuyas características están en estudio, así como algunas condiciones exigidas a los TM, pero no incluidas en normas.

2.3.1 ENSAYOS DIELECTRICOS DE RUTINA

Debido al esfuerzo que supone para el transformador, el ensayo de rigidez a frecuencia industrial, la tendencia es reducir su valor pero midiendo las DP (descargas parciales) a continuación, sin bajar a cero la tensión.

En los TTC se está estudiando un ensayo de DP aplicando ondas de maniobra superpuestas a la frecuencia industrial.

2.3.2 ENSAYOS DE VIDA

Como se ha indicado anteriormente en los TM no es normal que se produzca un envejecimiento térmico. No obstante si se estima conveniente puede aplicarse un ensayo de estabilidad térmica. La medición de $\text{tg} \delta$ después de un ensayo de calentamiento no es suficiente para conocer este fenómeno.

El envejecimiento eléctrico se produce por las DP, y por ello, el ensayo acelerado debe basarse en las curvas tensión-tiempo, de igual probabilidad a DP. Estas curvas son de la forma

$$U = C t^{-\gamma}$$

donde C y γ son constantes.

2.3.3 ENSAYOS ELÉCTRICOS

Los ensayos de $\text{tg} \delta$ y DP (descargas parciales) del transformador, son un complemento adecuado para conocer el estado del aislamiento, pero en general, solamente puede realizarse en un laboratorio.

Hay equipos portátiles para medir $\text{tg} \delta$ a 10 kV, pero es un ensayo complicado porque hay que desconectar el TM de la línea y limpiar el

aislador ya que esta medida varía mucho si no se realiza con cuidado.

Para este ensayo en TI, es conveniente que exista una toma aislada.

2.4 ENSAYOS DE AISLAMIENTO EN TRANSFORMADORES

Los ensayos de aislamiento en transformadores, y en general en cualquier equipo eléctrico, se realizan para verificar que el aislamiento posea características óptimas ya sea en el proceso de fabricación, o bien durante los períodos de mantenimiento del equipo una vez que este ha entrado en servicio.

Para asegurar su correcto funcionamiento, en servicio, todos los transformadores se someten a diversos ensayos antes de salir de fábrica.

Refiriéndonos al problema dieléctrico, los ensayos pueden ser individuales, de tipo o especiales.

En los ensayos de tipo, se verifica el diseño del transformador en general y pueden ser evitados, con la conformidad del cliente, si el fabricante presenta certificados de ensayo de transformadores del mismo modelo o similar.

En los ensayos individuales, se verifica el aislamiento de cada uno de los transformadores, pudiendo distinguir:

- ✓ Diversos ensayos dieléctricos a frecuencia industrial, entre elementos aislados próximos.
- ✓ Ensayos de descargas parciales (DP),
- ✓ tangente del ángulo de pérdidas.
- ✓ Ensayo dieléctrico a frecuencia industrial entre alta tensión y baja tensión.

a) *Diversos ensayos dieléctricos a frecuencia industrial, entre elementos aislados próximos.*

Se puede incluir los realizados para verificar el aislamiento entre bobinados aislados de un mismo arrollamiento, entre secundarios, etc.

b) *Ensayo de descargas parciales (DP)*

Consiste en detectar las pequeñas descargas que se producen entre las paredes de las cavidades que existen en el aislamiento cuando es defectuoso.

En la figura 2.2a, se representa un dieléctrico defectuoso sometido a tensión alterna. La tensión entre las paredes opuestas de la cavidad es superior a la del aislante contiguo, debido a la menor constante dieléctrica del gas.

Asimismo, la rigidez de éste, es inferior a la del resto del aislante, especialmente si existe cierto grado de vacío (ley de Paschen). Por todo ello, se producen descargas entre los extremos de la cavidad, a una tensión de servicio muy inferior a la de rigidez del aislante, que alteran el mismo poco a poco.

Estas descargas son de alta frecuencia y pueden detectarse como se indica en la figura 2.2b, donde C_1 es la capacidad del dieléctrico en paralelo con la cavidad, C_2 es la capacidad de la cavidad y C_3 la del dieléctrico en serie con ella. La capacidad C_k (de acoplamiento) sirve para detectar más fácilmente la DP (aparente) en la impedancia Z .

Este ensayo no es destructivo, y por lo tanto, permite verificar las posibles mejoras del aislamiento, en función del tratamiento realizado.

También permite verificar si el ensayo dieléctrico a frecuencia industrial ha dañado el aislamiento, contrastando el nivel de las descargas parciales antes y después de dicho ensayo.

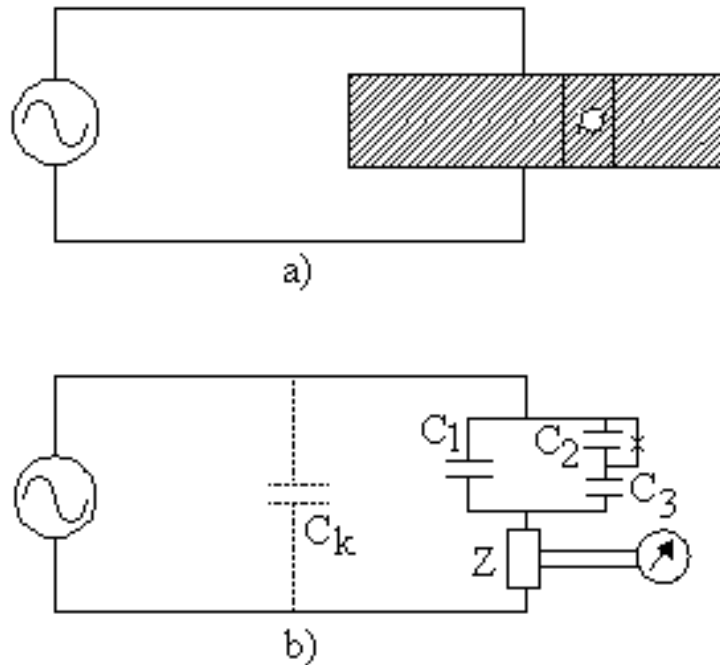


Figura 2.2 Dieléctrico defectuoso

c) Ensayo de la tangente del ángulo de pérdidas ($tg\delta$)

El ensayo de la tangente del ángulo de pérdidas ($tg\delta$) solamente es aplicable a los T I, pues en los T T mide el aislamiento entre P2 y tierra. Es un excelente indicador de la calidad del tratamiento en los transformadores de papel-aceite y permite conocer la evolución del aislamiento en servicio.

Esta prueba también denominada factor de disipación y de forma equivalente al factor de potencia, es una medida de las pérdidas dieléctricas del aislamiento. Su magnitud depende del tipo de aislamiento y de las condiciones del mismo.

El valor de este factor puede verse afectado por la humedad y suciedad en la superficie del aislamiento que permite una circulación de corriente a tierra a través de la superficie del mismo aumentando las pérdidas.

El valor de tangente delta aumenta con las descargas parciales en el aislamiento.

Tenemos que:¹³

$$\text{Factor de disipación} = \tan \delta = \frac{I_w}{I_c}$$

El ángulo θ es complementario al ángulo δ , por lo tanto,

$$\text{Factor de Potencia} = \cos \theta = \frac{I_w}{I} = \frac{\tan \delta}{\sqrt{1 + (\tan \delta)^2}}$$

Por lo que cuando $\delta \ll 1$

$$\delta \cong \tan \delta \cong \cos \theta$$

Esta prueba se utiliza para analizar la calidad de un dieléctrico en diseño, para lo cual es necesario tomar en cuenta la variación del factor de disipación en función de la tensión y el tiempo.

d) Ensayo dieléctrico a frecuencia industrial entre alta tensión y baja tensión.

El primer ensayo, consiste en someter el aislamiento entre alta y baja tensión, a gradientes de tensión muy superiores a los que va a tener en

¹³ **Ras Oliva, Enrique:** *Máquinas Eléctricas*. Mc. Graw-Hill, Bogotá, Colombia, **Hayden, Michael** pag 278

servicio, durante un breve período de tiempo, generalmente un minuto. Este ensayo es clásico y permite garantizar un cierto coeficiente de seguridad en el aislamiento. Sin embargo, sucede a menudo que un transformador que haya soportado este ensayo, tenga una vida activa inferior a la prevista.

Esto puede ocurrir por pequeños defectos en el aislamiento, que no han podido ser detectados y que han provocado su envejecimiento prematuro.

Ante este importante problema, se vienen realizando con éxito los ensayos de verificación de descargas parciales.

2.5 PRINCIPALES ENSAYOS DIELECTRICOS

- Ensayos de impulso
- Ensayos de alto potencial
- Medición de la resistencia del aislamiento
- Medición del factor de disipación y potencia en aislamiento general y en bujes.
- Pruebas para verificar la calidad del aceite
- Detección de gases disueltos en el aceite.
- Detección de descargas parciales en el aislamiento del transformador.

2.5.1 ENSAYOS DE IMPULSO

Estas pruebas se realizan en laboratorio y constituyen ensayos ejecutados por los fabricantes durante el proceso de aceptación del equipo. Los ensayos de impulso permiten determinar si el aislamiento del transformador es capaz de soportar esfuerzos eléctricos asociados a descargas atmosféricas y sobretensiones de maniobra. Lo anterior se consigue aplicando al aislamiento del transformador ondas de tensión de impulso normalizadas de alta tensión (cuya duración es del orden de los microsegundos) que tratan de simular los sobrevoltajes asociados a rayos o a interrupciones en el sistema eléctrico. Si el aislamiento del transformador no sufre ruptura luego de la ejecución de estos ensayos se dice que el equipo ha superado la prueba de impulso.

2.5.2 ENSAYOS DE ALTO POTENCIAL.

Los ensayos de alto potencial consisten en la aplicación de tensiones, a frecuencia industrial, de magnitud superior a los valores nominales del transformador. Estas pruebas permiten verificar la condición del aislamiento en lo que respecta a su capacidad para soportar sobre voltajes a frecuencia de operación, o a mayor frecuencia en el caso de la prueba de potencial inducido. Entre los ensayos de alto potencial se distinguen:

- Ensayo de potencial aplicado
- Ensayo de potencial inducido

Ensayo de potencial aplicado

Consiste en someter al aislamiento del transformador a una sobre tensión a frecuencia industrial (de valor normalizado) durante 1 minuto, y chequea el aislamiento entre los bobinados entre sí y con respecto a tierra.

Ensayo de potencial inducido

Se lleva a cabo para verificar las condiciones del aislamiento entre vueltas en cada una de las bobinas y se realiza a frecuencias del orden de los 120 Hz para no saturar el núcleo del transformador.

2.5.3 MEDICIÓN DE LA RESISTENCIA DEL AISLAMIENTO

La medición de la resistencia del aislamiento se lleva a cabo con un medidor especial para resistencia de aislamiento (conocido como “megger”) que aplica tensión continua entre los bobinados, bobinados con respecto a tierra y con respecto al núcleo. A través de las mediciones anteriores se obtiene los valores de la resistencia del aislamiento. Los valores típicos de resistencia del aislamiento entre bobinados y tierra, en un transformador de poder, es del orden de 400 MΩ, y entre bobinados y núcleo, de 1000 MΩ. La medición de resistencia de aislamiento con respecto al núcleo solo se realizará si este es accesible.

2.5.4 MEDICIÓN DEL FACTOR DE DISIPACIÓN Y FACTOR DE POTENCIA

La prueba del factor de potencia es de gran importancia y utilidad, ya que permite corregir o prevenir en los transformadores aumentos de la intensidad de corriente, pérdidas en los conductores, fuertes caídas de

tensión, incrementos de potencia, reducción de su vida útil, reducción de la capacidad de conducción de los conductores y aumentos de temperatura que implican una disminución de la vida de su aislamiento. El factor de potencia del aislamiento es una cantidad adimensional que normalmente se expresa en porcentaje, se obtiene de la resultante formada por la corriente de carga de pérdidas que toma el aislamiento al aplicarle la corriente de una tensión determinada, lo cual es una característica propia del aislamiento al ser sometido a campos eléctricos.

*El factor de disipación del aislamiento*¹⁴ de un transformador se obtiene por lectura directa a través de un puente capacitivo, también conocido como puente de Schering, que es uno de los puentes más importantes de corriente alterna, se usa ampliamente para la medición de capacitores y tiene especial utilidad en la medición de algunas propiedades de aislamiento, por su parte el factor de potencia se calcula a partir de los valores de factor de disipación obtenidos. Para el aislamiento general del transformador, tanto el factor de disipación, como el de potencia deben asumir valores bajos, pues representan pérdidas indeseables en el aislamiento que pueden diagnosticar presencia de cavidades en esta y por ende aparición de descargas parciales.

¹⁴ **Ras Oliva, Enrique:** *Máquinas Eléctricas*. Mc. Graw-Hill, Bogotá, Colombia, **Hayden, Michael** pag. 301

2.5.5 PRUEBAS PARA LA VERIFICACIÓN DE LA CALIDAD DEL ACEITE.

Estos ensayos están normalizados por los estándares de la ASTM, y se realizan tomando muestras del fluido para verificar las siguientes características del aceite:

- Rigidez dieléctrica en corriente alterna
- Rigidez ante impulso
- Color y apariencia
- Densidad
- Viscosidad
- Punto de fluidez
- Punto de inflamación
- Tensión interfacial
- Número de neutralización (acidez)
- Contenido de agua
- Estabilidad ante oxidación
- Contenido de inhibidores (aditivos)
- Tendencia a absorción de gases
- Factor de potencia y disipación
- Resistividad

El ensayo más requerido dentro de los ya nombrados es la medición de rigidez dieléctrica en el aceite. Esta prueba se lleva a cabo por medio de dos métodos: ASTM D 1816 (electrodos semiesféricos) y ASTM D 877 (electrodos de disco).

Existen otras características en los aceites dieléctricos que se han reconocido de manera más reciente como:

- Contenido de contaminantes
- Análisis de composición química

- Tendencia a generar carga electroestática
- Detección de descargas parciales en el fluido

2.5.6 DETECCIÓN DE GASES DISUELTOS EN EL ACEITE

Para la detección de gases disueltos en el aceite, que pueden resultar ser indicios de falla en el aislamiento del transformador, se emplean los siguientes métodos:

- Medición del total de gases combustibles en el aceite
- Análisis de la capa de gas
- Análisis de gases disueltos en el aceite (cromatografía gaseosa)

La técnica que entrega más información es la cromatografía gaseosa la cual permite, a través de sus resultados, determinar el posible tipo de falla presente en el transformador. El método hace posible detectar fallas incipientes derivadas de sobre temperaturas, arcos y descomposición de la celulosa que forma parte del aislamiento sólido del transformador. Recientemente se han desarrollado métodos cromatográficos que permiten llevar a cabo los diagnósticos en terreno.

2.5.7 DETECCIÓN DE DESCARGAS PARCIALES

Descargas parciales (PD) son descargas eléctricas diminutas que resultan de los esfuerzos de campo eléctrico impuestos a cualquier sistema de aislamiento. Como su nombre lo sugiere, éstas no causan una falla completa del aislamiento, por lo tanto, su efecto a corto plazo no es catastrófico. Sin embargo, a largo plazo, la descarga parcial puede deteriorar lentamente la calidad del aislamiento. En sistemas de aislamiento sólido, (tales como en transformadores para instrumentos),

puede ocurrir la descarga parcial donde se introduce un vacío (burbuja) o discontinuidad en el aislamiento sólido (Figura 2.3).

Las descargas parciales en el aislamiento de transformadores pueden detectarse por medio de los siguientes métodos:¹⁵

- Métodos eléctricos
- Métodos químicos
- Métodos acústicos

Los métodos eléctricos se llevan a cabo midiendo las descargas parciales por medio de detectores convencionales. Esta técnica tiene el inconveniente de perder sensibilidad en mediciones en terreno debido a la alta interferencia electromagnética derivada del sistema eléctrico.

Los métodos químicos aprovechan la información entregada por los gases que aparecen en el aceite del transformador, no obstante, estas técnicas no permiten detectar la presencia de descargas incipientes en el aislamiento del transformador debido a que se produce un gran retardo entre el inicio de la fuente de descargas parciales y la evolución de gas suficiente que delate la presencia de estas.

¹⁵ **Ras Oliva, Enrique:** *Máquinas Eléctricas*. Mc. Graw-Hill, Bogotá, Colombia, **Hayden, Michael** pag. 351

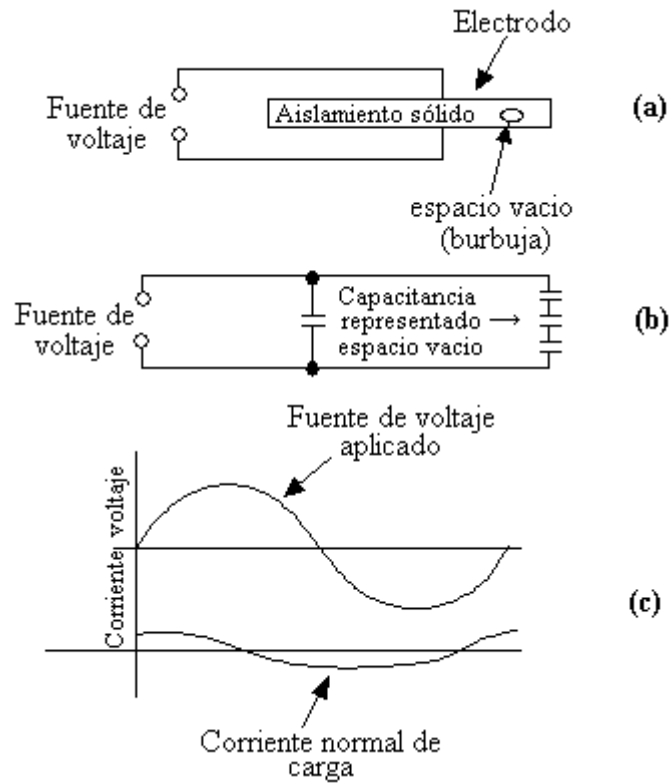


Figura 2.3 (a) Una muestra de aislamiento sólido entre electrodos, que forman un condensador, puede tener un espacio vacío (burbuja) como se muestra, (b) Circuito equivalente capacitivo C. (c) Voltaje aplicado y la correspondiente corriente de descarga parcial provocada por la falla de la burbuja

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.

CAPITULO 3

EL CAMPO ELECTRICO EN PRUEBAS DE AISLAMIENTO

3.1 CAMPO ELÉCTRICO¹⁶

Llamamos campo a regiones en el espacio en las que existe alguna manifestación de energía. Conocemos así los campos gravitatorios, térmicos, magnéticos, eléctricos, etc.

El campo eléctrico es el modelo que describe la interacción entre cuerpos y sistemas con propiedades de naturaleza eléctrica. Matemáticamente se lo describe como un campo vectorial en el cual una carga eléctrica puntual de valor "q" sufrirá los efectos de una fuerza mecánica "F" que vendrá dada por la ecuación 3.1:

$$\bar{F} = q\bar{E} \dots\dots\dots (3.1)$$

Para el conocimiento de los fenómenos que ocurren en un campo eléctrico debemos tener en cuenta los conceptos de flujo y potencial. Asimilándolo con el campo gravitatorio, estos conceptos son fáciles de entender. Las curvas de nivel serían líneas equipotenciales y las curvas de pendiente serían las líneas de flujo.

¹⁶ **Gilberto Enrique Harper:** *Campo Eléctrico en los transformadores de media* pags. 23 -24

Un campo eléctrico estático puede ser representado con un campo vectorial, o con líneas vectoriales (líneas de campo). Las líneas vectoriales se utilizan para crear una visualización del campo.

Se suele representar en dos dimensiones, aunque un caso más general incluye todo el espacio tridimensional. Existen infinitas líneas de campo, sin embargo se representan sólo unas pocas por claridad.

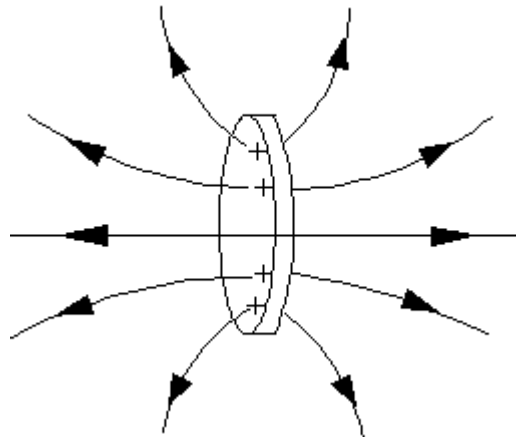


Figura 3.1 Líneas de campo eléctrico

Líneas de campo¹⁷

Son líneas perpendiculares a la superficie del cuerpo, de manera que su tangente en un punto coincide con la dirección del campo en ese punto.

A mayor concentración de líneas, mayor módulo. En el ejemplo de la moneda, el campo es mayor en las cercanías de esta y disminuye a medida que nos alejamos de ella.

Uniando los puntos en los que el campo eléctrico es igual, formamos superficies equipotenciales; puntos donde el potencial tiene el mismo valor numérico.

¹⁷ **Gilberto Enrique Harper:** *Campo Eléctrico en los transformadores de media pags.* 30- 32

3.1.1 CAMPO ELECTRICO ESTATICO EN DIELECTRICOS

Un medio homogéneo, es aquel en el cual sus características físicas no varían de un punto a otro.

Un medio lineal es aquel en que se mantiene la proporcionalidad causa efecto entre dos magnitudes relacionadas por una característica física.

Un medio isotrópico es aquel para el cual sus propiedades no dependen de la dirección (en el espacio).

Cuando los medios son homogéneos, lineales, isotrópicos los estudios son más fáciles, y por suerte esta situación puede suponerse frecuente.

La permitividad ya se ha visto que es una característica de los dieléctricos, ϵ_0 para el vacío, ϵ para un medio genérico, ϵ_r la relativa.

El flujo eléctrico en un dieléctrico está relacionado con el campo eléctrico, en un medio genérico.

Dentro de un medio el campo es continuo, de un punto a otro vecino cambia solo infinitesimalmente, en la frontera, límite del medio, el cambio puede ser abrupto (tanto en magnitud como dirección).

Conviene observar el campo en la frontera a través de sus componentes normal y tangencial.

El campo tangencial en la frontera conductor dieléctrico es nulo (efectivamente, el campo es normal al conductor).

En la frontera entre medios ϵ_1 y ϵ_2 las componentes tangenciales de E son las mismas a ambos lados de la frontera:

$$E_{t1} = E_{t2} = \frac{D_{t1}}{\epsilon_1} = \frac{D_{t2}}{\epsilon_2} \dots\dots\dots (3.2)$$

El campo eléctrico tangencial es continuo a lo largo de la frontera entre dos medios (las diferencias de potencial entre dos puntos en los dos medios son iguales).¹⁸

Sigue el análisis del campo normal, si ambos medios son aisladores perfectos, y se aplica la ley de Gauss:

$$D_{n1} - D_{n2} = \rho_s \dots\dots\dots (3.3)$$

La carga superficial promedio en la frontera cumple esta última condición, como la frontera entre dieléctricos está normalmente libre de carga:

$$D_{n1} = D_{n2} \dots\dots\dots (3.4)$$

Siendo α_1 y α_2 los ángulos de incidencia del campo en la frontera, se tiene:

$$\frac{\text{tg}\alpha_1}{\text{tg}\alpha_2} = \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} = \frac{E_2}{E_1} \dots\dots\dots(3.5)$$

Con estas reglas se observa como se quiebran las líneas de campo al pasar de un medio a otro, fenómeno que nos recuerda la refracción de la luz.

Dos conductores, separados por un dieléctrico ϵ , de área A, y espesor d, presentan cierta capacitancia:

$$C = \frac{\epsilon A}{d} \dots\dots\dots (3.6)$$

¹⁸ **Gilberto Enrique Harper:** *Campo Eléctrico en los transformadores de media* pags. 50- 51

Para dos conductores separados por dos dieléctricos distintos de diferentes espesores, se debe observar como se reparten los potenciales entre los dieléctricos.

$$V = E_a da + E_s ds$$

$$D_a = D_s \quad \text{de donde} \quad E_a = \frac{\epsilon_s}{\epsilon_a} E_s \quad \dots\dots\dots (3.7)$$

Es interesante observar cual dieléctrico tiene más campo, y explicar el por que de ciertos problemas que quizás han llegado a ser fallas en los dieléctricos de máquinas y aparatos.

Si se sobrepasa cierto valor de E se produce una descarga en el dieléctrico, hay una intensidad de campo que el dieléctrico soporta sin descargar.

El campo E es proporcional a la densidad de carga superficial del metal, y aumenta cuando el radio de curvatura se hace pequeño¹⁹.

Merece observarse el campo alrededor de una línea finita de carga, y como límite (caso extremo) una línea infinita, problemas que ya se han resuelto al menos idealmente.

El caso de dos líneas infinitas separadas por cierta distancia también puede resolverse. El problema de un conductor lineal, y un plano de retorno infinito, se puede resolver como dos líneas infinitas paralelas haciendo la imagen del conductor lineal (suponiendo que el plano es un espejo).

¹⁹ Electromagnetismo (Mc Graw Hill) sección 3-11 pag 82-distribuciones del campo.

Cuando todas las secciones transversales son iguales el problema es bidimensional.

Es fácil observar las celdas de campo, capacitores que son celdas de campo, todas de la misma capacitancia c_1 , se tienen n_p en paralelo, y n_s en serie, la capacitancia resultante es:

$$\frac{c_1 * n_p}{n_s} \quad \text{donde} \quad c_1 = \frac{\epsilon * a}{1} = \frac{\epsilon * d * b}{1} \dots\dots\dots (3.8)$$

Si la geometría de los capacitores (cuadrados) satisface:

$$b / l = 1 \quad \text{entonces} \quad c_1 / d = \epsilon \dots\dots\dots(3.9)$$

El campo eléctrico se puede obtener resolviendo la ecuación de divergencia de Maxwell, que se obtiene a partir de la ley de Gauss.

$$\text{Divergencia } D = \rho \dots\dots\dots (3.10)$$

Recordemos que ρ es la densidad de carga eléctrica, y de estas se obtienen las ecuaciones de Poisson:

$$\text{Divergencia del Gradiente de } V = \nabla^2 V = \frac{-\rho}{\epsilon} \dots\dots\dots (3.11)$$

Y de Laplace, cuando no hay carga ρ

$$\text{Divergencia del Gradiente de } V = \nabla^2 V = 0 \dots\dots\dots (3.12)$$

Observemos el operador ∇^2 es la divergencia del gradiente, primero sobre V se opera y obtiene el gradiente (campo E) luego se aplica el operador divergencia. En matemáticas, y en coordenadas rectangulares el operador ∇^2 :

$$\nabla^2 = i \frac{\partial^2}{\partial x^2} + j \frac{\partial^2}{\partial y^2} + k \frac{\partial^2}{\partial z^2} \dots\dots\dots (3.13)$$

Alrededor de una carga eléctrica en el espacio pueden imaginarse superficies equipotenciales y líneas de fuerza (de campo) perpendiculares entre si, la superficie equipotencial próxima al cuerpo (cargado) copia la forma del cuerpo, la superficie alejada tiende a la forma de la esfera, si el espacio es limitado, en la proximidad de los límites, copiará su forma, pero en los diedros cóncavos especialmente tenderá a deformar la superficie equipotencial tendiendo a la esfera.

El campo eléctrico es muy fácil de comprender, cuando se piensa en dos placas planas separadas, entre ellas el campo se intuye fácilmente.

También si los cuerpos entre los que se forma el campo tienen forma cualquiera es posible resolver el problema, pero si se dan ciertas condiciones de simetría la resolución es más simple, por esta razón al encarar un problema siempre debe buscarse la eventual presencia de esta situación.

Los campos que en nuestra área hemos estudiado son los estacionarios, es decir, los que son independientes respecto al tiempo.

Dichos campos satisfacen la ecuación de Laplace²⁰.

$$\nabla\phi = 0$$

El campo eléctrico debido a la corriente alterna puede considerarse estacionario, ya que los fenómenos físicos como el efecto corona o la descarga disruptiva, se producen a una velocidad muy superior a la variación de la tensión. En la figura 3.1 podemos ver estos parámetros (Kreuger).

²⁰ **Gilberto Enrique Harper:** *Campo Eléctrico en los transformadores de media* pag. 61

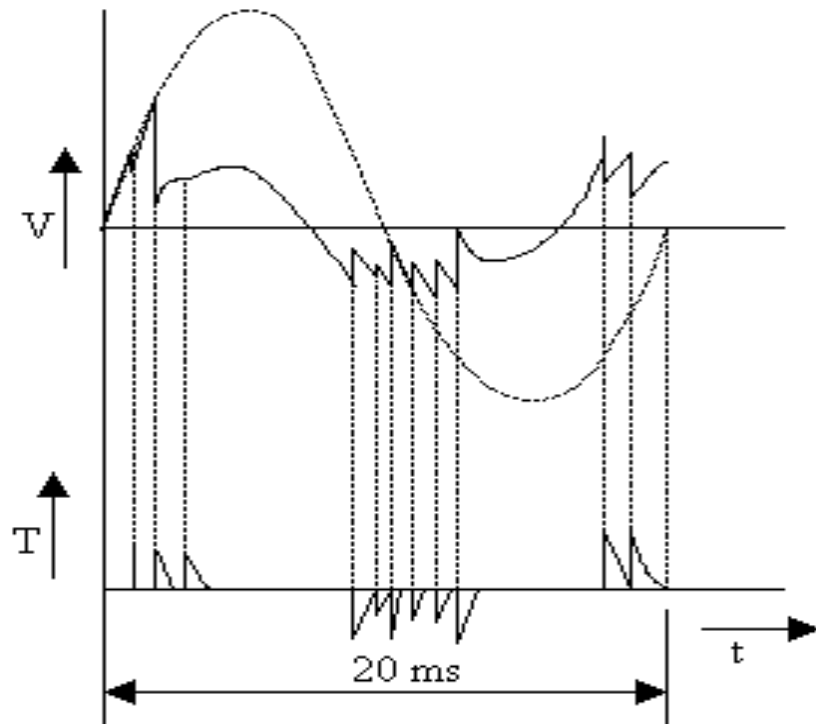


Figura 3.1²¹

Una vez resuelta la ecuación de Laplace, conocemos la función del potencial ϕ y el gradiente o intensidad de campo.

$$E = -grad\phi$$

3.1.2 CALCULO DEL CAMPO ELECTRICO

El método de cargas, se basa en el supuesto de que las cargas distribuidas en la superficie de los electrodos, se encuentran localizadas en un número finito de puntos o líneas dentro de dichos electrodos. Como suponemos que las condiciones iniciales no se alteran por la existencia de un campo eléctrico, conocidos los valores de las cargas puntuales o la densidad de carga en el caso de las cargas lineales,

²¹ Gilberto Enrique Harper: *Campo Eléctrico en los transformadores de media* pags. 65

podemos calcular el potencial y el gradiente en cualquier punto del espacio.

Este método fue desarrollado por Steinbigler y Weiss (dos dieléctricos), y desde su aparición está siendo ampliamente utilizado y mejorado. (figura 3.2).

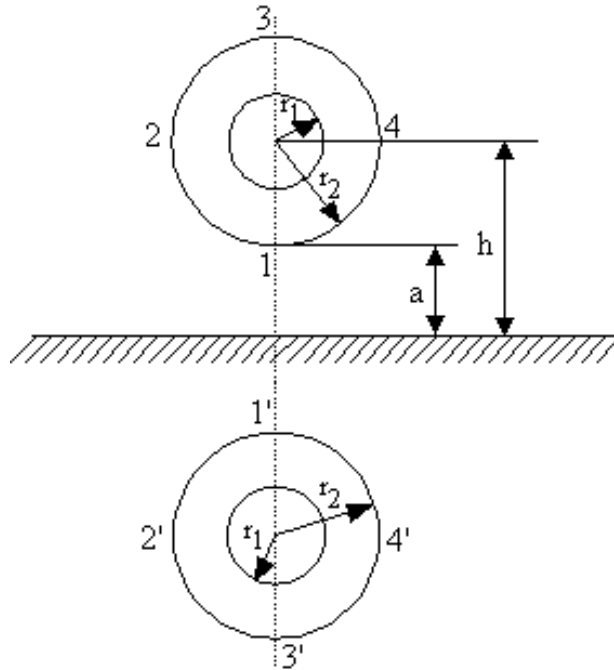


Figura 3.2 Método de cargas

El valor final del potencial y el gradiente en un punto es la suma algébrica de los potenciales y gradientes debidos a todas las cargas existentes en el sistema, lo que en forma matricial resulta

$$[A] \cdot [Q] = [P]$$

siendo A la matriz de coeficientes, más o menos complicados pero dependientes únicamente de las magnitudes geométricas, y P el potencial en la periferia de los electrodos, que generalmente también es conocido.

Por tanto, sólo falta calcular el valor de las cargas Q para que se satisfagan las condiciones.

Como todos los métodos numéricos, precisa de ordenador para su resolución y el número máximo de cargas a utilizar está limitado por el mismo, así como la velocidad de respuesta. Actualmente esto no supone un problema.

Al aplicar el método de cargas a un problema de campos, pueden surgir diversos errores ya sea por la incorrecta posición de las cargas, el número de las mismas, etc.

Existen métodos de control, admitiendo cierta tolerancia, que permiten verificar la bondad del sistema:

- control del potencial en puntos de los electrodos.
- curvatura del electrodo.
- valor de la matriz de coeficientes.
- valores de las cargas.

Una vez obtenida una adecuada resolución, se podrá continuar con la obtención de líneas de campo, gradientes, etc. La precisión de un método matemático es superior a la de uno numérico, pero en la práctica generalmente no es posible conocer las fórmulas correspondientes a los electrodos utilizados, bien por su forma, bien porque hay que tener en cuenta los elementos de conexión, las paredes próximas, etc.

3.2 EL CAMPO ELÉCTRICO EN TRANSFORMADORES DE MEDIDA

Al igual que cualquier máquina eléctrica, un transformador de medida está sometido a un campo eléctrico, y en tanto en cuanto el mismo está perfectamente controlado dentro de parámetros aceptables, se lograrán aparatos de comportamiento fiable.

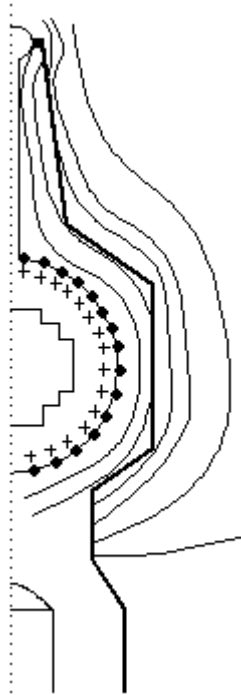


Figura 3.3 campo eléctrico en transformadores de MT

3.2.1 EN TRANSFORMADORES DE MEDIA TENSIÓN²²

Son aparatos de relativa sencillez de fabricación y en los que el conocimiento del campo eléctrico así como de los gradientes ayuda a determinar espesores de dieléctrico, habitualmente resina sintética, así como a delimitar óptimamente los contornos exteriores del transformador para evitar o reducir el efecto de las descargas superficiales con el tiempo. (Figura 3.3).

²² **Gilberto Enrique Harper:** *Campo Eléctrico en los transformadores de media pag. 81*

La utilización del programa con uno o dos dieléctricos puede dar soluciones espectaculares en sus diferencias.

3.2.2 EN TRANSFORMADORES DE INTENSIDAD²³

En los transformadores de aislamiento en resina y servicio intemperie, el problema de las descargas superficiales se acentúa debido a la polución atmosférica, humedad, etc.

Un aislante orgánico sometido a estos fenómenos y a campo eléctrico, puede degradarse superficialmente en tiempos relativamente cortos.

Hoy en día se construyen los transformadores con anillos de alta tensión alrededor de la cabeza, permitiendo esto que en los nuevos transformadores el campo eléctrico sea prácticamente nulo, lo que evita la degradación de la resina.

²³ **Gilberto Enrique Harper:** *Campo Eléctrico en los transformadores de media* pag. 86

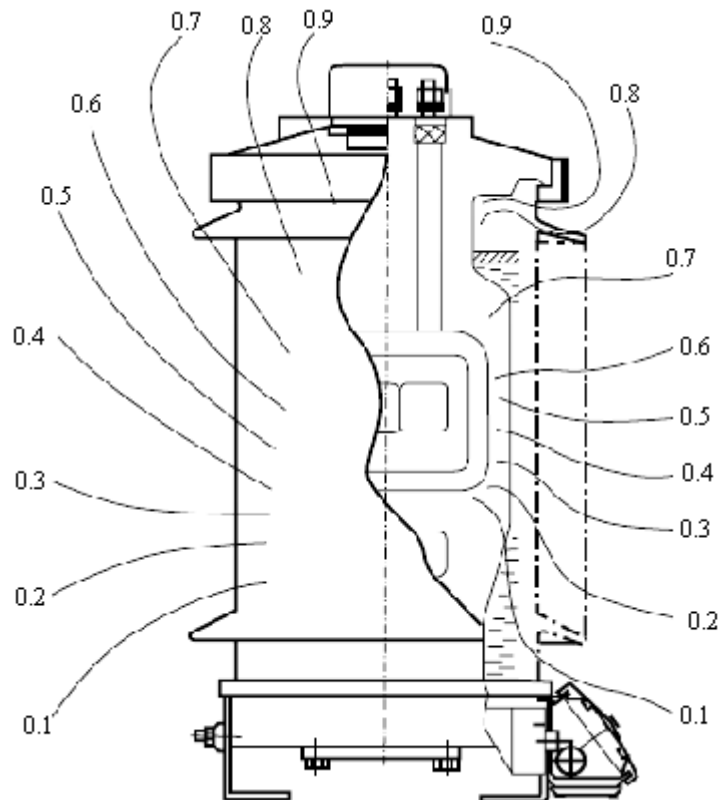


Figura 3.4 Comportamiento de los anillos equipotenciales en un transformador de intensidad

3.2.3 EN TRANSFORMADORES DE ALTA TENSIÓN.

Los problemas de diseño se multiplican a medida que el nivel de tensión aumenta. Los dieléctricos más normales son el papel-aceite y la porcelana para subestaciones al aire libre, y el gas SF₆ y la resina para subestaciones blindadas.

Tiene amplia aplicación el estudio del campo eléctrico en la determinación de formas de cajas de baja tensión, receptáculo de los núcleos y arrollamientos secundarios de los transformadores de intensidad, así como la definición de espesores mínimos de aislamiento. (figura 3.5).

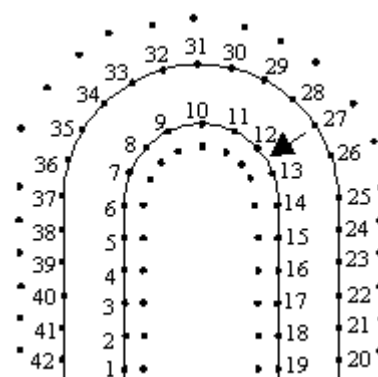


Figura 3.5 campo eléctrico en trafo de intensidad

3.2.4 IMPLICANCIA DEL ESTUDIO DEL CAMPO ELECTRICO

Las ventajas del conocimiento del campo eléctrico en el diseño de un transformador de medida son evidentes.

Permite conocer de antemano el comportamiento teórico del mismo, así como un dimensionamiento adecuado de los dieléctricos haciendo del aparato fiable e industrial. No hay que olvidar que aún son recientes los diseños puramente empíricos y experimentales de estas máquinas.

Los conocimientos obtenidos por ensayos de laboratorio, de envejecimiento acelerado y de la experiencia en servicio, del comportamiento de los materiales aislantes y de los muchos factores que influyen en el aislamiento, tales como espesor, presión, temperatura, material de electrodos, formas de onda, etc., así como de los distintos mecanismos de fallo, juntamente con una utilización adecuada del cálculo del campo eléctrico serán fundamentales para conseguir transformadores de medida adecuados y fiables.

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN LAS PRUEBAS

4.1 TRANSFORMADOR UTILIZADO EN LAS PRUEBAS

El transformador utilizado es el tipo de transformadores de intensidad mínima de aceite IMB de ABB Power Technologies está basado en un diseño de horquilla (forma del conductor primario) conocido como tipo tanque. El diseño básico ha sido empleado por ABB durante más de 60 años, en los que se han entregado más de 150 000 unidades.

El diseño corresponde a las exigencias tanto de las normas IEC como IEEE .

El exclusivo relleno con granos de cuarzo saturados en aceite proporciona un aislamiento resistente en un diseño compacto donde la cantidad de aceite se mantiene al mínimo.

En la figura 4.1 se presenta el modelo de transformador de corriente utilizado en las pruebas tanto de laboratorio como de campo requeridas para el desarrollo de esta investigación. Se describe con sus diferentes partes de su estructura.

1. Colchón de gas
2. Unidad de relleno de aceite
3. Relleno de cuarzo
4. Conductor primario aislado por papel
5. Núcleos/ devanado secundario
6. Caja de bornes secundarios
7. Toma de tensión de capacitiva
8. Vaso de expansión
9. Luz aviso de nivel de aceite
10. Borne primario

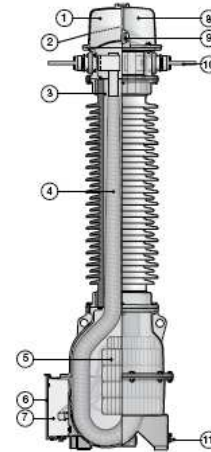


Figura 4.1 Sección transversal del transformador TC²⁴

Este transformador se encuentra dentro de la clasificación de transformadores para uso a la intemperie, los cuales tienen un ámbito desde 17 hasta 525 kV y básicamente cuentan con las siguientes características constructivas:

4.2 CARACTERÍSTICAS CONSTRUCTIVAS

4.2.1 DEVANADO PRIMARIO

El devanado primario consiste en uno o más conductores paralelos de aluminio o cobre diseñado como pasamuros en forma de U con capas capacitivas de graduación de tensión. La técnica de aislamiento está automatizada para proporcionar un revestimiento simple y controlado, que mejora y minimiza las variaciones.

El conductor es aislado con un papel especial con una alta rigidez dieléctrica y mecánica, pérdidas dieléctricas bajas y buena resistencia al envejecimiento. Este diseño es además muy apropiado para devanados primarios con muchas espiras primarias. Esto se emplea cuando la intensidad primaria es baja, como en el caso de protección de desequilibrio en bancos de condensadores. (Por ejemplo relación 5/5A).

²⁴ Carrasco, Francisco: *Pruebas para transformadores de Potencia* pag. 78

4.2.2 DEVANADOS SECUNDARIOS Y NÚCLEOS²⁵

Los transformadores de intensidad del tipo IMB son flexibles y generalmente pueden alojar cualquier configuración de núcleo que se precise. Los núcleos con funciones de medición se fabrican normalmente con una aleación de níquel, que permite pérdidas poco importantes (= una gran precisión) y niveles de saturación bajos. Los núcleos de protección están fabricados de láminas de acero orientados de alta calidad. Para aplicaciones especiales pueden suministrarse núcleos de protección con entrehierros.

El devanado secundario consiste en hilo de cobre con doble esmaltado, distribuido equitativamente en torno a toda la periferia del núcleo. La reactancia de fugas en el devanado y entre tomas extra es por lo tanto despreciable.

4.2.3 IMPREGNACIÓN

El calentamiento en vacío seca el devanado. Tras el montaje, todo el espacio libre en el transformador (aproximadamente el 60%) es rellenado con grano de cuarzo seco y esterilizado. El transformador ensamblado es tratado al vacío y es impregnado con aceite mineral desgasificado. El transformador siempre es entregado lleno de aceite y sellado herméticamente.

4.2.4 TANQUE Y AISLADOR

La sección inferior del transformador consiste en un tanque de aluminio en el que se montan los núcleos y el devanado secundario. El

²⁵ Carrasco, Francisco: *Pruebas para transformadores de Potencia* pag. 87

aislador, montado encima del tanque del transformador, consiste en su versión estándar en porcelana marrón vidriada de alta calidad.

4.2.5 SISTEMA DE EXPANSIÓN

El IMB dispone de un colchón de expansión colocado en lo alto del aislador. Como diseño estándar el IMB emplea un sistema de expansión herméticamente sellado, con un colchón de nitrógeno que se comprime por la expansión térmica del aceite. Los transformadores están diseñados para las mayores corrientes nominales. Se utilizan fuelles de acero inoxidable contenidos en un sistema de expansión.

4.3 CARACTERISTICAS DE OPERACION²⁶

4.3.1 CLIMA

Los transformadores están diseñados para ser instalados en una amplia variedad de condiciones climáticas, desde zonas polares a desiertos por todo el mundo.

4.3.2 VIDA ÚTIL

El transformador IMB está sellado herméticamente y la descarga de tensión baja y uniforme en el aislamiento primario proporciona un producto fiable con una vida útil prevista para más de 30 años. Desde la década de 1930 se han suministrado más de 150 000 unidades de IMB y de sus antecesores.

²⁶ Carrasco, Francisco: *Pruebas para transformadores de Potencia* pag. 120

4.3.3 RESISTENCIA A LA CORROSIÓN

Las aleaciones de aluminio seleccionadas proporcionan un alto grado de resistencia a la corrosión, sin necesidad de protección adicional. Para uso en ambientes de exposición extrema, se entregan con una pintura de protección.

4.3.4 RIGIDEZ SÍSMICA

El transformador IMB cuenta con una construcción mecánicamente robusta, diseñada para soportar exigencias altas de aceleración sísmica sin necesidad de amortiguadores.

4.4 PRUEBAS DE AISLAMIENTO Y CAMPO ELÉCTRICO

Para efectos de esta investigación, las pruebas se realizaron en un transformador de la marca ABB Power Technologies el cual cuenta con las características que se indican en la tabla 4.1.

Tanto las pruebas del aislamiento, como las de factor de potencia y tangente delta son de gran importancia para determinar el estado del aislamiento en los transformadores, para efectos de esta investigación se realizaron las pruebas en tres lugares diferentes: la prueba de laboratorio se realizó en la subestación de Salesiano (Huancayo), y las pruebas de campo se realizaron en la subestación Parque industrial y la subestación Concepción, todas propiedad de Electrocentro, al igual que todo el equipo con el cual se realizaron las mediciones de las pruebas de aislamiento de campo eléctrico, el cual periódicamente es calibrado y certificado por el personal especialista en el área.

Tabla 4.1 Datos de un transformador ABB

Modelo	IMB 245
Año	1982
Número de serie	56789-25A
Tensión	225 kV
Nivel básico de aislamiento	245/460/1050 kV
Relación de corriente	50-100:1-1-1-1
Devanados	X2-X3 X1-X3Y1-Y2Z1Z2
Carga/Burden	B1
Capacidad térmica	1.2 In
I _{térmica}	19/1 kA/s
I _{dinámica}	63 kA

En la tabla 4.2 se listan los datos de las condiciones a las cuales se realizaron las pruebas en Salesiano, Parque industrial y Concepción, Se procuró que todas las condiciones fueran lo más parecidas posible.

Tabla 4.2 Condiciones en las cuales se efectuaron las pruebas

Subestación	Fecha	Hora de inicio	Temp. Ambiente
Salesiano	11/08/2008	10:59:06 a.m.	12.0°C
Parque industrial	12/08/2008	11:54:48 a.m.	10.6°C
Concepción	19/08/2008	11:12:11 a.m.	10.5 °C

4.5 CAMPO ELÉCTRICO

El cálculo del campo eléctrico se realizó mediante el uso del equipo “Holaday EMF Measurement HI-3604” de ETS LINDGREN, el cual es un equipo especializado para medir campos eléctricos y magnéticos, mismo que se muestra en las figura 4.2.



Figura 4.2 Equipo Holaday EMF Measurement HI-3604

Los campos eléctricos son detectados por un sensor de desplazamiento el cual consta de dos discos conductores colocados en paralelo, con poco espesor de separación y conectados eléctricamente, cuando están inmersos en campo eléctrico, la carga es redistribuida a lo largo de ambos discos, de forma tal que el campo entre ellos sea cero. Esta redistribución de la carga se refleja como un desplazamiento de corriente que puede ser medido y posteriormente, relacionado a la fuerza del campo eléctrico externo.

El CT Analyzer de OMICRON ofrece idoneidad sin parangón para rápida verificación y calibración de transformadores de corriente. El equipo ofrece verificación y calibración automáticas de todo tipo de transformadores de corriente con bajo flujo de dispersión, tanto en el emplazamiento del sistema eléctrico como en el entorno controlado de los fabricantes de TC y de celdas de conmutación (switchgear).

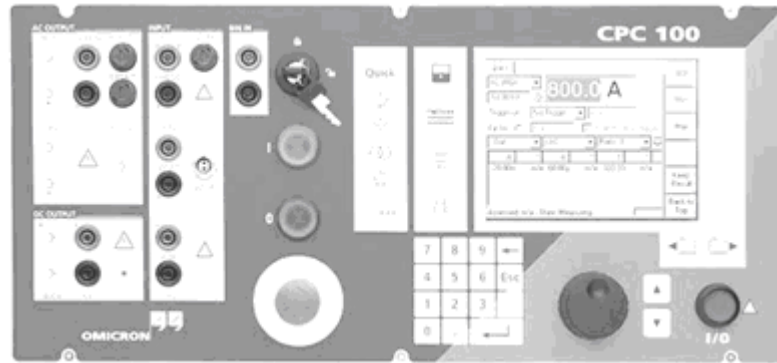


Figura 4.3 Sistema multifuncional de pruebas primarias para puestas en servicio y mantenimiento CT Analyzer

CT Analyzer es, probablemente el único dispositivo portátil en el mercado que permite probar transformadores de corriente según IEC 60044-6.

La medición se efectúa según la norma IEC 60044-6 (baja frecuencia) y reporta todos los resultados importantes, como por ejemplo K_{ssc} (factor de corriente simétrica nominal de cortocircuito), K_{td} (factor de dimensionamiento de transitorios), ϵ_t (error de relación de transformación según clase TPS), ϵ^{\wedge} (error instantáneo pico), V_{kn}/I_{kn} (tensión/corriente de punto de inflexión según IEEE C57.13 (tangente a 30° y 45°)). Después de la prueba el parámetro de temporización se puede modificar para ver el efecto en los resultados. OMICRON CT Analyzer efectúa automáticamente todos los cálculos necesarios para indicar el factor de dimensionamiento de transitorios.

Las pruebas aplicadas al transformador, se realizaron mediante la utilización del equipo OMICRON CT Analyzer el cual se muestra en la figura 4.5 y figura 4.6. Este equipo está dotado de un PC integrado, y suministra hasta 800 A y 2000 V, por lo que tiene la capacidad de realizar diversas pruebas en transformadores tanto de corriente como de tensión, en el caso de los

transformadores de corriente se pueden realizar pruebas de: relación y polaridad, error de fase y de magnitud, curva de excitación, resistencia del devanado, carga del secundario, nivel de aislamiento, continuidad del circuito, tangente delta y factor de potencia.

En la tabla 4.3 se listan los valores del campo eléctrico medido en las subestaciones de Parque industrial y Concepción, recordemos que en la subestación de Salesiano se realizaron las pruebas de laboratorio lo que implica que no hubo presencia de un campo eléctrico considerable.

Tabla 4.3 Mediciones del campo eléctrico en las subestaciones

Campo Eléctrico		
Subestación	Voltaje	E (kV/m)
Parque industrial	220 kV	41,00
Concepción	220 kV	38,00

Tanto en Parque industrial, como en Concepción, el campo eléctrico fue medido aproximadamente a 3 (tres) metros de distancia de la línea de transmisión más próxima al transformador de prueba y tal como se indica en la tabla 4.3, la variación del campo eléctrico entre ambas subestaciones fue muy poca, lo cual era de esperar pues ambas trabajan prácticamente bajo las mismas condiciones de operación.

4.6 PRUEBA DEL FACTOR DE POTENCIA

La prueba se realizó mediante la utilización del CT Analyzer y el accesorio CP TD1 la cual consistió en aplicar una tensión alterna entre el devanado de alta tensión y el de baja tensión, provocando así, que circule una corriente I a través del aislamiento.

La corriente I_c es producida por la capacitancia del aislamiento y la corriente I_w corresponde a la conductancia transversal, la cual está compuesta principalmente por corrientes superficiales, histéresis y descargas parciales.

El equipo utilizado genera un reporte con la medida de:

- Voltaje de salida
- Corriente de salida
- Frecuencia
- Capacitancia C_p
- Factor de potencia $\cos\theta$

En la tabla 4.4 se listan los datos obtenidos por el equipo CT Analyzer en la prueba del factor de potencia.

Estas pruebas de factor de potencia se realizaron para dos voltajes de prueba distintos, uno de 10 kV y otro de 5 kV. Ambas mediciones se desglosan en la tabla 4.4, en la cual se pudo notar que los resultados obtenidos para las tres subestaciones fue muy parecido entre si y para los dos voltajes de prueba aplicados, lo que implica que la diferencia del campo eléctrico existente en las subestaciones no afectó los resultados de esta prueba.

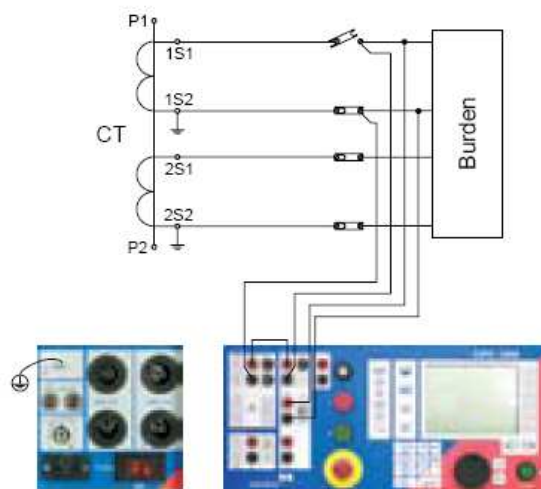


Figura 4.4 Prueba de factor de potencia²⁷

Tabla 4.4 Datos de la prueba de factor de potencia aplicada al transformador

Factor de Potencia					
Voltaje de prueba: 10,000,00 V					
Subestación	V salida	I salida	Frecuencia	Cp	FP
Salesiano	10015 V	3.3239 mA	60 Hz	877.40 pF	0.2424 %
Parque industrial	10007 V	3.3175 mA	60 Hz	876.40 pF	0.2399 %
Concepción	10011 V	3.3511 mA	60 Hz	885.00 pF	0.2460 %
Voltaje de prueba: 5,000,00 V					
Subestación	V salida	I salida	Frecuencia	Cp	FP
Salesiano	5010 V	1.6627 mA	60 Hz	877.40 pF	0.2416 %
Parque industrial	5012 V	1.6614 mA	60 Hz	876.30 pF	0.2394 %
Concepción	5010 V	1.6776 mA	60 Hz	885.20 pF	0.2461 %

²⁷ Folletos TECSUP: Pruebas en fábrica a transformadores y características del equipo empleado pag. 34

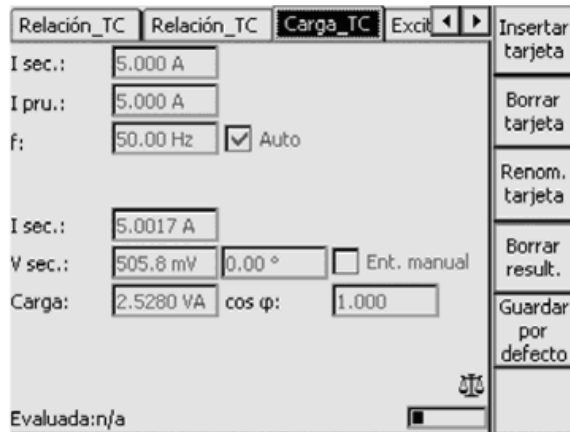


Figura 4.5 CT Analyzer en la prueba del factor de potencia

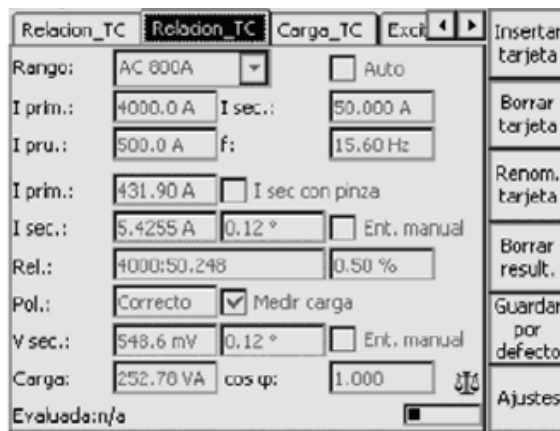


Figura 4.6 CT Analyzer en la prueba del factor de potencia

El factor de potencia obtenido fue de aproximadamente 0.250% y según la tabla 9 de la norma C57.13-1993 de la IEEE, el máximo valor permitido del factor de potencia para un transformador de corriente es de 0.50% por lo que se pudo deducir que el aislamiento de este transformador todavía cuenta con las condiciones adecuadas para seguir operando.

4.7 PRUEBA DE LA TANGENTE DELTA

La prueba se realizó con el mismo equipo que se utilizó para la prueba del factor de potencia y los resultados generados por el equipo fueron:

- Voltaje de salida
- Corriente de salida

- Frecuencia
- Capacitancia Cp
- Tangente delta

Para la prueba de la tangente delta se obtuvieron las siguientes mediciones:

Tabla 4.5 Datos de la prueba de tangente delta aplicada al transformador

Prueba Tangente Delta					
Voltaje de prueba: 10,000,00 V					
Subestación	V salida	I salida	Frecuencia	Cp	tan δ
Salesiano	10012 V	3.3228 mA	60 Hz	877.30 pF	0.2426 %
Parque industrial	10007 V	3.3174 mA	60 Hz	876.30 pF	0.2505 %
Concepción	10011 V	3.3517 mA	60 Hz	885.10 pF	0.2444 %
Voltaje de prueba: 5,000,00 V					
Subestación	V salida	I salida	Frecuencia	Cp	tan δ
Salesiano	5009 V	1.6624 mA	60 Hz	877.50 pF	0.2426 %
Parque industrial	5011 V	1.6614 mA	60 Hz	876.40 pF	0.2508 %
Concepción	5009 V	1.6772 mA	60 Hz	885.20 pF	0.2444 %

Según se muestra en la tabla 4.5, los resultados obtenidos para la prueba de tangente delta, fueron muy parecidos a los de la prueba del factor de potencia, lo cual se debió a que $\delta \ll 1$. En este caso al igual que en el anterior, la prueba no se vio afectada por el campo eléctrico.

4.8 PRUEBA DE LA RESISTENCIA DE AISLAMIENTO

El objetivo es tener un indicativo del estado de la resistencia de aislamiento en cuanto a humedad o contaminación por elementos extraños en el aceite tales como polvo, pintura o partículas suspendidas en él. Eventualmente esta prueba indica problemas de distancias entre partes vivas o contra tierra, en los casos en que son críticas.

Esta prueba se utiliza para medir la capacidad dieléctrica que tiene el aislante, entre el devanado primario y secundario o entre tierra y los devanados primario y secundario.

Para esta prueba únicamente se requirió del CT Analyzer y consistió en aplicar una tensión de prueba (2kV) durante aproximadamente 60 segundos, luego de este tiempo se logro determinar la corriente de fuga que circulaba por el aislamiento.

El equipo generó un reporte con los siguientes datos:

- Voltaje de prueba
- Frecuencia del sistema
- Tiempo de duración de la prueba
- Voltaje de salida
- Corriente de salida
- Corriente máxima de fuga permitida.

La tabla 4.6 corresponde a los resultados de la prueba de resistencia de aislamiento entre los devanados de alta tensión y baja tensión:

Tabla 4.6 Datos de la prueba de aislamiento alta tensión-baja tensión

Prueba_de_Aislamiento AT-BT			
Subestación	Salesiano	Parque industrial	Concepción
Sobrecarga:	no	no	no
V prueba:	2000.0 V	2000.0 V	2000.0 V
Frecuencia:	60.00 Hz	60.00 Hz	60.00 Hz
Tiempo:	60.000 s	60.000 s	60.000 s
V AC:	1999.60 V	1999.62 V	1999.59 V
I AC:	1.2110 mA	1.0010 mA	1.3300 mA
I máx:	1.2160 mA	1.4190 mA	1.3440 mA

Tal como se puede observar en la tabla 4.6, en ninguno de los tres casos se encontraron indicios de corrientes de fugas, pues todas las corriente obtenidas fueron inferiores a la corriente máxima permitida entre el primario y el secundario del transformador de prueba, aunque es importante tener presente que los valores de corriente obtenidos (principalmente en el caso de la prueba en el Parque Industrial y Concepción) se acercaron a los valores de corriente máxima permitida para la prueba de aislamiento aplicada.

En la tabla 4.7 se muestran los resultados para la prueba aplicada al devanado de alta tensión respecto a tierra.

Tal como se observa en la tabla 4.7, las condiciones de prueba son las mismas que para AT-BT. En este caso, las corrientes obtenidas tuvieron un comportamiento similar a las de la prueba anterior, pues los datos de la corriente medida se aproximaron a los de la corriente máxima.

Tabla 4.7 Datos de la prueba de aislamiento alta tensión-tierra

Prueba_de_Aislamiento AT-T			
Subestación	Salesiano	Parque Industrial	Concepción
Sobrecarga:	No	no	no
Evaluación:	Correcto	Correcto	Correcto
V prueba:	2000.0 V	2000.0 V	2000.0 V
Frecuencia:	60.00 Hz	60.00 Hz	60.00 Hz
Tiempo:	60.000 s	60.000 s	60.000 s
V AC:	1999.61 V	1999.57 V	1999.61 V
I AC:	1.6380 mA	1.8460 mA	2.4050 mA
I máx:	1.6390 mA	1.9450 mA	2.4230 mA

Finalmente, la tabla 4.8 muestra los resultados para el devanado de baja tensión respecto a tierra.

Se analizaron los resultados de la prueba del aislamiento en el devanado de baja tensión respecto a tierra, se pudo observar la misma tendencia que en los casos anteriores. En general el análisis de estas pruebas de aislamiento mostró que es necesario dar mantenimiento preventivo al aislante del transformador y de esta manera evitar posibles defectos en el equipo, pues el aislamiento puede verse afectado por la humedad e impurezas.

Tabla 4.8 Datos de la prueba de aislamiento baja tensión-tierra.

Prueba_de_Aislamiento BT-T			
Subestación	Salesiano	Parque Industrial	Concepción
Sobrecarga:	No	no	no
V prueba:	2000.0 V	2000.0 V	2000.0 V
Frecuencia:	60.00 Hz	60.00 Hz	60.00 Hz
Tiempo:	60.000 s	60.000 s	60.000 s
V AC:	1999.60 V	1999.59 V	1999.60 V
I AC:	2.3960 mA	2.3910 mA	3.1670 mA
I máx:	2.4030 mA	2.3950 mA	3.1710 mA

CONCLUSIONES

1. La prueba de Aislamiento del transformador de corriente es relevante pero no suficiente para concluir que el transformador está en buenas condiciones.
2. La dependencia de la temperatura de los transformadores de instrumentación es prácticamente despreciable.
3. Se concluye que nunca debe dejarse el secundario en circuito abierto ya que en tal caso toda la corriente primaria pasa a ser corriente de excitación, produciendo la saturación magnética del núcleo y dando lugar a la aparición de una tensión en los terminales del secundario, que puede ocasionar fallos en el aislamiento del transformador, además de ser un peligro para el usuario. Por tanto, si por algún motivo hay que desconectar la carga, se tiene que puentear el secundario.
4. Se concluye que un transformador de intensidad ideal, al igual que en uno de potencia, se cumple que los amperios vuelta de los devanados primario y secundario son iguales, es decir: $N_p I_p = N_s I_s$.
5. La corriente de excitación da lugar a dos tipos de errores: **el error de relación (ϵ)**, definido como el error que el transformador introduce en la medida de una corriente, como consecuencia de que la relación de transformación real no es igual a la relación de transformación nominal. Y **el error de fase (δ)**, definido como la diferencia de fase entre los vectores de las corrientes primaria y secundaria.

6. Se concluye que las principales limitaciones que presenta un transformador de intensidad son que no permite medir señales continuas y que tiene un precio relativamente alto.
7. Se concluye que el Campo eléctrico si repercute en las pruebas de aislamiento a transformadores de corriente, dependiendo de la distancia del objeto de prueba a partes con alta tensión, los valores que se obtuvieron de las medidas de campo eléctrico fueron cerca de los bornes superiores del transformador de potencia por ello los valores altos.
8. Se concluye que el campo eléctrico si repercute en el aislamiento de los transformadores, manifestándose esto en las descargas parciales en el interior del mismo aislamiento.

RECOMENDACIONES

1. Al usuario le gustaría indudablemente hacer una comparación de la medida de los parámetros de su transformador de instrumentación de tensión ó corriente con los parámetros de un transformador de fábrica para tener la certeza del funcionamiento de su transformador, lo cual es prácticamente imposible, **lo recomendable** en todo caso es determinar la diferencia entre los valores obtenidos en un mínimo de tres subestaciones. Si la diferencia es mínima, podemos establecer que el transformador está trabajando normalmente; pero si la diferencia es notoria se debe tomar las precauciones que el caso requiere.
2. Con el avance de la tecnología hoy en día se pueden realizar mediciones más precisas y de alta confiabilidad, debido a que tratándose de mediciones altamente afectados por campos eléctricos podemos recomendar realizar las mediciones a distancia (telemetría), ó mediante fibras ópticas que algunos dispositivos traen adheridos, y de ninguna manera se debe permitir la presencia humana en el campo de medición, por que esto alteraría cualquier medición efectuada.
3. Puesto que los transformadores de medición trabajan por inducción, cuando se desea medir el campo eléctrico en una línea de transmisión se recomienda “poner” la paleta de medición sobre un trípode de tal forma que la parte más alargada del instrumento se encuentre en paralelo con la línea de transmisión.
4. Para la elección de los transformadores de instrumentación se recomienda que el Ingeniero ó técnico tenga un elevado conocimiento sobre los aislantes, ya que debido al rol que cumplen estos equipos en un sistema

eléctrico deben ser de alta confiabilidad, por lo que es necesario el empleo de distintos materiales en el diseño de la estructura del aislamiento. Los materiales aislantes empleados en transformadores están presentes en todos los estados de la materia y la mayoría de las veces se combinan elementos sólidos con líquidos o gases dieléctricos.

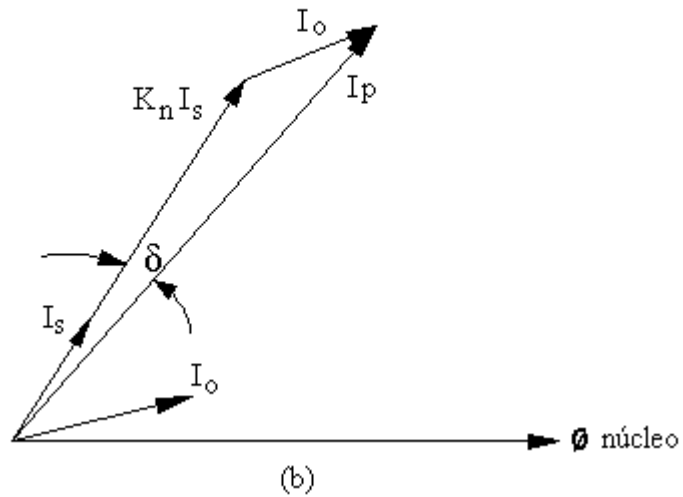
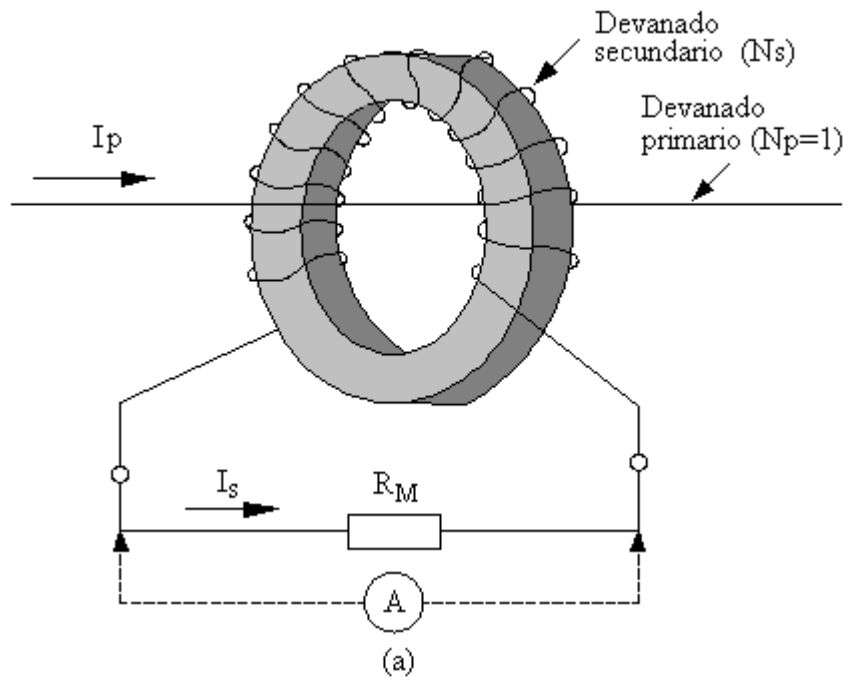
BIBLIOGRAFÍA

1. **SIEMENS:** *Manual de Baja Tensión*. Publicis MCD Verlag, Alemania, da Edición, 2000.
2. **Gilberto Enrique Harper:** *Campo Eléctrico en los transformadores de media*. Electrotécnica Artech Hnos; S.A. Manguía
3. **Berrospi, José:** *Introducción a los transformadores de media*, Electrotécnica Artech Hnos; S.A. Manguía
4. **Carrasco, Francisco:** *Pruebas para transformadores de Potencia*. Proyecto Eléctrico, 1987.
5. **Nessler, Herber y otro:** *Construcción y funcionamiento del transformador*. MARCOMBO S.A., España, 1988.
6. **Folletos TECSUP:** *Pruebas en fábrica a transformadores y características del equipo empleado*. Instituto Tecnológico de Morelia, México, 1983.
7. **F. Marín, Alonso:** *Campos Eléctrico y Magnético*. Primera Edición, Editorial ALHAMBRA, Madrid, España, 1974.
8. **Stevenson, William D.:** *Análisis de sistemas Eléctricos de Potencia*. Mc. Graw-Hill, México, 1976.
9. **Ras Oliva, Enrique:** *Máquinas Eléctricas*. Mc. Graw-Hill, Bogotá, Colombia, **Hayden, Michael:** *Máquinas de corriente alternas*. Editorial Continental, México, 1984.

ANEXOS

ANEXO 1

TRANSFORMADOR DE CORRIENTE: CONSTRUCCION Y DIAGRAMA VECTORIAL



ANEXO 2

MEDIDA DE LA POTENCIA ELÉCTRICA USANDO UN TRANSFORMADOR DE INTENSIDAD

