



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

**ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES
"ARAGON"
INGENIERIA**

**PUESTA EN OPERACION DEL CIRCUITO DE ALTA
TENSION DEL LABORATORIO DE PRUEBAS
ELECTRICAS DE SALAZAR DEL INSTITUTO DE
INVESTIGACIONES ELECTRICAS**

FALLA DE ORIGEN.

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA
P R E S E N T A
RAYMUNDO FLORES DIAZ

SAN JUAN DE ARAGON, EDO. DE MEX. 1989



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

INDICE

INTRODUCCION.

I TECNICAS DE ALTA TENSION.

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | Equipo eléctrico en campo y requerimientos de vida útil. | 3 |
| 1.1 | Sobretensiones a la frecuencia del sistema (60 Hz). | 4 |
| 1.2 | Sobretensiones transitorias. | 4 |
| 1.2.1 | Interrupción por cortocircuito. | 5 |
| 1.2.2 | Desconexión de transformadores y reactores en vacío. | 5 |
| 1.2.3 | Desconexión de líneas de transmisión largas en vacío. | 6 |
| 1.3 | Conexión de líneas de transmisión. | 9 |
| 2 | Tipos de aislamientos. | 11 |
| 2.1 | Aislantes sólidos. | 11 |
| 2.1.1 | Materiales cerámicos. | 12 |
| 2.1.2 | Materias fibrosas. | 14 |
| 2.1.3 | Mica. | 16 |
| 2.1.4 | Productos sintéticos y elastómeros. | 17 |
| 2.1.5 | Masas de colada y relleno. | 20 |
| 2.1.6 | Barnices aislantes. | 21 |
| 2.2 | Aislantes líquidos. | 21 |
| 2.3 | Aislantes gaseosos. | 24 |
| 3 | Pruebas dieléctricas y calidad de aislamientos. | 25 |

II DESCARGAS PARCIALES.

| | | |
|-----|---|----|
| 1 | Las descargas parciales. | 39 |
| 1.1 | Importancia de las descargas parciales. | 39 |
| 1.2 | Clasificación de las descargas parciales. | 40 |

| | | |
|---------|---|-----|
| 1.3 | Métodos de detección de las descargas parciales. | 43 |
| 1.3.1 | métodos de detección no eléctricos. | 43 |
| 1.3.2 | métodos de detección eléctricos. | 44 |
| 1.4 | Principio de la descarga parcial. | 45 |
| 1.5 | Circuito básico de prueba. | 48 |
| 1.6 | Carga y energía de descarga. | 50 |
| 1.7 | Definición de cantidades relacionadas con las descargas parciales. | 52 |
| 1.8 | Circuito de medición de descargas parciales. | 55 |
| 1.8.1 | Impedancias de medición básicas. | 55 |
| 1.8.1.1 | Impedancia resistiva. | 55 |
| 1.8.1.2 | Impedancia inductiva. | 57 |
| 1.8.2 | Circuitos detectores de descargas parciales. | 59 |
| 1.8.2.1 | Detector no balanceado. | 60 |
| 1.8.2.2 | Detector balanceado. | 60 |
| 1.8.3 | Calibración de detectores. | 62 |
| 1.8.3.1 | Calibración directa. | 62 |
| 1.8.3.2 | Calibración indirecta. | 63 |
| 1.8.4 | Integradores de pulsos. | 64 |
| 1.8.4.1 | Integrador de banda ancha. | 66 |
| 1.8.4.2 | Integrador de banda angosta. | 67 |
| 1.8.4.3 | Diferencias de integradores. | 69 |
| 1.8.5 | El osciloscopio como medidor de descargas parciales. | 70 |
| 1.8.6 | Medidores para otras cantidades relacionadas con las descargas parciales. | 71 |
| 1.9 | Representación de diferentes formas de las descargas parciales. | 74 |
| 1.10 | Componentes de un circuito de prueba de descargas parciales. | 81 |
| 1.11 | Niveles permisibles de descargas parciales en los transformadores. | 84 |
| 1.11.1 | Transformadores de potencia (normas IEC 76-3 e IEEE Std. 262R). | 86 |
| 1.11.2 | Transformadores de distribución (sumergidos en aceite, normas NEMA IR-1). | 88 |
| 1.11.3 | Transformadores de instrumento (norma IEC 44-4, 1980). | 90 |
| 1.12 | Resultados de prueba a un transformador de distribución y uno de instrumento. | 94 |
| 2 | Interferencias y su eliminación. | 99 |
| 2.1 | Perturbaciones y sensibilidad en mediciones de descargas parciales. | 99 |
| 2.2 | Clasificación de interferencias. | 100 |
| 2.3 | Patrones de interferencia. | 101 |
| 2.4 | Vías por las que se introduce la interferencia en el circuito de prueba de descargas parciales. | 106 |
| 2.5 | Eliminación de interferencias en el circuito de prueba de descargas parciales. | 108 |

| | | |
|---------|--|-----|
| 2.5.1 | De las fuentes independientes de la tensión de prueba. | 108 |
| 2.5.1.1 | Fuentes no externas. | 109 |
| 2.5.1.2 | Fuentes externas. | 111 |
| 2.5.2 | De las fuentes asociadas con la tensión de prueba. | 113 |

III TENSION APLICADA.

| | | |
|-----|--|-----|
| 1 | Recomendaciones de norma. | 121 |
| 2 | Calibración del transformador elevador. | 122 |
| 2.1 | Calibración mediante voltmetro de esferas. | 122 |
| 2.2 | Calibración mediante divisor de voltaje. | 127 |
| 3 | Procedimiento de prueba. | 129 |
| 4 | Efectos en los aislamientos durante la prueba. | 129 |
| 5 | Pruebas de tensión aplicada y descargas parciales. | 130 |
| 6 | Niveles de aislamiento y tensiones de prueba. | 131 |

IV FACTOR DE PERDIDAS.

| | | |
|---|---|-----|
| 1 | Fenómeno eléctrico en un capacitor ideal. | 136 |
| 2 | Fenómeno eléctrico en un dieléctrico entre dos electrodos. | 137 |
| 3 | Circuito equivalente de un dieléctrico. | 139 |
| 4 | Pérdidas dieléctricas en aislantes. | 143 |
| 5 | Factor de pérdidas, nivel de tensión y sus efectos en el tiempo en transformadores. | 145 |
| 6 | Variación del factor de pérdidas con la frecuencia. | 150 |

V FACTOR DE POTENCIA.

| | | |
|-----|---|-----|
| 1 | Factor de potencia e Índice de pérdidas. | 153 |
| 2 | Medidor del factor de potencia MEU. | 154 |
| 2.1 | El medidor MEU en conexión GROUND. | 156 |
| 2.2 | El medidor MEU en conexión GUARD. | 157 |
| 2.3 | El medidor MEU en conexión USI. | 158 |
| 3 | Precauciones en la medición del factor de potencia. . . | 158 |
| 4 | Niveles permitidos en el factor de potencia. | 159 |

VI PUESTA EN SERVICIO DEL LABORATORIO DE SALAZAR.

| | | |
|-------|--|-----|
| 1 | Circuito de alta tensión del Laboratorio. | 161 |
| 1.1 | Circuito de alta tensión. | 162 |
| 1.2 | Circuito de medición y control. | 166 |
| 1.2.1 | Circuito de medición. | 166 |
| 1.2.2 | Circuito de control. | 167 |
| 2 | Consideraciones necesarias al circuito de alta tensión del Laboratorio para un circuito de pruebas de descargas parciales. | 172 |
| 2.1 | Circuito de alta tensión e interferencias. | 172 |
| 2.2 | Cálculo de la capacitancia máxima de elementos a probar. | 175 |
| 2.3 | Sistema de medición de descargas parciales. | 178 |
| 2.4 | Transformador de aislamiento. | 180 |
| 2.5 | Filtro paso-bajas. | 181 |
| 2.6 | Electrodos y conectores de alta tensión. | 187 |
| 2.7 | Jaula de Faraday. | 191 |
| 2.8 | Circuito de descargas parciales del Laboratorio de Salazar. | 191 |
| 3 | Pruebas realizables en el Laboratorio de Salazar. . . . | 192 |
| 3.1 | Tensión aplicada. | 192 |
| 3.2 | Descargas parciales. | 194 |

VII RESULTADOS DE PRUEBAS EXPERIMENTALES.

| | | |
|---|---|-----|
| 1 | Objetivo de las pruebas. | 196 |
| 2 | Equipo utilizado. | 196 |
| 3 | Circuitos de prueba empleados. | 200 |
| 4 | Conexiones y recomendaciones. | 201 |
| | 4.1 Conexiones. | 201 |
| | 4.2 Recomendaciones antes de la prueba. | 203 |
| 5 | Método de prueba. | 203 |
| 6 | Resultados de las pruebas. | 208 |
| 7 | Interpretación de resultados. | 216 |

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

| | |
|--------------------------|-----|
| Conclusiones. | 219 |
| Recomendaciones. | 222 |

BIBLIOGRAFIA.

INTRODUCCION .

Todo aparato, equipo o sistema eléctrico está expuesto, durante su vida de servicio, a una serie de fenómenos presentes tanto en condiciones normales como anormales de operación, fenómenos que pueden afectarlos e incluso hacerlos fallar. Son fenómenos en condiciones anormales las sobretensiones y sobrecorrientes; y en condiciones normales, fenómenos como perturbaciones de alta frecuencia, emisión de luz, ruido, reacciones químicas, degradación, calor, etc., estos últimos se ven amplificadas por el efecto de las sobretensiones y sobrecorrientes. Ambos tipos de fenómenos son dañinos en los aparatos haciendo efecto en sus aislamientos del que depende en gran medida su vida. Los fenómenos que ocurren en las condiciones normales se deben en gran parte, a huecos y/o inclusiones en aislantes sólidos y burbujas y partículas metálicas en aislantes líquidos. Aunado a los fenómenos anteriores, se encuentran las condiciones atmosféricas, las que en ocasiones son adversas a los aparatos y equipos de los sistemas eléctricos afectándolos con el tiempo.

Debido al desarrollo de los equipos que integran de los sistemas eléctricos y al empleo de tensiones cada vez más elevadas, los materiales aislantes también se han desarrollado; sin embargo, esto ha ocasionado problemas de homogeneidad que se presenta como defectos en los materiales.

Los defectos en los materiales aislantes, se presentan por un mal proceso en su fabricación, el que se detecta mediante diferentes pruebas dieléctricas que se practican a los aparatos, para así verificar la calidad de sus aislamientos.

Para que un aislamiento sea de alta calidad y eficiente, se debe elegir el adecuado, bajo un alto coeficiente de seguridad, así como el proceso apropiado.

De las diferentes pruebas que se practican a los aparatos con las pruebas dieléctricas, se verifica la calidad de los aislamientos, así como la mano de obra; otras pruebas están enfocadas a probar la aptitud de los aparatos para cumplir su función y otras más para comprobar alguna característica en particular. Para que un aparato soporte los diferentes disturbios a que estará sometido en operación y presente una seguridad de funcionamiento

suficiente, debe estar bien diseñado, construido y pasar satisfactoriamente las diferentes pruebas.

En el presente trabajo, se describen los diferentes materiales aislantes que existen, los fenómenos que los afectan, así como diferentes pruebas dieléctricas que se les practican a los aparatos, dentro de las cuales se incluye la prueba de descargas parciales, de la que se da su importancia, cómo se producen, su clasificación, equipo que se emplea para realizar la prueba, problemas que presenta, así como la eliminación de las perturbaciones que las afectan para la realización correcta de la prueba. Se dan también ciertas consideraciones hechas al circuito de alta tensión del Laboratorio de Salazar para la obtención de un circuito de prueba de descargas parciales.

Finalmente, se dan resultados de las pruebas de potencial aplicado y descargas parciales practicadas a varios transformadores de instrumento.

CAPITULO I

TECNICAS DE ALTA TENSION

1 Equipo eléctrico en campo y requerimientos de vida útil.

Todos los equipos eléctricos están diseñados para operar en ciertas condiciones; sin embargo, en las condiciones normales de operación pueden ocurrir fenómenos ya sea internos o externos al sistema eléctrico que pueden ser de consideración, pues pueden dañar algún elemento del sistema o al sistema mismo por las sobretensiones que provocan dichos fenómenos. Los fenómenos actúan sobre los aislamientos cuando las protecciones no son suficientes, perdiendo sus propiedades aislantes cuando el aislamiento no es recuperable.

Son fenómenos de origen externo, las descargas atmosféricas directas o en áreas cercanas al equipo y los deslizamientos de nubes sobre líneas de transmisión, estas últimas por inducción crean las sobretensiones.

Los fenómenos propios del sistema o internos son los cortos circuitos que originan sobretensiones en las fases no falladas; desconexión de cargas importantes y operación en vacío de líneas de transmisión largas, etc..

Otros factores que pueden provocar sobrevoltajes son el viento que puede originar fallas entre fases, sismos, nieve, contaminación y humedad.

En general, las sobretensiones en los sistemas eléctricos se dividen en los de origen atmosférico y por maniobra de interruptores, a su vez, este último en sobretensiones a la frecuencia del sistema y sobretensiones transitorias.

1.1 Sobretensiones a la frecuencia del sistema (60 Hz).

Las sobretensiones a la frecuencia del sistema pueden aparecer por la pérdida súbita de carga y por fallas de fase a tierra en un sistema. Si en algún punto de la red, la carga se pierde, las caídas de tensión por efectos capacitivos o inductivos tienden a desaparecer y debido a esto, aumenta la tensión por el efecto capacitivo de la red en vacío, aunado a ello, la tensión puede aumentar por la aceleración y autoexcitación de los generadores en las plantas de generación.

En redes largas y débiles, cuando se alimentan cargas, ocurre el caso más crítico.

1.2 Sobretensiones transitorias.

Este tipo de sobretensiones las producen todos los procesos de maniobra de interruptores en una red, la forma de onda puede tener una forma indeterminada y una amplitud muy grande. Las sobretensiones en sistemas de alta tensión, tienen una frecuencia fundamental de cientos de miles de Hz.

Para tener conocimiento de qué nivel de sobretensión puede resistir un sistema, se considera el valor pico de la tensión máxima de fase a tierra y el valor de voltaje máximo en kV en maniobra de interruptores, así por ejemplo, para un sistema de tensión nominal de 400 kV con una tensión máxima de 420 kV, su valor pico de fase a tierra es:

$$\frac{420 \times \sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 343 \text{ kV}$$

Si el sistema tiene un nivel de voltaje máximo de 900 kV de maniobra de interruptores, el factor de sobrevoltaje será entonces:

$$\frac{900}{343} = 2.62 \text{ p.u.}$$

Las sobretensiones por maniobra de interruptores son:

- a) Interrupción por cortocircuito.
- b) Desconexión de transformadores y reactores en vacío.

c) Desconexión de líneas de transmisión largas en vacío.

1.2.1 Interrupción por cortocircuito.

Después de que se interrumpe un cortocircuito, ocurre una sobretensión que tiene una componente a la frecuencia del sistema y una o más componentes de alta frecuencia, la primera aumentada por el hecho de que las tres fases del sistema no interrumpen al mismo tiempo, sino hasta que la corriente pasa por el cero natural y que no existe sistema sólidamente aterrizado. Por otra parte, las componentes de alta frecuencia son transitorias a la frecuencia natural de las inductancias y capacitancias de la red.

1.2.2 Desconexión de transformadores y reactores en vacío.

La interrupción de corrientes de excitación de transformadores y de reactores (corrientes inductivas pequeñas) antes del cero natural, causan sobretensiones, y la energía que se almacena hasta el momento de la descarga se transforma en energía electrostática en la capacitancia del sistema.

El fenómeno produce cierto número de reigniciones de alta frecuencia (frecuencia natural de la inductancia y capacitancia) en el circuito interruptor hasta que los contactos se abren lo suficiente, la oscilación ocurre a frecuencias de algunos kHz. Lo anterior se ilustra en la figura 1.

El fenómeno de histéresis es importante en estas sobretensiones para ambos elementos, pues solo una parte de la energía almacenada en el transformador es liberada, mientras en el reactor que tiene entrehierros relativamente grandes, el fenómeno de histéresis casi no existe y el reactor almacena mayor energía que el transformador, aunado a ello, las corrientes en los reactores tienen magnitudes de cientos de amperes y por ello mayores que las de excitación de transformadores que son del orden de amperes o fracciones de amper. Lo anterior nos indica que las sobretensiones son de mayor magnitud en la desconexión de reactores, pero aún sobretensiones de peligro aparecen si se interrumpen las corrientes de excitación de transformadores inmediatamente después de ser energizado.

Las sobretensiones por interrupción de transformadores y reactores, se reduce por medio de resistencias en el interruptor

y por apartarrayos. Las resistencias amortiguan positivamente el arco del circuito interruptor reduciendo la tendencia a cortar la corriente y proporcionar un canal de descarga para la energía del transformador después de la interrupción.

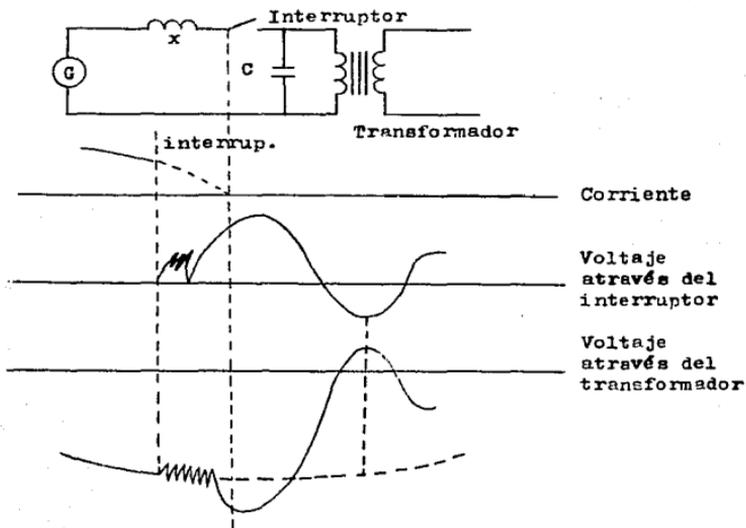


FIGURA 1 Sobrevoltaje por desconexión de transformadores.

1.2.3 Desconexión de líneas de transmisión largas en vacío.

Las sobretensiones también son producidas por la desconexión de líneas de transmisión estando en vacío, que involucra ruptura de

corrientes capacitivas relativamente altas, la interrupción tiene lugar en el cero natural de la corriente, es decir, cuando la onda de voltaje es máximo. Figura 2b.

Después de desconectar la línea, en ésta aparece un voltaje constante que desaparece poco a poco, figura 2c, después de aproximadamente medio ciclo el voltaje a través del interruptor se incrementa aproximadamente a dos veces el voltaje de fase, porción 1 de la figura 2d. Si el interruptor rearquea en este instante, la línea se descarga a través de la inductancia que presenta, porción 2 de la figura 2d, y aparece una oscilación con frecuencia fundamental de unos cientos de Hz. Si la corriente se interrumpe en el primer cero de la onda de corriente, figura 2e, en la línea permanece un voltaje constante de polaridad opuesta y de magnitud dos veces lo que había anteriormente y que también permanece en la línea y después de medio ciclo el voltaje en el interruptor se incrementará en tres veces el voltaje de fase con riesgo de otro rearqueo y aumento del voltaje de línea.

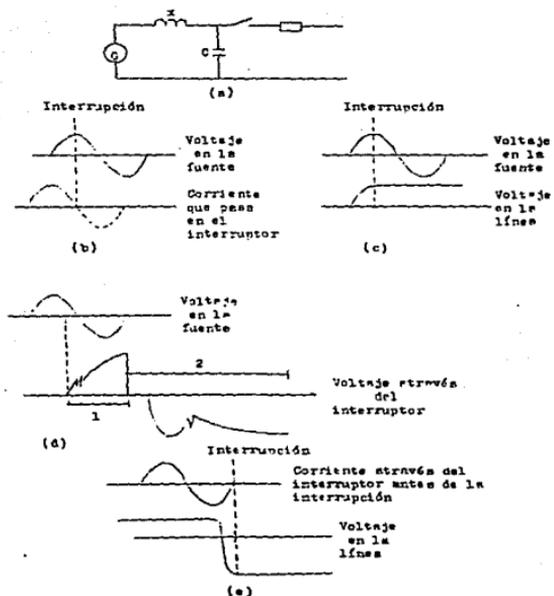


FIGURA 2 Formas de onda en desconexión de L.T. largas en vacío. a) Circuito equivalente de la L.T. b) Momento de la desconexión. c) Voltaje constante que aparece en la línea. d) Resaqueo del interruptor después de la desconexión. e) Interrupción en el primer paso por cero de la onda de voltaje.

El rearqueo en una fase conduce con frecuencia a producir rearqueo en otra fase, el factor de sobrevoltaje en redes directamente conectadas a tierra normalmente es menor o igual a 3.

La protección para estas sobretensiones se logra con interruptores libres de rearqueo: interruptores en aire, y en

redes de muy alta tensión, interruptores en SF6 (hexafluoruro de azufre).

1.3 Conexión de líneas de transmisión.

Otra de las formas en que se produce sobretensión, es la energización de líneas en vacío o con carga atrapada en el momento de la energización. Cuando una línea en vacío se conecta a la red, se inyecta en ella una onda de voltaje de forma y magnitud dependientes de los parámetros de la red. Por ejemplo, si la red tiene una elevada potencia de cortocircuito o si otras líneas están conectadas en el lado de la red del interruptor, la onda de voltaje puede tener una pendiente muy elevada, esto se muestra en la figura 3b. Si la red es débil (baja potencia de corto circuito debido a una alta inductancia del lado de la fuente), la onda tendrá una pendiente baja, ésta se reduce a medida que la onda se desplaza en la línea, figura 3c.

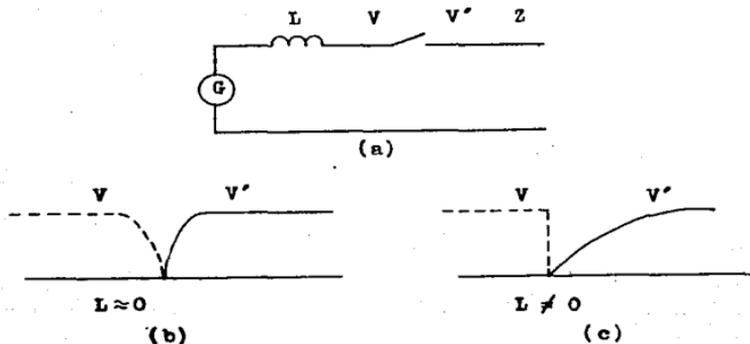


FIGURA 3 Frentes de onda en la conexión de líneas de transmisión. a) L.I. b) Onda de voltaje en la L.I. con alta potencia de cortocircuito o L.I. con otras L.I. conectadas. c) L.I. débil.

La onda se refleja en el extremo más lejano de la L.T., cuando está sin carga, los valores de tensión pueden ser del doble o aún mayores. Cuando la L.T. tiene carga atrapada antes de la conexión y ésta se hace en el momento en que la onda de voltaje tiene polaridad opuesta (en casos de recierre rápido), en el extremo más lejano, los valores de voltaje pueden ser de hasta tres veces el voltaje de línea.

Para reducir las sobretensiones, en este caso, se emplean resistencias de preinserción con los interruptores, con esto en una primera etapa, las resistencias en serie con la línea actúan como divisores de tensión reduciendo el voltaje y en una segunda etapa las resistencias se cortocircuitan con lo que se logra una tensión de amplitud limitada. Los valores de resistencias son mayores para L.T. cortas, con ello se logra reducir el factor de sobrevoltaje a 2 p.u. en interruptores estándar.

Las sobretensiones por maniobra pueden dividirse en general en dos grupos:

- a) Sobretensiones en algún punto de la red durante operación normal.
- b) Sobretensiones en una sección de la red cuando ésta se está desconectando.

En el caso (a), las sobretensiones son causadas por operaciones de maniobra, en otras partes del sistema ocurren frecuentemente y la amplitud de la onda de voltaje es moderada.

Las sobretensiones del caso (b) ocurren pocas veces, tienen gran amplitud y el sobrevoltaje es de hasta 3.5 p.u. en energización de L.T..

Al ocurrir una sobretensión, ésta se propaga a lo largo del sistema, entran en operación las protecciones correspondientes para que los elementos componentes del sistema experimenten una sobretensión reducida; sin embargo algunas aparatos resisten las sobretensiones en alguno de sus componentes, pues es una energía mayor a su capacidad nominal y si se prolonga en el tiempo, el aparato puede fallar en alguna de sus partes o quedar resentido y en algún momento de su operación normal fallar o en una próxima sobretensión. Las fallas se presentan en los aislamientos y si éstos fallan el aparato falla.

Cuando se diseña un aparato, éste debe soportar las condiciones tanto normales como anormales de operación; es decir, garantizar su buen funcionamiento, por ello, se debe poner especial cuidado en su fabricación. Todos los aparatos son sometidos a pruebas destinadas a verificar si garantizan una seguridad de

funcionamiento suficiente para resistir las diversas exigencias eléctricas, algunas de ellas son para simular las diversas sobretensiones que puedan ocurrir en la operación normal de un aparato.

2 Tipos de aislamientos.

Los materiales aislantes desempeñan un papel muy importante en todo equipo, aparato o sistema eléctrico, dado que se requiere alguna o algunas partes libres de conducción eléctrica, ya sea para aislar otros sistema, de tierra, de partes conductoras, etc., hasta para realizar maniobras, su vida depende de ellos, de su elección y empleo correcto.

En el mercado hay gran variedad de materiales aislantes, por esto y dada su rápida evolución, además de la variedad de máquinas y aparatos a que son destinados, se dificulta una adecuada selección de los materiales aislantes. De la diversidad de materiales que existen, materiales de un mismo tipo pueden tener propiedades físicas y químicas diferentes, lo que provoca que una clasificación sea difícil y hasta dudosa. En general, todos los materiales aislantes encuentran empleo, solo algunos de ellos quedan excluidos para tensiones arriba de 1000 kV.

2.1 Aislantes sólidos.

Existe gran variedad de materiales aislantes sólidos, los cuales son los más utilizados sobre los aislantes líquidos y gaseosos; a bajas tensiones se emplean más comúnmente.

Dentro de este tipo de materiales se encuentran los siguientes:

- Materiales cerámicos.
- Materias fibrosas.
- Mica.
- Productos sintéticos y elastómeros.
- Masas de colada y relleno.
- Barnices aislantes.

2.1.1 Materiales cerámicos.

Se llaman materiales aislantes, a aquellos materiales que contienen arcilla y a sustancias inorgánicas cuyos constituyentes básicos requieren un proceso similar al que se emplea para la arcilla.

En este tipo de materiales predominan los sistemas cristalinos con una participación moderada de la fase vítrea, dependiendo de las fases cristalina y amorfa las propiedades eléctricas, físicas y mecánicas.

Los materiales inorgánicos se mezclan de diversas maneras y proporciones, obteniéndose diversos materiales cerámicos cuya clasificación es difícil; sin embargo a grandes rasgos se clasifican como sigue:

Cerámica a base de arcilla.....Aisladores de porcelana
Cerámica a base de talco.....Esteatita
Cerámica a base de titanio.....Capastea, condensas
Cerámica a base de óxidos.....Óxidos de aluminio, etc.

PORCELANA.

De los materiales cerámicos es el más blanco y compacto, translucido en piezas de bajo espesor. Básicamente está constituido por caolín (silicato de aluminio puro), cuarzo (anhídrido silícico) y feldespato (silicato alúmino-potásico) con las que se logra mejorar las cualidades térmicas, mecánicas y eléctricas respectivamente.

El caolín es una sustancia arcillosa; sin embargo en muchos casos la porcelana lleva considerable cantidad de arcilla substituyendo al caolín y al feldespato, proporcionando mejor capacidad que el caolín y menor conductividad eléctrica que el feldespato.

Las ventajas de la porcelana es que es resistente a los agentes atmosféricos, químicos y físicos de todo género, dado que es incombustible y la humedad del aire no lo afecta; las desventajas es que es muy frágil y con la temperatura aumenta tanto el factor de pérdidas como la conductividad.

La porcelana se puede destruir con las descargas por arco cuando persisten por fracciones de segundo; en arcos de pequeña intensidad aún largos como en fracciones de minuto no producen daño.

ESTEATITA.

Son aquellas sustancias en las que predomina el talco jabonoso (minerales), los demás componentes en menor proporción son arcilla y feldespato o carbonato de bario. Es un material más homogéneo que la porcelana, además presenta menos pérdidas dieléctricas que ésta.

Las propiedades mecánicas y eléctricas son notables cuando la esteatita es pura. La desventaja de la esteatita es que es muy sensible a los cambios de temperatura; sin embargo ésta se reduce cuando a la esteatita se le agrega óxido de aluminio (corderita).

Las aplicaciones principales de esta material son: zócalos de interruptores, clavijas y enchufes, placas de bornes, tapones fusibles y sus accesorios, perlas aislantes, soportes, núcleos de bobinas de alta frecuencia, ejes de condensadores, piezas de interruptores, zócalos de condensadores de ajuste, aisladores de antena, etc..

COMPUESTOS DE TITANIO.

Este tipo de materiales se caracterizan por su elevada constante dieléctrica ϵ y pérdidas mínimas, se emplean en la fabricación de condensadores de alta frecuencia y en estabilizadores de tensión.

OXICERAMICA.

Son los materiales que poseen un alto contenido de óxido de aluminio, los que los hace poseer una alta resistencia al fuego y tener buena conductividad térmica. A estos materiales también se les conoce como "ultraporcelanas", se emplean básicamente en la fabricación de bujías de encendido y como tubos aislantes y de protección de elementos térmicos.

Existe otra variación de materiales oxicerámicos, los fabricados con óxido de aluminio puro, conocidos también como "sinterkorund" que poseen excelentes propiedades mecánicas, por lo que se usan para aisladores de bujías de encendido, aisladores para calderas eléctricas y hornos de alta temperatura.

También existen materiales oxicerámicos con óxidos de magnesio y zirconio, materiales que son resistentes al fuego y con buenas propiedades mecánicas.

VIDRIOS.

Son los materiales compuestos de anhídrido silícico y óxidos metálicos, principalmente de sodio y calcio. Algunas aplicaciones de este material son en lámparas de vapor de mercurio de alta presión, lámparas incandescentes, rectificadores de vapor de mercurio, aparatos electrónicos, etc.; en alta tensión se utilizan para aisladores tipo caperuza.

VIDRIOS DE CUARZO Y CUARZO OPACO.

El primero de estos materiales está constituido por anhídrido silícico puro; el segundo, por un producto de fusión de color lechoso a base de arena de cuarzo que contiene casi en su totalidad (99.7%) anhídrido silícico. Tienen aplicación en alta tensión, en especial en alta frecuencia, o para temperaturas elevadas: aisladores para electrofiltros (alta temperatura y acción de los gases), partes componentes de rectificadores, tubos de descarga y emisión, aparatos de alta frecuencia, etc..

2.1.2 Materias fibrosas.

Las materias fibrosas se emplean en las altas tensiones debido a su buen comportamiento eléctrico y características mecánicas, los más empleados son el papel de celulosa y similares, así como las textiles. El papel y sus similares se componen sobre todo de celulosa, puede contener materiales orgánicos artificiales, o vidrio, asfalto y mica.

El papel por si solo no puede usarse como material aislante, debido a que absorbe humedad y por la porosidad que presenta, es necesario combinarlo con otras sustancias, como impregnarlo con algún barniz, sumergido en aceite aislante o rodeado de un gas seco y a presión.

El papel impregnado en un líquido, no se considera como material sólido; sin embargo constituye el material aislante 'sólido' de muchos aparatos y máquinas eléctricas.

En aceite mineral, el papel se emplea en máquinas y aparatos eléctricos estacionarios como en transformadores, condensadores, cables, etc.. En transformadores el papel desempeña las funciones siguientes:

- a) Constituye una barrera aislante contra las impurezas macroscópicas.
- b) Soporta las exigencias mecánicas.
- c) Separa los conductores.

además sirve como soporte de los esfuerzos mecánicos que se producen, como en el caso de los cortocircuitos, esto junto con la característica del inciso (b) es particularmente importante debido a que de ellas depende en gran parte la vida de un transformador; también mantiene la distancia necesaria entre conductores.

Para cables, el papel aislante se impregna con aceite fluido (similar al de los transformadores), los cables así producidos son llamados cables en aceite; también se impregna con aceite espeso, con lo que se obtienen cables en masa de relleno o a presión.

Existen otros aceites con los que se impregna el papel, estos son hidrocarburos clorados; se impregna con aceites de naftalina clorada y difenilos clorados. Así se obtiene papel dieléctrico con la misma rigidez dieléctrica que con impregnación con aceite mineral. Se emplea en la fabricación de condensadores.

Con el papel en atmósfera de gas a presión se obtienen excelentes propiedades dieléctricas del papel. Se emplea comúnmente el gas nitrógeno para evitar la oxidación.

Otro tipo de materiales fibrosos son los textiles o telas, de los cuales se distinguen los siguientes grupos:

- Tejidos de origen vegetal: algodón, lino, etc.
- Tejidos de origen animal: lana, seda, etc.
- Tejidos de origen mineral: amianto, vidrio, etc.
- Tejidos de origen sintético: viscosa, poliamidas (nylon), poliakrilnitrilos (orlon), polietilentereftalatos (terylene), etc.

Las características mecánicas, químicas y dieléctricas de este tipo de materiales tejidos dependen de los procesos de su fabricación así como de las características del material. Más que como aislantes se emplean como soportes de barniz de impregnación, refuerzo mecánico y separador entre conductores. En altas tensiones se emplea como sigue:

- Tejidos de algodón.- En forma de cintas.
- Tejidos de fibras sintéticas o nobles.- De ellas se prefieren las de menor sensibilidad a la humedad y mayor resistencia al envejecimiento.
- Tejidos de seda.- Cuando requieren gruesos pequeños y alta resistencia.
- Tejidos de fibra de vidrio.- Se emplea para las temperaturas superiores a los 120 C y fuertes exigencias mecánicas, cuando se requieren a la vez alta resistencia al envejecimiento y a la humedad.
- Tejidos de amianto.- También para temperaturas arriba de los 120 C en espesores relativamente grandes y exigencias mecánicas limitadas.

Los materiales textiles al igual que el papel, puede estar impregnado con barniz aislante, en general de aceite. Ambos materiales, papel y telas, con el barniz, poseen elevada rigidez dieléctrica y escasas pérdidas, buen comportamiento a la humedad y resistencia a los aceites en caliente, así como buenas características mecánicas.

La madera es otro de los diversos materiales fibrosos, se emplea como material aislante debido a sus buenas cualidades mecánicas y a la facilidad con que se puede trabajar. La madera como aislante puede ser barnizada, cocida en aceite o en forma de contrachapeado duro, es decir, placas de madera impregnadas de resinas fenólicas.

2-1-3 Mica.

La mica posee características dieléctricas sobresalientes, además de gran resistencia al calor y a los agentes químicos.

De los diversos géneros de mica que existen sólo dos tienen importancia como material aislante: la mica muscovita o potásica (silicato de aluminio y potasio) y la flogopita de sodio o magnesio (silicato de aluminio, magnesio y potasio), la primera tiene mejores cualidades eléctricas y mecánicas que la segunda. La flogopita presenta una rigidez dieléctrica superior a la muscovita y pérdidas dieléctricas más reducidas y mayor resistencia y dureza mecánica que ésta, aunque de menor resistencia al calor. En general para la industria eléctrica la mica se usa como:

- Mica natural o en bruto.
- Micanita.

- Micafolio.
- Cintas de micanita.
- Papel de mica.

Dentro de la mica natural, existen diversos tipos, los cuales estan dados por la calidad, por lo que sus usos dependen de ésta; así por ejemplo, un tipo de calidad se utiliza en condensadores de medición, aparatos de alta frecuencia, etc., otro tipo como en instrumentos eléctricos de medición, descargadores de sobretensiones, bujías y elementos de resistencia.

La micanita consiste de varias capas de mica natural para la aplicación en máquinas eléctricas.

El micafolio y la cinta de mica, es la combinación de la mica con otros elementos: el micafolio consta de papel, barniz y mica; la cinta de mica de material fibroso, barniz y mica.

Existen varios tipos de papel de mica, los cuales tienen características reducidas; sin embargo con barnices especiales y materiales de soporte como los materiales textiles, papel o tejido de vidrio prensado a alta temperatura se obtiene el papel de mica con características notablemente mejoradas.

2.1.4 Productos sintéticos y elastómeros.

Son productos de ciertos polímeros, se obtienen por alguno de los siguientes métodos: polimerización, condensación y poliadición. En la polimerización no se desprenden substancias, en tanto que de la condensación si lo hace, por ejemplo agua, alcohol, etc.; con el método de poliadición tampoco se segrega substancias.

Con el método de polimerización, se obtienen los materiales termoplásticos, los que se ablandan con el calor. Con este método se obtienen aislantes de excelente calidad, como el cloruro de polivinilo, polietileno y poliestireno.

Con el segundo método, se pueden obtener ya sea materiales termoplásticos o termoendurescibles, éstos últimos no se ablandan en forma apreciable con el calor; sin embargo como en el proceso se desprenden substancias puede resultar perjudicial para las cualidades del producto como material aislante. Se obtiene como material termoplástico películas de tereftalatos de polietileno y como termoendurescibles los productos prensados laminares como el papel baquelizado y productos moldeables a presión como siliconas, resinas epoxídicas y poliésteres.

Con el método de poliadición, se obtienen materiales termoplásticos muy débiles como el poliuretano que se aplica en la fabricación de hilos esmaltados.

Dentro de los productos sintéticos, se encuentran los materiales polimerizados, los cuales se designan como materiales sintéticos termoplásticos, los que se emplean para alta tensión son: cloruro de polivinilo, polietileno y poliestirolo.

El cloruro de polivinilo, se emplea principalmente como aislamiento de hilos y cables, los que los hace más resistentes al envejecimiento, se emplea también como cinta aislante.

El polietileno posee elevadas propiedades dieléctricas, su factor de pérdidas resulta muy bajo y su resistividad muy alta, además, es resistente a la corrosión. Se emplea en la fabricación de cables de alta tensión y condensadores, se usa también en alta frecuencia, etc..

El poliestirolo posee buenas cualidades dieléctricas, además de ser resistente al calor, se emplea tanto para baja como para alta tensión en alta frecuencia.

Otros productos sintéticos, son los materiales prensados laminares que consisten de ciertas substancias orgánicas constituidas por resinas endurecibles y un soporte que puede ser papel, tejidos, chapas de madera, etc., se obtiene así respectivamente papel, tela (placa, tubos, barras) y contrachapeado baquelizado. La desventaja de estos materiales es que en atmósfera húmeda absorben agua; sin embargo en ausencia de agua son resistentes a los agentes químicos. Posee buenas cualidades mecánicas, térmicas y eléctricas. Tienen gran aplicación en la construcción de aparatos y transformadores; para soportes, atravesadores, placas de asiento, pantallas aislantes, etc.. De los materiales prensados laminares, el más empleado es la lámina de papel baquelizado sumergido en aceite, se usa como cilindros aislantes de transformadores y aparatos, separadores, sobretres o valonas angulares, etc..

Dentro de los productos sintéticos y elastómeros, se encuentran también los materiales moldeados a presión, éstos son ciertos aglomerados a base de resina artificial en un 40 a 50 %, el resto son substancias orgánicas como material de relleno. El material de relleno usualmente es aserrín y polvos minerales.

La aplicación en alta tensión, está limitada debido a que sus características de pérdidas son poco favorables, se emplea en aquellos casos en que un fuerte voltaje tiene una corta duración y los esfuerzos mecánicos dominantes, como en cámaras de expansión y cámaras de ruptura de los disyuntores de aire comprimido.

Otro material dentro de los productos sintéticos y elastómeros son las películas que son láminas extremadamente delgadas, en general transparentes, homogéneas y con buenas propiedades aislantes, se emplean para el aislamiento entre capas de los aparatos y máquinas eléctricas y para el recubrimiento de conductores y bocinas. La mayoría de las películas presentan elevada rigidez dieléctrica a fuertes voltajes de corta duración; sin embargo su resistencia al efecto corona no es muy buena, por lo que sus características permanentes deben mantenerse abajo del límite. Las películas que se utilizan en la alta tensión son de triacetato de celulosa, de polietileno y de tereftalato de polietileno.

Las siliconas son otro material de los productos sintéticos y elastómeros, tienen gran resistencia física y química en un rango de temperaturas, resistencia al agua y buenas propiedades dieléctricas. Dentro de las siliconas se encuentran:

- Aislantes líquidos (aceites y otros líquidos).
- Grasas y compounds.
- Resinas.
- Siliconelastómeros.

Aislantes líquidos.

Tienen propiedades aislantes notables, el factor de potencia varía muy poco con la temperatura y es muy bajo hasta $1E+8$ Hz, frecuencia a la que experimenta crecimiento sensible. De este tipo de material aislante se habla en otro subtema.

Grasas y compounds.

Este tipo de aislantes son resistentes a la humedad, se emplea para el relleno de cables de encendido y en aparatos de radio que deben funcionar en condiciones atmosféricas severas.

Resinas.

Poseen buenas propiedades dieléctricas, son resistentes al calor y al agua. Se emplea como barniz aislante para la impregnación de máquinas eléctricas.

Algunas resinas se combinan con otras sintéticas, por ejemplo, poliéster, se obtienen barnices para esmaltar hilos de cobre.

Masas de sílica moldeadas a presión, se obtienen piezas de forma cualquiera; son insensibles al arco eléctrico tanto en medios húmedos como corrosivos, es resistente al agua y a los microorganismos en condiciones climáticas severas, es

incombustible y puede ser usado a cualquier temperatura en el rango de -70°C a $+300^{\circ}\text{C}$. Se emplea en aparatos eléctricos que deben funcionar en caso de tormenta bajo fuertes efectos térmicos.

Siliconelastómeros.

Se emplea en la fabricación de cables que trabajan hasta 200°C , en motores de 200 a 2000 CV, en transformadores de 15 kV a potencias de 2000 kVA con atmósfera de nitrógeno y 3000 kVA en construcción ventilada.

El caucho natural y artificial es otro producto que se emplea en alta tensión, principalmente en la fabricación de cables.

2.1.5 Masas de colada y relleno.

Se utiliza para colmar los huecos con material aislante sólido a la temperatura ambiente, otros para impregnar los devanados o para aislar las barras de los alternadores, otros más como capa (recubrimiento) de protección mecánica y contra la intemperie en algunos aparatos.

Existen dos clases principales de estos materiales: de carácter fusible (compounds) y las endurecibles.

MASAS FUSIBLES.

Poseen buenas características dieléctricas, además alta rigidez dieléctrica superficial en atmósfera húmeda. Se puede mezclar con sustancias cristalinas como el cuarzo para aumentar algunas de sus cualidades.

MASAS ENDURECIBLES.

Poseen buenas cualidades dieléctricas, son traslúcidos, resistentes al agua y a muchos agentes químicos. Dentro de estos materiales se encuentran las resinas epoxídicas, las que se emplean en los transformadores de medición, para construir placas y tubos aislantes con tela de vidrio, para atravesadores y soportes aislantes.

2.1.6 Barnices aislantes.

Los barnices aislantes tienen la función de aislar eléctricamente y de proteger contra la acción atmosférica y de los agentes químicos, es decir, se usan en impregnación y recubrimiento. Pueden mezclarse con otros barnices para producir barnices con características especiales.

Existen barnices líquidos y endurecidos, estos últimos presentan buenas propiedades dieléctricas, resistencia al agua y a los agentes atmosféricos. Se usan también como barnices aislantes algunas resinas como las epoxídicas, otras sustancias se emplean para el tratamiento de transformadores en aire o en aceite, para bobinas de encendido y aparatos de radar.

Los barnices pueden recibir adiciones de materiales sólidos muy finos, aislantes o, eventualmente conductores, resultando los barnices pigmentados, los que no se usan para impregnación, pues no sirven para ello.

En general, los barnices aislantes se aplican en la fabricación de máquinas y aparatos eléctricos para protegerlos contra las vibraciones y el deterioro que puede provocar la humedad, sustancias químicas, insectos y moho. Debe aplicarse de cuando en cuando como medida de protección a los materiales eléctricos para conservar en buen estado permanente las características dieléctricas, con ello se evita pérdidas de tiempo e interrupciones de servicio que pueden ser costosas.

2.2 Aislantes líquidos.

Los aislantes líquidos son esenciales en las altas tensiones; poseen muchas características superiores a la de los aislantes sólidos, necesarios para los equipos y aparatos de alta tensión. Sus funciones primordiales son:

- a) Protege los materiales sólidos de la humedad y aire.
- b) Contribuye a disminuir las sollicitaciones dieléctricas de los aislantes sólidos.
- c) Actúa como refrigerante: absorbe el calor y lo transmite por convección.
- d) Aisla eléctricamente las partes energizadas.

En aparatos y equipos en servicio, los líquidos aislantes deben

mantener sus características para que cumpla su función de aislante eléctrico, las más importantes se listan en seguida:

- a) Alta rigidez dieléctrica para soportar los diversos esfuerzos impuestos en servicio.
- b) Debe tener baja viscosidad para circular y transferir el calor.
- c) Debe tener resistencia a desprender gases (absorber o retener el hidrógeno que se produzca) y alta resistencia a la gasificación (alta temperatura de ignición).
- d) Debe tener muy bajo punto de congelación para fluir a temperaturas bajas en lugares fríos.
- e) Tener bajo factor de potencia, un valor alto indica pérdidas dieléctricas que pueden ser producidas por presencia de contaminantes o productos de deterioro (como agua), productos de oxidación, etc..
- f) Sus pérdidas dieléctricas no deben ser excesivas y su resistividad volumétrica debe ser alta, con ello tiene una corriente de fuga reducida y reducción del riesgo que ocurra descarga térmica.
- g) Debe poseer estabilidad química, es decir, no deteriorarse o contaminarse por efectos adversos a los materiales del equipo, ni descomponerse en lodos que impidan su circulación.

Las propiedades dieléctricas del aislantes que nos ocupa, dependen principalmente de las impurezas disueltas o en suspensión aparecidas durante la fabricación o el uso. Por ejemplo, la rigidez dieléctrica depende según el estado de pureza, es decir de materiales sólidos y líquidos y cuerpos extraños insolubles (fibras sueltas o gotas de agua) inmersos en el aislante líquido.

Con impurezas como compuestos polares (azufre, oxígeno y nitrógeno) que provocan envejecimiento, compuestos metálicos, ácidos, jabones, etc. se provoca que disminuya la resistencia de aislamiento y aumenten las pérdidas de aislamiento, particularmente a bajas frecuencias.

Otro factor que afecta al aislante líquido es la excesiva temperatura y las descargas por arco, particularmente con el aumento de temperatura, las pérdidas dieléctricas y la conductividad aumentan y el estado de viscosidad cambia.

En general, los aislamientos líquidos son de hidrocarburos, estos con impurezas como ácidos se afectan y con trazas metálicas se favorece la oxidación, esto último en todo aislante líquido.

Existen básicamente cinco grupos principales de aislantes líquidos:

HIDROCARBUROS.- Son mezclas de hidrocarburos que contienen

diversas sustancias adicionadas que mejoran su resistencia al envejecimiento, disminuye el punto de congelación y la tendencia a desprender gases, además de aumentar la viscosidad.

HIDROCARBUROS AROMATICOS CLORADOS (ASKARELES).- A menudo contienen sustancias adicionadas que evitan el que se desprenda ácido clorhídrico. Se emplea en transformadores y capacitores.

HIDROCARBUROS FLUORADOS.- Total o parcialmente fluorados. Se utilizan en transformadores.

ACEITES DE SILICONA.- Son mezclas de compuestos orgánicos de silicio. Se emplea en transformadores.

OTROS AISLANTES LIQUIDOS.- Son productos sesores de ésteres como dibutilsebazato, tricresil-fosfato, aceite de ricino, etc..

Se utilizan todos los aislante líquidos como aislante y refrigerante en transformadores, interruptores, seccionadores, reactores, reguladores, cables de energía, capacitores, etc..

Los aislantes de hidrocarburos o aceites minerales, están constituidos por una mezcla de hidrocarburos, se divide básicamente en tres tipos:

- a) Aceites de metano: Contienen más del 66 % de hidrocarburos parafínicos.
- b) Aceites de nafta: Contienen más del 66 % de hidrocarburos nafténicos.
- c) Aceites naftametanos: Contienen ambos hidrocarburos en cantidad que no excede el 66 %.

Todo aislante líquido, estando en servicio decrecen sus propiedades debido a una serie de fenómenos que causan su deterioro, tal como la temperatura, de la que la acción del calor y el oxígeno del aire y del propio aceite aislante producen productos de oxidación solubles e insolubles como ácidos y lodos respectivamente. Estos últimos al depositarse en la superficie impide la libre circulación del aceite para la evacuación del calor.

Un buen aceite mineral, respecto a la acidez, es aquél que su grado de acidez no excede un cierto valor después de mucho tiempo de servicio, por ejemplo 0.5 mg por gramo de aceite. Este tipo de aceite es sensible a la oxidación, más aún a alta temperatura y a trazas metálicas inmersas en él; es combustible y el calor y arco eléctrico lo descomponen.

Existe otro tipo de aceite, los espesados, los cuales se obtienen añadiendo a los aceites minerales colofonia o aceites de resina, poseen gran rigidez dieléctrica, sin embargo tienden a auto

oxidarse aún sin oxígeno, entonces la temperatura aumenta y se producen substancias no muy ácidas que no afectan los aislamientos sumergidos en el aceite; la viscosidad aumenta y las propiedades refrigerantes disminuyen. Sin embargo, es interesante observar que a mayor contenido de resina, las pérdidas dieléctricas máximas ocurren a temperaturas más altas a una frecuencia constante.

Con mayor grado de pureza de la resina, se obtienen pérdidas dieléctricas de los aceites espesados sumamente bajas a las temperaturas de servicio. Normalmente se emplea este tipo de aceite en la fabricación de cables y condensadores.

Los hidrocarburos aromáticos clorados, son otro tipo de aislante líquido que contrario al aceite mineral es incombustible e inoxidable, otras ventajas son el que conserva sus propiedades aislantes, después de una descarga disruptiva; sin embargo en servicio aumenta su viscosidad, por lo que debe de controlarse su fluidez y en casos mejorarlo.

Dentro de los factores que provocan que disminuyan las propiedades dieléctricas de los aislantes líquidos en servicio, la principal, es la humedad que absorbe del ambiente y la formada por la acción del oxígeno de las substancias liberadas por la degradación de los hidrocarburos que continúan el aceite. La solubilidad del agua en el aceite aislante depende de su estructura química, de la temperatura, del grado de envejecimiento y del grado de contaminación.

Los aislamientos sólidos, particularmente los de celulosa, absorben humedad de un aceite húmedo, provocando un envejecimiento más rápido debido a que disminuye su resistencia eléctrica, aumentan las pérdidas dieléctricas que evaporan el agua contenida propiciando las descargas parciales y efecto corona en el seno de los aislamientos.

La humedad provoca, además, en el aceite aislante aumento del potencial ácido y corrosivo sobre metales y materiales celulósicos, ello hace que aumente la descomposición de los aislantes de celulosa y sales metálicas de ácidos metálicos, propiciando que se acelere el envejecimiento del aceite.

2.3 Aislantes gaseosos.

El aislante gaseoso que más se utiliza es el aire; sin embargo existen gases que presentan valores en la rigidez dieléctrica muy superiores a aquel, pero su aplicación es muy limitada.

Los gases para que puedan ser aplicados como aislantes en transformadores, aparatos de maniobra, capacitores, cables, etc. es necesario que cumplan con una serie de requisitos, los cuales son:

- Punto de condensación inferior a 0 C para montajes interiores y -40 C para instalaciones al aire libre.
- Ausencia de efectos corrosivos sobre piezas metálicas y aislantes.
- Incombustibilidad.
- Estabilidad química.
- No ser tóxico para las personas aún bajo el efecto de un arco incidental.
- Poseer buena conductividad térmica.
- No ser costoso.

El uso de los gases precisa el que sea encerrado y aumentada su presión. Con el aumento de presión, la rigidez dieléctrica puede alcanzar valores del orden de los aceites e incluso mayores, con lo que se podría reducir el tamaño de las instalaciones dentro de las altas tensiones. Dentro del recipiente, se debe mantener limpieza máxima del gas y del recipiente mismo y su contenido, puesto que el polvo y fibras sueltas, máxime si hay humedad, reduce la tensión de descarga.

Los gases que cumplen los requisitos anteriores y que pueden usarse son: Cloro (Cl), Bromo (Br) y Flúor (F). Las combinaciones que más se usan son: tetracloruro de carbono (CCl₄), diclorurofluorometano o freón 12 (CCL₂F₂), hexafluoruro de azufre (SF₆), decafluorbutano (C₄F₁₀), perfluorheptano (C₇F₁₆) y perfluormetilciclohexano (C₇F₁₄).

3 Pruebas dieléctricas y calidad de aislamientos.

En el subtema 1, se vieron los efectos dañinos que crean las sobretensiones y sobrecorrientes en los componentes de un sistema eléctrico, así como algunos fenómenos que originan dichos efectos. Para tener una idea más clara de los fenómenos que causan el aumento en el voltaje y la corriente, se da la tabla 1, en la que se exponen las sollicitaciones a las que están sometidos los aislamientos en condiciones de servicio.

Dentro de la alta tensión, el principal problema representa el seleccionar correctamente los aislamientos de los elementos que intervendrán en un sistema eléctrico, dado que en servicio estarán sometidos a una serie de fenómenos que en ocasiones los

harán trabajar en condiciones superiores a la nominal o en condiciones atmosféricas adversas, por lo que el aislamiento se debe elegir bajo un alto coeficiente de seguridad, en el que influye la máxima temperatura ambiente que se ha de esperar, la posible suciedad de las superficies y la aparición, a veces simultánea, de rocío, niebla, lluvia o nieve, así como la formación de hielo. El sistema eléctrico del que formará parte el elemento debe estar dimensionada para resistir las sobretensiones internas como cortocircuitos y sobretensiones por maniobra, además de tener medidas preventivas que tiendan a disminuir la amplitud de dichas sobretensiones cuando se exceda con mucho el valor máximo de la tensión nominal. Se debe tener en el sistema eléctrico protecciones adecuadas que limiten la magnitud de la sobretensión y en el caso de descargas atmosféricas limitar la sobretensión a valores abajo de los que correspondan a la tensión de descarga prevista, en relación con las tensiones internas.

| Clase de sollicitación | Característica temporal de las sollicitaciones | Sollicitaciones con respecto a tierra | | Sollicitaciones para el aislamiento interno de los devanados | |
|---------------------------------|--|--|--|--|--|
| | | Duración | Magnitud | Frecuencia | Magnitud |
| Servicio normal | 60 Hz | Permanente | $U_p + 10 \%$ $= 0,58 (U_0 + 10 \%)$ | Permanente | Insignificante |
| Corto circuito a tierra | 60 Hz 200 hasta aprox. 2000 Hz | Desde algunos segundos (redes, cortos circuitos) hasta algunos minutos (localización de la avería, se incluyen buses; algunos segundos en las instalaciones no protegidas) | $1,7 U_p \sqrt{3} + 10 \%$ hasta $3,4 U_p \sqrt{3}$ | Con intermitencias, cada segundo, o sea, algunos centenares de veces | — hasta $3,4 U_p \sqrt{3}$ ondas de descarga |
| Perturbaciones atmosféricas | Impulsos a intervalos de 0,1 a 0,2 segundos | Una o varias veces, algunas ps hasta aprox. 100 ps | Cuando no hay protecciones adecuadas para la consideración de la amplitud como la de la sobretensión de choque de la línea. Líneas: algunos millares de kV | Entra una y varias veces | Amplitud de la onda de choque de descarga de la estación o en las pararrayos, cuando estos últimos existen |
| | Tentativas continuas por influencias | Varias minutos, cuando no existen descargadores; en caso contrario algunas, ps | Aproximadamente, 100 kV cuando no existen descargadores | | |
| Desconexión de cortos circuitos | De 200 a 1000 Hz, especialmente mayores | Oscilaciones fuertemente amortiguadas; varias veces | 1 a 1,8 U_p , según las interrupciones (I.R., sólo excepcionalmente) con neutro directamente a tierra, mucho menor | Algunas veces en cada fase | 1 a 1,6 $U_p \sqrt{3}$; con neutro directamente a tierra, valores inferiores |
| Desconexión de líneas | De 200 a 1000 Hz | Oscilaciones fuertemente amortiguadas; varias veces | 1,8 a 3,4 U_p , con neutro directamente a tierra | Una, hasta algunas veces en una o en varias fases | Hasta 2,8 $U_p \sqrt{3}$ en caso extremo |

Existencia real a que se hallan sometidos los aislamientos

TABLA 1 Sollicitaciones a que se hayan sometidos los aislamientos en condiciones de servicio.

| Clase de sollicitación | Características temporales de las sollicitaciones | Sollicitaciones con respecto a tierra | | Sollicitación para el aislamiento interno de los devanados | |
|--|---|---|---|--|---|
| | | Duración | Magnitud | Frecuencia | Magnitud |
| Conexión de líneas | De 300 a 3000 Hz | Oscilación fuertemente amortiguada; una vez | Una $2.3 U_p$ con neutro sin puesta a tierra directa | Una vez | $1.06 U_p \sqrt{3}$ |
| Desconexión de transformadores | Impulsos y duración del cuadro de 0,001 segundos | Cada vez en dos fasas; sobretensión de retardo. Cada siempre una sola vez; impulso de frecuencia media | (1,1...) 2.3 a 3 (...4,5) | Cada siempre una sola vez; impulso de frecuencia media | Los impulsos provocan sólo algunas veces perturbaciones en los bobinados o en los cables durante el servicio normal. Ondas de choque, y amplitud hasta de $U_p \sqrt{3}$ aprox. |
| Conexión de transformadores, motores, etc. | De 300 a 3000 Hz | Oscilación fuertemente amortiguada; una vez | Hasta $2 U_p \sqrt{3}$ | Una vez, en todas las fasas, pero con distinta amplitud | $2 U_p \sqrt{3}$ |
| Descargas entre el lado de alta y el de baja tensión | 60 Hz | Algunos segundos, después la debida protección | Hasta la amplitud de la tensión compuesta en alta | Una vez | U_p del lado de alta |
| Influencia condensativa del lado de baja para las sobretensiones a frecuencia industrial | 60 Hz | Según la zona, desde una fracción de segundo (conexión del lado de alta), hasta algunos segundos (corte circuito permanente del mismo lado) | Hasta $1/2 U_p$ de la tensión en alta, hasta la máxima de sobretensiones, aunque varias veces | Sobretensión en el caso de ondas de choque sobre el lado de alta | Entre 6 y U_p , y en el lado de choque en el lado de alta, según las capacidades, casi siempre menores |
| Transmisión de las sobretensiones, desde el lado de alta al de baja, a través de los transformadores | Como en el lado de alta | Como en el lado de alta | Del 10 al 125 % de $\frac{N_1}{N_2}$ \times sobretensión del lado de alta | Como en el lado de alta | Del 10 al 125 % de $\frac{N_1}{N_2}$ \times sobretensión del lado de alta |

U_p = tensión compuesta; U_f = tensión por fase eficaz.

TABLA 1 (Continuación) Sollicitaciones a que se hayan sometidos los aislamientos en condiciones de servicio.

Por lo anterior, todo aparato antes de salir de la fábrica es sometido a una serie de pruebas en las que se simulan las condiciones que se presentarán en servicio. Con dichas pruebas se verifica la aptitud de los aparatos para soportar dichos disturbios (eléctricos, mecánicos y térmicos) y garantizar una seguridad de funcionamiento suficiente para resistir las diversas exigencias que se puedan presentar en su lugar de utilización.

En el presente trabajo, para simplificar, se tomará como base a los transformadores.

Dentro de las diversas pruebas a las que se someten los transformadores, se encuentran las pruebas dieléctricas, las cuales son:

- Prueba de potencial aplicado.
- Prueba de potencial inducido.
- Prueba de factor de potencia de aislamiento.
- Prueba de impulso.

De estas pruebas, la de impulso, se considera prueba opcional o prototipo, ya que el efectuarla representa dificultad, las restantes son pruebas de rutina.

En el caso de transformadores de distribución, la prueba de factor de potencia de aislamiento se considera prototipo u opcional.

El objeto de las pruebas dieléctricas, es verificar los aislamientos y mano de obra, por lo que un aparato para que esté en óptimas condiciones debe pasar dichas pruebas.

Existen otras pruebas que también se practican a los transformadores, se listan abajo:

Pruebas de rutina.

- Medición de resistencia.
- Relación de transformación.
- Polaridad y relación de fases.
- Pérdidas de excitación.
- Corriente de excitación.
- Impedancia y pérdidas de carga.
- Temperatura.
- Precisión (en transformadores de instrumento).

Pruebas opcionales.

- Pérdidas de excitación a tensiones o frecuencias distintas de las nominales.

- Corriente de excitación a tensiones o frecuencias distintas de las nominales.
- Impedancia y pérdidas de carga distintas de la corriente y frecuencia nominal.
- Temperatura en transformadores duplicados o esencialmente duplicados.
- Temperatura en más de una unidad de un mismo lote de igual diseño y manufactura.
- Temperatura a capacidades distintas de las indicadas en la placa de datos.
- Nivel de ruido.
- Nivel de radiointerferencia.
- Cortocircuito.
- Circuito abierto (en TC's).
- Envejecimiento acelerado.

De las pruebas listadas, algunas están enfocadas a verificar la aptitud de los aparatos para cumplir su función, otras se practican a aparatos de modelo (pruebas prototipo) y en otras se verifica alguna característica en particular (pruebas suplementarias).

De las pruebas descritas anteriormente, sólo se hace referencia a las pruebas dieléctricas, en particular tensión aplicada y factor de potencia de aislamiento que se tratan en capítulos posteriores, de las pruebas de impulso y tensión inducida solo se hablará brevemente.

Existen otras dos pruebas dieléctricas que se consideran especiales, dado que no se incluyen en normas de pruebas a transformadores, tales pruebas son las siguientes:

- Descargas parciales.
- Factor de pérdidas.

Estas pruebas se explican en capítulos posteriores, por lo que no se hablará de ellas en el presente subtema.

PRUEBA DE POTENCIAL INDUCIDO.

Esta prueba consiste en inducir en los devanados del transformador una tensión del 200 % de la tensión nominal, con ello, se incrementan los volts por vuelta del transformador, por lo que la frecuencia de la tensión debe ser lo suficiente alta para limitar la densidad de flujo en el núcleo.

La frecuencia mínima para lograr esta condición, está dada por la siguiente fórmula:

$$F = \frac{\text{Tensión inducida a través del devanado}}{\text{1.1 Tensión nominal del devanado}} \times \text{Frecuencia nominal}$$

La duración de la prueba para 120 Hz será de 60 segundos. Para frecuencias arriba de 120 Hz, la severidad de la prueba se incrementa, por lo que la duración será menor. La duración de la prueba, será tal que el número de ciclos aplicados no sea mayor a 7200. En la tabla 2, se da la duración de la prueba dependiendo de la frecuencia.

| Frecuencia Hz | Duración segundos |
|------------------|----------------------|
| 120 | 60 |
| 180 | 40 |
| 240 | 30 |
| 350 | 20 |
| 400 | 10 |

TABLA 2 Duración de la prueba de acuerdo a la frecuencia.
Para frecuencias intermedias, el tiempo se debe interpolar.

El procedimiento de prueba es el siguiente:

La prueba se inicia con un valor igual o menor a la cuarta parte del valor de tensión completa e incrementar gradualmente hasta dicho valor en un periodo no mayor a 15 segundos. Después de haber sostenido la tensión el tiempo especificado (ver tabla 2), se debe reducir gradualmente, en un tiempo no mayor a 5 segundos, hasta un valor igual o menor de la cuarta parte del valor de la tensión completa, después de la cual se puede abrir el circuito.

PRUEBA DE IMPULSO.

Consiste en aplicar varias ondas de tensión con una magnitud que excede con mucho el valor de la clase de aislamiento.

Todos los aparatos deben pasar la prueba de impulso; sin embargo realizar dicha prueba representa dificultad. Con esta prueba, pueden detectarse los defectos que pueden aparecer en el aislamiento interno a consecuencia de la aplicación de la onda de

tensión. Estos defectos, aunque sean de importancia mínima o localizados, pueden ser la causa de defectos más graves que aparezcan posteriormente.

Se usa una onda nominal de $1.2 \times 50 \mu\text{s}$ (tarda $1.2 \mu\text{s}$ en alcanzar su valor máximo y $50 \mu\text{s}$ en descender a la mitad de dicho valor), su forma de onda se muestra en la figura 4.

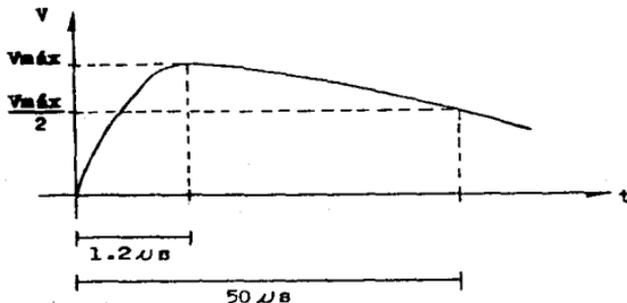


FIGURA 4 Forma de onda nominal de la prueba de impulso.

La polaridad de la onda puede ser positiva o negativa, pero no ambas, excepto en la prueba de frente de onda en la que la polaridad siempre es negativa. Para los transformadores sumergidos en aceite, se recomienda la polaridad negativa y en aparatos tipo seco o llenos de compound, la polaridad positiva. En caso de que las boquillas o porcelanas, en los transformadores sumergidos en aceite, no resistan la tensión de prueba de polaridad negativa, se usa la polaridad positiva.

Las pruebas de impulso se hacen solamente cuando se solicite y con el aparato sin excitación. El orden de las pruebas es el siguiente:

Una onda de tensión reducida, dos ondas cortadas y una onda completa.

Además, cuando se especifican pruebas de frente de onda, las pruebas de impulso se aplican en el siguiente orden:

Una de tensión reducida, dos frentes de onda, dos ondas cortadas y una onda completa.

El orden de las pruebas de onda cortada y de frente de onda no es obligatorio. Adicionalmente se puede aplicar otra onda de tensión reducida después de los dos frentes de onda.

Prueba de onda completa a tensión reducida.

Se aplica una onda de tensión con un valor de cresta entre el 50 y 70 % del valor de onda completa. El valor de onda completa se da en la tablas 3, 4, 5 y 6 según el el tipo de transformador.

Prueba de onda cortada.

La onda de tensión se corta mediante un explosor. El valor de cresta y tiempo de arqueo se dan en las tablas 3, 4, 5 y 6 según el tipo de transformador.

Prueba de frente de onda.

La onda de tensión, se corta en la parte ascendente antes de alcanzar el valor de cresta, esto mediante un explosor. Los valores de cresta y tiempos para arquear se dan en las tablas 3, 4, 5 y 6 según el tipo de transformador.

Prueba de onda completa.

La onda de tensión, debe tener un valor de cresta dado por las tablas 3, 4, 5 y 6 según el tipo de transformador. No se debe producir arqueo en las boquillas o porcelana; para evitar los arcos en condiciones adversas de ambiente, se debe aumentar la distancia de arqueo.

El tiempo transcurrido entre la aplicación de la última onda cortada y la onda completa final, debe ser el mínimo posible, esto con el fin de evitar la recuperación de la rigidez del aislamiento en caso de haber fallado durante el impulso anterior.

TABLA 3 Clase de aislamiento y nivel de tensión para pruebas de impulso en transformadores de instrumento.

| CLASE DE AISLAMIENTO | PRUEBA DE IMPULSO ONDA COMPLETA kV CRESTA | ONDA CORTADA kV CRESTA | TIEMPO MINIMO DE PLANEO EN μ S |
|----------------------|---|------------------------|------------------------------------|
| 0.6 | 10 | 12 | |
| 1.2 | 30 | 36 | 1 |
| 2.5 | 45 | 54 | 1.5 |
| 5.0 | 60 | 69 | 1.5 |
| 8.7 | 75 | 88 | 1.6 |
| 15 | 95 | 110 | 1.8 |
| 15 | 110 | 130 | 2 |
| 18 | 125 | 145 | 2.25 |
| 25 | 150 | 175 | 3 |
| 34.5 | 200 | 230 | 3 |
| 46 | 250 | 290 | 3 |
| 69 | 350 | 400 | 3 |
| 92 | 450 | 520 | 3 |
| 115 | 550 | 630 | 3 |
| 138 | 650 | 750 | 3 |
| 161 | 750 | 865 | 3 |
| 180 | 825 | 950 | 3 |
| 196 | 900 | 1035 | 3 |
| 215 | 975 | 1120 | 3 |
| 230 | 1050 | 1210 | 3 |
| 260 | 1175 | 1350 | 3 |

TABLA 3 (Continuación) Clase de aislamiento y nivel de tensión para pruebas de impulso en transformadores de instrumento.

| CLASE DE AISLAMIENTO | PRUEBA DE IMPULSO ONDA COMPLETA kV CRESTA | ONDA CORTADA kV CRESTA | TIEMPO MINIMO DE FLAMEO EN US |
|----------------------|---|------------------------|-------------------------------|
| 287 | 1300 | 1500 | 3 |
| 315 | 1425 | 1640 | 3 |
| 345 | 1550 | 1780 | 3 |
| 375 | 1675 | 1925 | 3 |
| 400 | 1800 | 2070 | 3 |
| 430 | 1925 | 2220 | 3 |
| 460 | 2050 | 2360 | 3 |
| 490 | 2175 | 2500 | 3 |
| 520 | 2300 | 2650 | 3 |
| 545 | 2425 | 2800 | 3 |

| CLASE DE AISLAMIENTO | NIVEL BASICO DE IMPULSO (NBI), Y ONDA COMPLETA | ONDA CORTADA | |
|----------------------|--|--------------|------------------------------------|
| kV | kV CRESTA | kV CRESTA | TIEMPO MINIMO DE ARQUEO EN μ S |
| 1.2 | 30 | 36 | 1.0 |
| 2.5 | 45 | 54 | 1.5 |
| 5.0 | 60 | 69 | 1.5 |
| 8.7 | 75 | 88 | 1.6 |
| 15.0 | 95 | 110 | 1.8 |
| 25.0 | 150 | 175 | 3.0 |
| 34.5 | 200 | 230 | 3.0 |
| 46.0 | 250 | 290 | 3.0 |
| 69.0 | 350 | 400 | 3.0 |

TABLA 4 Clase de aislamiento y nivel de tensión para pruebas de impulso en transformadores de distribución sumergidos en líquido aislante (normas CCOMNIE A).

| CLASE DE AISLAMIENTO | NIVEL BASICO DE IMPULSO (NBI), Y ONDA COMPLETA | ONDA CORTADA | |
|----------------------|--|--------------|------------------------------------|
| kV | kV CRESTA | kV CRESTA | TIEMPO MINIMO DE ARQUEO EN μ S |
| 1.2 | 10 | 10 | 1.00 |
| 2.5 | 20 | 20 | 1.00 |
| 5.0 | 25 | 25 | 1.00 |
| 8.7 | 35 | 35 | 1.00 |
| 15.0 | 50 | 50 | 1.25 |

TABLA 5 Clase de aislamiento y nivel de tensión para pruebas de impulso en transformadores de distribución tipo seco (normas CCOMNIE A).

| CLASE DE AISLAMIENTO | NIVEL BASICO DE AISLAMIENTO AL IMPULSO (NBI) Y ONDA COMPLETA | ONDA CORTADA | |
|----------------------|--|--------------|-------------------------------|
| | | kV CRESTA | TIEMPO MINIMO DE ARQUEO EN US |
| 1.2 | 45 | 54 | 1.5 |
| 2.5 | 60 | 69 | 1.5 |
| 5.0 | 75 | 88 | 1.6 |
| 8.7 | 95 | 110 | 1.8 |
| 15 | 110 | 130 | 2.0 |
| 18 | 125 | 145 | 2.25 |
| 25 | 150 | 175 | 3.0 |
| 34.5 | 200 | 230 | 3.0 |
| 46 | 250 | 290 | 3.0 |
| 69 | 350 | 400 | 3.0 |
| 92 | 450 | 520 | 3.0 |
| 115 | 550 | 630 | 3.0 |
| 138 | 650 | 750 | 3.0 |
| 161 | 750 | 865 | 3.0 |
| 196 | 900 | 1035 | 3.0 |
| 215 | 975 | 1120 | 3.0 |
| 230 | 1050 | 1210 | 3.0 |
| 315 | 1425 | 1640 | 3.0 |
| 345 | 1550 | 1780 | 3.0 |
| 375 | 1675 | 1925 | 3.0 |
| 400 | 1800 | 2070 | 3.0 |

TABLA 6 Clase de aislamiento y nivel de tensión para pruebas de impulso en transformadores de potencia suergidos en aceite (normas CCONMIE k).

Las indicaciones de falla son las siguientes:

a) Oscilogramas de tensión.

Indica falla, cualquier diferencia en la forma de onda de la onda de tensión reducida y la onda de tensión completa final, la falla se detecta sobreponiendo los dos oscilogramas de tensión. La diferencia pudo haberla provocado los dispositivos de protección o las condiciones del circuito de prueba, en este caso debe aplicarse nuevamente una onda reducida y una onda completa.

b) Humo y burbujas.

Indican falla las burbujas de humo que suben a través del aceite en el transformador. Las burbujas claras pueden no indicar falla, dado que pueden ser originadas por el aire ocluido, en este caso se debe investigar repitiendo la prueba o reprocesando el transformador y repetir la prueba para saber si efectivamente hubo falla.

c) Ausencia de arqueo en el explosor.

Si en la prueba de onda cortada no ocurrió arqueo en el explosor o cualquier otra parte, aún mostrando el oscilograma una onda cortada, indica que el arqueo ocurrió dentro del transformador.

d) Ruidos perceptibles.

Ruidos perceptibles dentro del transformador cuando se aplica el impulso puede indicar falla. Los ruidos deben investigarse.

e) Oscilogramas de corriente a tierra.

Representa un método de detección de fallas, en el la corriente de impulso en la terminal a tierra del devanado en prueba se mide mediante un oscilógrafo de rayos catódicos. Las diferencias que se detecten entre los oscilogramas de la onda de tensión reducida y la de tensión completa al sobreponerlas, puede indicar falla o pueden haber sido provocadas por causas no perjudiciales. Se pueden investigar las diferencias con otra prueba de onda completa.

Entre las causas de las diferencias que no representan falla se encuentran las siguientes:

- Operación de dispositivos de protección.
- Saturación del núcleo.
- Ciertas condiciones del circuito de prueba.

El método no se aplica cuando se efectúan las pruebas de onda cortada.

CAPITULO II

DESCARGAS PARCIALES

1 Las descargas parciales.

1.1 Importancia de las descargas parciales.

La técnica de descargas parciales es una herramienta muy importante para verificar la calidad de los aislamientos y constituye una técnica de prueba no destructiva, al igual que otras técnicas que se verán más adelante: tensión aplicada, factor de pérdidas y factor de potencia.

Con la técnica de las descargas parciales se obtiene valiosa información sobre defectos incipientes que puedan presentar los aislamientos que forman parte del equipo eléctrico, en que estado se encuentran y por otro lado se obtiene información oportuna sobre las condiciones de operación del equipo.

Desde hace ya medio siglo se conocen las descargas parciales como causa de deterioro de los aislamientos. El deterioro era muy lento, ya que el diseño y construcción de los aparatos hacia que muy raramente se presentaran estas descargas, los aparatos trabajaban a esfuerzos muy débiles. En caso de que se presentaran descargas de peligro, éstas aparecían con una magnitud tan fuerte que se podían detectar ya sea con el oído o por la medición del factor de pérdidas (tan δ , ver capítulo IV). Con el desarrollo de los aislamientos, aparecieron materias coladas o extruidas que crearon problemas de homogeneidad.

El constante desarrollo tecnológico de los materiales aislantes y sus consecuentes problemas de homogeneidad, el desarrollo de equipos que forman parte de los sistemas eléctricos, así como el empleo de tensiones cada día mayores ha creado la necesidad de utilizar nuevas pruebas para detectar oportunamente la presencia de defectos en los materiales aislantes y evitar así daños mayores que contribuyan a incrementar los costos de fabricación y

operación. Este desarrollo se refleja en la producción de transformadores de menor tamaño y menor cantidad de aislamiento, además del correspondiente menor costo, pero deben soportar altas tensiones. Se busca poder emplear al máximo las posibilidades dieléctricas del material, es decir, aumentar la calidad del conjunto y contribuir al aumento de potencia útil por unidad de volumen en todo el elemento.

1.2 Clasificación de las descargas parciales.

La no homogeneidad de un dieléctrico, se presenta como pequeños huecos o cavidades que pueden tener diferentes formas, pueden ser en forma de paralelepípedo, esféricas, elípticas, etc., esto se muestra en la figura 1. Dentro de las cavidades es donde ocurren las descargas parciales.

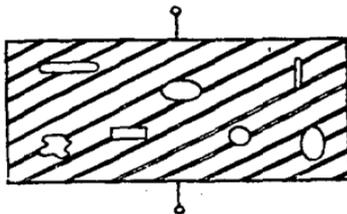
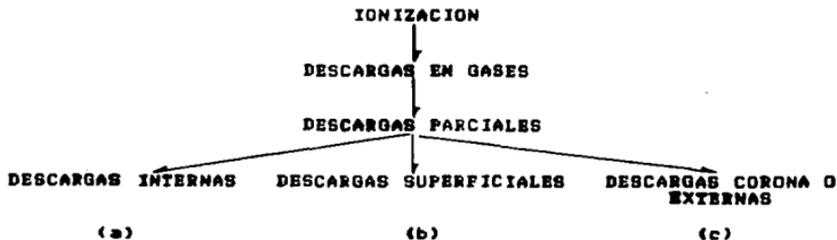


FIGURA 1 Diversidad de cavidades en un material aislante.

La descarga parcial es cualquier descarga eléctrica que ocurre en un medio aislante, restringido solamente a una parte del dieléctrico sometido a tensión y que puentea parcialmente el aislamiento entre electrodos. Estas pueden resultar de la ionización de cavidades dentro de los aislamientos sólidos o de burbujas gaseosas en aislamientos líquidos y por sobreesfuerzos de campo eléctrico en los aislamientos sólidos, líquidos y gaseosos, o a lo largo de la superficie.

La ionización no es más que el proceso por el cual un átomo se carga eléctricamente por la pérdida o ganancia de uno o más electrones.

Las descargas parciales se dividen en tres tipos, su clasificación se muestra a continuación:



a) Descargas internas.

Son las descargas que tienen lugar en inclusiones o cavidades gaseosas en un medio dieléctrico, éste pudiendo ser aceite aislante, papel, madera, polipropileno, polietileno, etc.. Las descargas se presentan por la no homogeneidad del medio aislante, y en este tipo de medio existe desuniformidad en la constante dieléctrica; la constante dieléctrica en una cavidad es diferente de la del medio aislante. La distribución del campo eléctrico en corriente alterna, es inversamente proporcional a las constantes dieléctricas, lo que ocasiona que el material de menor cavidad, es decir, la cavidad gaseosa se encuentra sometida a una mayor intensidad de campo eléctrico.

El tipo de descarga se muestra en la figura 2.



FIGURA 2 Descarga parcial interna.

b) Descargas superficiales.

Son las descargas que aparecen en la superficie de un medio aislante. Esto se muestra en la figura 3.



FIGURA 3 Descarga superficial.

c) Descargas corona o externas.

Son las descargas que ocurren alrededor de un punto o arista de un conductor o electrodo cuando el gradiente de potencial excede la rigidez dieléctrica del aire. Este tipo de descarga, por lo general, se presenta en líneas aéreas y equipos de alta tensión cuando se ioniza el aire por la existencia de concentraciones de campo eléctrico, originando pérdidas e interferencias, por esto se utilizan electrodos de alta tensión.

A este tipo de descarga se le llama precisamente corona, por que tiene similitud entre una corona de rey y la región ionizada alrededor de la punta del electrodo.

El tipo de descarga se muestra en la figura 4.



FIGURA 4 Descargas corona o externas.

El término corona, se aplica exclusivamente a las descargas parciales en los gases en torno a conductores o electrodos aislados y alejados de aislantes sólidos.

Las descargas parciales involucran procesos de conversión de energía, tales como emisión de luz, ruido, ondas electromagnéticas o formación de reacciones químicas que provocan descomposición de moléculas por el bombardeo de iones o electrones, calentamientos locales, erosión superficial, etc.. Estos procesos son utilizados como medio de detección de las descargas parciales.

1.3 Métodos de detección de descargas parciales.

Los procesos producidos por la descarga parcial han hecho que existan diversos métodos de detección de la misma. Estos métodos se clasifican en dos grandes grupos:

- Métodos de detección no eléctricos.
- Métodos de detección eléctricos.

A continuación se indican los métodos que corresponden a cada grupo.

1.3.1 Métodos de detección no eléctricos.

Casi no se usan, ya que en muchos casos son poco sensitivos. Dentro de estos métodos se encuentran los siguientes:

Detección acústica.

Se emplea en descargas superficiales, corona e internas y la observación se realiza en el lugar de prueba, con un nivel de ruido bajo.

Se usan para la detección micrófonos, oído, oscilógrafo y transductores piezoeléctricos. La sensibilidad está entre 5 y 50 pC.

Detección visual u óptica (por luz).

Se emplea para descargas superficiales e internas en dieléctricos traslúcidos. La detección se lleva a cabo en lugar obscuro y se emplea para ello la vista, registradores fotográficos (con tiempo de exposición no muy grande) y fotomultiplicadores.

En descargas superficiales, se puede obtener hasta 1 μC de sensibilidad y para las internas una sensibilidad del orden de 50 μC .

Detección por calor.

Solo pueden detectarse descargas internas importantes que ya hayan deteriorado el dieléctrico.

Tiene una sensibilidad muy pobre y la detección se puede realizar tocando con la mano el objeto probado o bien por métodos termoelectrónicos.

Detección por presión de gas.

Se emplea solo en descargas internas y en espacios de aire accesibles, se usan manómetros y no se conoce su sensibilidad.

Detección por transformaciones químicas.

Se emplea en descargas internas, en objetos que puedan ser desolidos, o en descargas superficiales. La detección se hace por medio visual o química, no tiene sensibilidad.

1.3.2 Métodos de detección eléctricos.

Los métodos eléctricos son los que más se emplean en la detección y medición de las descargas parciales, ya que tienen una gran sensibilidad, dentro de ellos se encuentran: el método eléctrico y el método por radiación electromagnética.

Método eléctrico.

Es el método en el cual se emplean pulsos eléctricos, producto de las descargas para su cuantificación. Con este método se pueden detectar pulsos muy pequeños debido a la alta sensibilidad que

provoca en mismo método.

Existen varios circuitos de medición para detectar los pulsos, los que se verán más adelante.

Método por radiación electromagnética.

Este método tiene aplicación básicamente en la medición de descargas externas o corona, que son básicamente en aire.

1.4 Principio de la descarga parcial.

Para tener un conocimiento explícito de la formación de las descargas parciales, es necesario, por simplicidad, estudiar el caso de objetos netamente capacitivos, en forma esquemática representado como un capacitor de placas planas paralelas con un dieléctrico entre ellas. Previo a la explicación, es necesario conocer la configuración capacitiva del dieléctrico.

En la figura 5a, se muestra el dieléctrico con una sola cavidad, representada ésta por el capacitor C_1 , las capacitancias C_2 formadas por la columna de sección común a la cavidad y las capacitancias C_3 formadas a los lados de la columna en que se encuentra la cavidad. Se observa en la figura que las capacitancias C_2 y C_3 están en serie y paralelo respectivamente. En la figura 5b, se muestra el diagrama eléctrico con las capacitancias equivalentes de la representación capacitiva del dieléctrico.

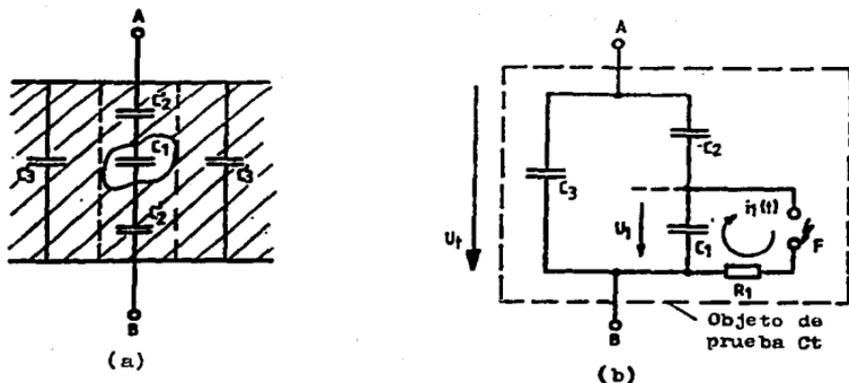


FIGURA 5 (a) Representación por dentro de un dieléctrico.
(b) Diagrama del circuito equivalente.

Para pequeñas cavidades se tiene:

$$C_t = C_3 \gg C_1 \gg C_2 \quad (1)$$

Se considera el caso de descargas parciales originadas por ionización en la cavidad.

Al aplicar una tensión alterna U_t al dieléctrico, la tensión a través de la cavidad sería idealmente U_1 , siempre que el dieléctrico soporte esa tensión; sin embargo, ocurre una descarga a una tensión U_+ , puesto que la intensidad de campo eléctrico en la cavidad excede su valor crítico correspondiente y la descarga eléctrica puentea la cavidad. Se supone que la descarga toma lugar en el instante en que el voltaje aplicado tiene su valor de cresta máximo. La descarga cae muy rápidamente (en un tiempo menor a $1E-07$ segundos) a V_+ . Después de que la descarga se extingue en la cavidad, la tensión en ésta vuelve a aumentar a partir de V_+ y al alcanzar el valor de U_+ ocurrirá una nueva descarga. El fenómeno se repite varias veces hasta que la tensión aplicada U_t sobre el dieléctrico disminuya y la tensión

U1 desplazada a V+ ya no adquiriera el valor de ruptura del dieléctrico. Si el voltaje aplicado es suficientemente elevado, las descargas ocurrirán en cada ciclo. Dicho fenómeno se repite en la parte negativa de la onda en el instante en que U1 llega al valor de U-. Así se obtienen grupos de descargas regularmente recurrentes, los que se forman alrededor de los pasos de la tensión por cero. Esto se muestra en la figura 6.

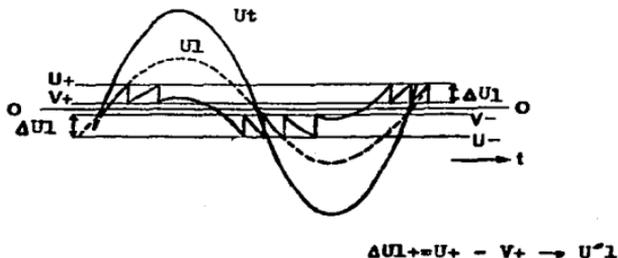


FIGURA 6 Proceso de la descarga parcial.

Se deduce de esta exposición, que las tensiones U+ y V+ (U- y U- en la parte negativa de la onda) son respectivamente las tensiones de aparición y extinción de descarga. En la realidad, estas tensiones son bastante diferentes.

La descarga en la cavidad provoca una corriente $i(t)$ local (ver figura 5b), llamada corriente de descarga, que no puede ser medida. Esta corriente provoca en la cavidad una caída de tensión $\Delta U1$ que libera una carga $\Delta q1$:

$$\Delta q1 = \Delta U1 C1 \quad (2)$$

La descarga provoca también una transferencia de carga hacia los capacitores C2 y C3 del diagrama del circuito equivalente. La carga puesta en juego es:

$$q1 = \Delta U1 (C1+C2) \quad (3)$$

La magnitud de $\Delta U1$ puede determinarse comparando la carga almacenada antes y después del proceso de descarga:

$$A_{Ut} = \frac{C_2}{C_2 + C_3} \quad A_{U1} = \frac{C_2}{(C_2 + C_3) C_1} \quad A_{q1} \quad (4)$$

En la práctica se ha encontrado que para C_2 Y C_3 , los valores para A_{Ut} están en el rango de mV a V , mientras que la magnitud A_{U1} está en el rango de kV , además, la caída de voltaje A_{Ut} no puede ser relacionado con las cantidades A_{U1} y A_{q1} en la cavidad, puesto que normalmente las capacitancias C_1 Y C_2 son desconocidas.

En la realidad, el fenómeno de las descargas parciales es mucho más complejo, debido a la deformación del campo eléctrico en la descarga, la multiplicidad de las cavidades y la interacción de sus diversos esfuerzos, además, las tensiones de aparición y extinción son bastantes diferentes, pero lo antes expuesto nos da idea del proceso de las descargas parciales.

Se consideró el caso de las descargas parciales originadas por ionización en una cavidad dentro de un dieléctrico, para entender el proceso; sin embargo, la explicación es aplicable a todos los casos como son: protuberancias metálicas o inclusiones en el dieléctrico.

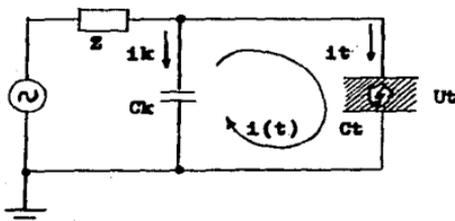
1.3 Circuito básico de prueba.

El circuito básico, está formado por el dieléctrico C_t (ver figura 5b) en paralelo con un capacitor de acoplamiento C_k y una fuente de voltaje, ver figura 7a. Con este circuito, la corriente provocada por la descarga hace que circule una corriente $i(t)$ en la malla formada por las dos capacitancias, esta corriente si es medible y hace que la caída de voltaje A_{Ut} se compense.

La corriente $i(t)$ ocurre en cada descarga, tan solo en una fracción del periodo de la señal de voltaje U_t aplicado al dieléctrico, ocurren infinidad de descargas que se observan en forma de pequeños pulsos. Como el proceso de las descargas es un proceso de alta frecuencia, la fuente de voltaje se desacopla del resto del circuito mediante una impedancia Z , así se evita que las descargas provenientes del objeto de prueba no afecten a la fuente de voltaje, a su vez, la impedancia protege al resto del circuito de las corrientes de interferencias de alta frecuencia que puedan provenir de la fuente de voltaje.

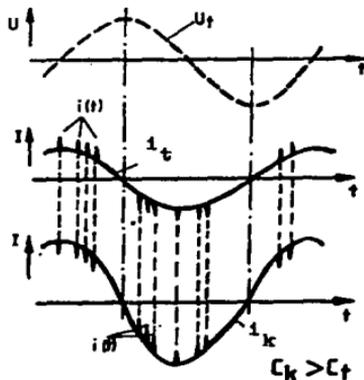
La misma figura 7a, señala que en el evento de la descarga no solo fluye $i(t)$, fluyen también dos corrientes de desplazamiento; i_t e i_k , que se defasan cerca de 90 grados respecto al voltaje

sinusoidal de prueba U_t . En la figura 7b, se muestran las corrientes de frecuencia industrial (i_t e i_k) y los pulsos de corriente de descarga parcial, ocurridos durante un ciclo de la señal de voltaje de prueba, se observa también que los pulsos de descarga en los capacitores C_k y C_t tienen diferentes polaridades, pero sus amplitudes son idénticas.



$i(t)$ — pulsos de descarga parcial
 i_k, i_t — corrientes de desplazamiento

(a)



(b)

FIGURA 7 Circuito de prueba de descargas parciales y características de desplazamiento y pulsos de corriente de descarga parcial.

La fuerte variación de los pulsos no sigue un principio teórico y ocurrirán más o menos descargas, dependiendo de la magnitud de la tensión de prueba U_t y características de la localización de la falla. Las descargas parciales pueden seguir intervalos de unos pocos μs o aún más pequeños. En general, la más alta concentración de descargas ocurre durante la mayor variación de la tensión de prueba:

$$dU_t/dt \quad (5)$$

así, la polaridad de los pulsos no depende de la polaridad de la tensión de prueba U_t , sino de la variación respecto al tiempo

(ecuación 4).

1.6 Carga y energía de descarga.

La magnitud de la corriente circular $i(t)$, producida durante la descarga, depende de la relación de capacitancias C_k/C_t del circuito básico de prueba, puesto que la carga es trasladada desde el capacitor C_k para compensar la caída de voltaje ΔU . En el caso ideal ($C_k \gg C_t$), la carga transportada por $i(t)$ es la mayor:

$$q = \int i(t) dt = \left[C_3 + \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \right] \Delta U_t \quad (6)$$

De las ecuaciones (1) y (4), (6) toma la forma:

$$q = (C_3 + C_2) \Delta U_t = C_2 \Delta U_1 = \frac{C_2}{C_1} \Delta q_1 \quad (6.1)$$

donde $C_3 + C_2 \sim C_t$

A la carga q se le conoce como carga aparente y solo puede relacionarse con Δq_1 a través de la relación de capacitancias C_2/C_1 .

En la realidad, la relación $C_k \gg C_t$ nunca se satisface, pues un capacitor muy grande se carga muy lentamente y no es económicamente justificado; sin embargo, un capacitor ligeramente mayor a la capacitancia C_t del objeto de prueba resulta en una reducción de la sensibilidad y la corriente de compensación $i(t)$ resulta pequeña. Del proceso de la transferencia de carga entre los capacitores C_t y C_k , se obtiene la relación:

$$q = C_t \Delta U_t = (C_t + C_k) \Delta U'_t \quad (6.2)$$

donde $\Delta U'_t$ representa la caída de voltaje residual después de la transferencia de carga. La carga liberada por el capacitor de acoplamiento puede medirse y se le conoce como carga medible q_m .

$$q_m = C_k \Delta U'_t \quad (7)$$

La relación entre la carga aparente (ecuación 6) y la carga transferida q_1 (ecuación 3), se representa mediante la siguiente relación:

$$q_1 = q (1 + C_1/C_2) \quad (8)$$

La relación de la carga medible a la carga aparente puede definirse como:

$$q_m/q = C_k/(C_t + C_k) \quad (9)$$

El valor de la ecuación (6.2), es una cantidad importante en la sensibilidad de la medición en pruebas de descargas parciales. Dependiendo de la capacitancia C_t del objeto de prueba, se puede instalar un capacitor suficientemente grande. La sensibilidad que pueda alcanzarse con el factor q_m/q puede fácilmente verificarse en la calibración del circuito de prueba.

La figura 8, muestra el significado de la ecuación (9).

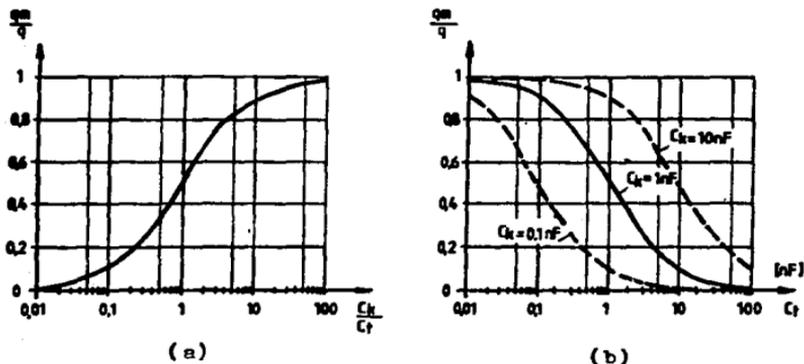


FIGURA 8 Influencia del capacitor de acoplamiento en la sensibilidad de la medición q_m/q . (a) Dependencia de la relación C_k/C_t . (b) Dependencia en los valores típicos de C_k .

Se mencionó ya que en el momento de la descarga se forma una caída de voltaje ΔU_1 en la cavidad del dieléctrico de prueba, si se considera que toda la cavidad se está descargando, entonces:

$$\Delta U_1 \text{ ----- } U'1$$

El voltaje de la cavidad se relaciona con el voltaje de inicio de descarga mediante la relación:

$$U'1 = U \frac{C2}{C2 + C1} \quad (10)$$

donde U representa en voltaje de inicio de descarga; U+ para el ciclo positivo de la señal ideal de voltaje U1 de la cavidad, y U- para el ciclo negativo.

De las ecuaciones (8) y (10), la energía de la descarga es:

$$W = \frac{1}{2} q1 U'1 = \frac{1}{2} q U \quad (11)$$

Normalmente U se expresa en valor eficaz, por lo que el término derecho de la ecuación (11) se afecta por $\sqrt{2}$, es decir:

$$W = \sqrt{2} \frac{1}{2} q U = \frac{1}{\sqrt{2}} q U \quad (11.1)$$

1.7 Definición de cantidades relacionadas con las descargas parciales.

Se han manejado ya conceptos y cantidades que involucran las descargas parciales, para tener una idea más clara de ellas se dan a continuación las definiciones de esos conceptos y cantidades, además de otras más.

Carga aparente q.

Es aquella carga que inyectada instantáneamente entre las terminales del objeto bajo prueba, puede cambiar momentáneamente el voltaje entre las terminales en la misma cantidad que lo haría la descarga parcial misma. Sus unidades se refieren en pC.

Frecuencia de repetición n.

Es el número promedio de pulsos de descarga parcial por segundo.

Energía W de una descarga parcial individual.

Es la energía disipada durante una descarga individual, se expresa en Joules.

Cantidades integradas.

Se dan ahora las cantidades integradas que consideran a las cantidades q y n ya definidas, además de un intervalo de tiempo T , que puede ser mayor a la duración de un ciclo de la señal de tensión aplicada al objeto de prueba.

i) Corriente promedio de descarga I .

Es la suma de los valores absolutos de las cantidades de carga, que pasan a través de las terminales del objeto de prueba, debido a las descargas parciales durante un cierto intervalo de tiempo T , dividido entre T .

$$I = \frac{1}{T} [|q_1| + |q_2| + \dots + |q_i|] \quad (12)$$

si todas las descargas tienen igual magnitud, la ecuación (12) se simplifica:

$$I = n |q| \quad (12.1)$$

El promedio de descarga se expresa en coulomb/seg. (ampere).

ii) Promedio cuadrático D .

Es la suma de los cuadrados de las cargas que pasan a través de las terminales del objeto de prueba, debido a las descargas parciales durante un cierto intervalo de tiempo T , dividido entre T .

$$D = \frac{1}{T} [q_1^2 + q_2^2 + \dots + q_i^2] \quad (13)$$

si todas las cargas tienen igual magnitud, entonces:

$$D = n q^2 \quad (13.1)$$

El promedio cuadrático se expresa en (coulomb)²/segundo.

iii) Potencia de descarga P.

Es la potencia promedio entregada a las terminales del objeto bajo prueba, debido a las descargas parciales durante un cierto intervalo de tiempo T.

$$P = \frac{1}{T} [q_1 U''t_1 + q_2 U''t_2 + \dots + q_i U''t_i] \quad (14)$$

donde $U''t$ es la caída de voltaje $\Delta U t$ que se crea en el objeto de prueba por la transferencia de carga hacia las capacitancias C2 y C3 provocada por la descarga, entonces $U''t_1, U''t_2, \dots, U''t_i$ son los valores instantáneos de voltaje que cruzan el objeto de prueba en los instantes de las descargas q_1, q_2, \dots, q_i .

La potencia promedio se expresa en watts.

iv) Valores de voltaje relacionados con las descargas parciales.

Usualmente, durante pruebas de descargas parciales los valores de voltaje se dan en valor eficaz; es decir, su valor pico dividido por $\sqrt{2}$.

a) Voltaje de encendido U de descargas parcial.

Es la tensión eficaz más baja a la cual las descargas parciales exceden una magnitud especificada, cuando la tensión aplicada al objeto de prueba se incrementa gradualmente.

b) Voltaje de extinción V de descarga parcial.

Es la tensión eficaz a la cual se extinguen las descargas parciales que exceden una magnitud especificada, cuando la tensión se disminuye gradualmente desde un valor que excede el voltaje de encendido.

1.8 Circuito de medición de descargas parciales.

1.8.1 Impedancias de medición básicas.

Para poder detectar las descargas parciales, es necesario contar con una impedancia de medición Z_m en el circuito básico, para así poder registrar la diferencia de potencial creada en ella por la descarga. La impedancia Z_m puede conectarse tanto en serie con el objeto de prueba C_t como en serie con el capacitor de acoplamiento C_k , su función consiste en bloquear la corriente de frecuencia industrial y constituir una trayectoria preferente para la corriente transitoria asociada en la descarga parcial.

La señal de descarga se recoge en la impedancia Z_m y se lleva a un medidor de descargas parciales mediante cable coaxial.

Básicamente, existen dos tipos de impedancia de medición, que son los siguientes:

- Impedancia resistiva.
- Impedancia inductiva.

1.8.1.1 Impedancia resistiva.

La impedancia resistiva se encuentra en paralelo con una capacitancia parásita C_s , que puede ser del cable coaxial de medición o del tap capacitivo de la boquilla del transformador, cuando se hacen mediciones en transformadores de potencia al realizar la medición por el método de tap capacitivo, el tipo de impedancia se muestra en la figura 9 siguiente:

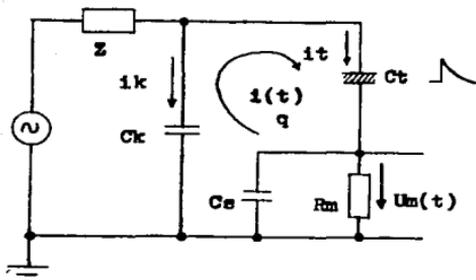


FIGURA 9 Impedancia de medición tipo resistiva.

El voltaje $U_m(t)$ que aparece en la impedancia de medición, tiene forma exponencial que decae con la constante de tiempo T .

$$U_m(t) = \frac{q}{C_s + C_t (1 + C_s/C_k)} \exp(-t/T) \quad (15)$$

donde $T = R_m \left(C_s + \frac{C_t C_k}{C_t + C_k} \right)$

Se observa de la ecuación 15, que si $C_s > C_k$ y $C_s > C_t$ la sensibilidad en la medición disminuye, esto puede deberse a dos razones:

- a) Por cables coaxiales muy largos entre las terminales del capacitor de acoplamiento y la impedancia de medición. Por esta razón, dicho capacitor se coloca cerca de los instrumentos de medición.
- b) Cuando se usa el método de tap capacitivo para transformadores de potencia, así, para medir descargas en éstos transformadores se requiere que $C_k > C_s$.

La respuesta en tiempo y frecuencia se muestra en la figura 10.

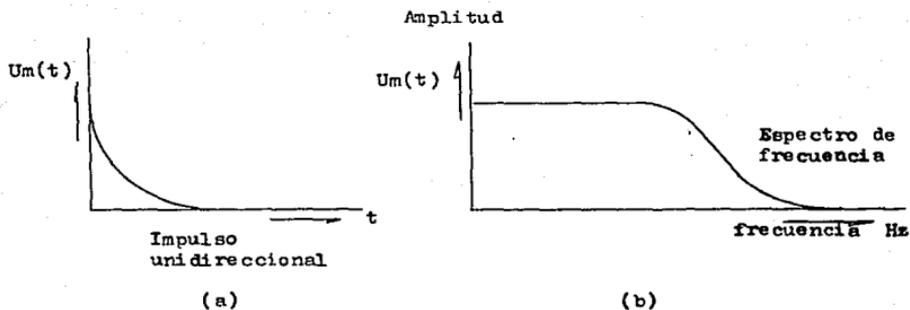


FIGURA 10 Respuestas de la impedancia resistiva.
 (a) Respuesta en tiempo. (b) Respuesta en frecuencia.

1.8.1.2 Impedancia inductiva.

Este tipo de impedancia es del tipo RLC, que contiene la capacitancia parásita en paralelo con dicha impedancia, esto se muestra en la figura 11.

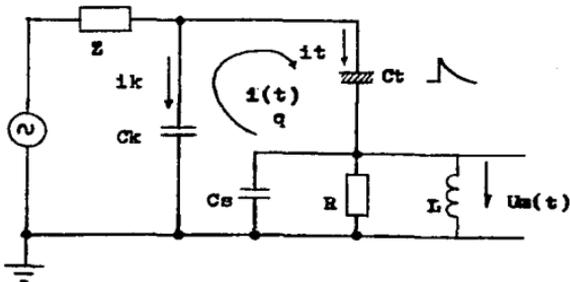


FIGURA 11 Impedancia de medición tipo inductiva.

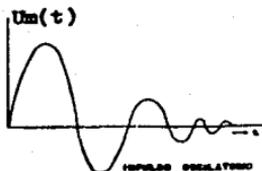
Este tipo de impedancia es un circuito oscilatorio RLC, en el que el pulso resulta ser una oscilación atenuada, con el mismo voltaje de cresta que en el resistivo.

La respuesta $U_m(t)$ se expresa mediante la siguiente ecuación:

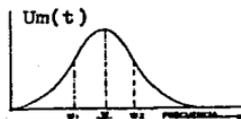
$$U_m(t) = \frac{q}{C_t (1 + C_s/C_k) + C_s} \exp \left[-t/2R \left(C_s + \frac{C_t C_k}{C_t + C_k} \right) \right] \cos \omega t \quad (16)$$

donde $\omega l = \sqrt{\frac{1}{L \left[C_s + \frac{C_t C_k}{C_t + C_k} \right]} - \frac{1}{4R^2 \left[C_s + \frac{C_t C_k}{C_t + C_k} \right]^2}}$

La figura 12, muestra las respuestas en tiempo y frecuencia de la impedancia inductiva.



(a)



(b)

FIGURA 12 Respuestas de la impedancia inductiva.
 (a) Respuesta en tiempo. (b) Respuesta en frecuencia.

Con esta impedancia se obtiene mejor sensibilidad; sin embargo, se presenta ruido externo al realizar mediciones, pero este problema se elimina con filtros, transformadores de aislamiento, otros accesorios y arreglos especiales, así también hacer las pruebas en una cámara faradizada.

1.8.2 Circuitos detectores de descargas parciales.

El circuito detector consiste básicamente de impedancia de medición Z_m , medio de transmisión de la señal de descarga (cable coaxial) y medidor de descargas parciales, la función de este último consiste en convertir la señal de voltaje de la impedancia Z_m a una lectura o registro proporcional a la carga aparente. Esta unidad compuesta de detección, al igual que la impedancia de medición, se puede conectar de dos maneras en el circuito de prueba, además de una variante de ambas. Las diferentes formas en que se puede colocar la unidad compuesta de detección se divide en dos tipos, lo que hace que se tengan dos tipos de detectores:

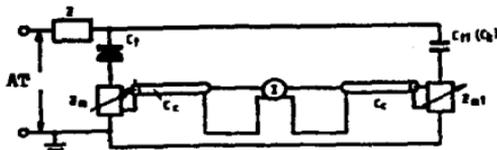
- Detector no balanceado.
- Detector balanceado.

externos.

Las capacitancias de las impedancias no necesariamente deben ser iguales, pero preferiblemente para obtener buenos resultados en la medición pueden ser del mismo orden.

Para ajustar el nivel de reducción de las interferencias, se puede conectar una fuente de descargas artificiales entre la terminal de alta tensión y tierra. En seguida, se varía algunas de las impedancias Z_m hasta que se obtenga una reducción máxima en el instrumento medidor de descargas. Se pueden obtener relaciones de reducción de 3 (para objetos de prueba totalmente diferentes) a 10 000 (para objetos de prueba idénticos y protegidos con pantallas).

El detector balanceado, se muestra en la figura 14.



Cc - Cable coaxial
I - Instrumento de medición
 Z_m, Z_{m1} - Impedancias de medición

FIGURA 14 Circuito detector de descargas parciales balanceado.

Quando en la prueba de descargas parciales se necesite de un capacitor de acoplamiento grande o de un circuito balanceado, (como en este caso), puede emplearse un segundo objeto de prueba en lugar del capacitor de acoplamiento como lo muestra la figura anterior.

1.8.3 Calibración de detectores.

En la práctica, las descargas no se pueden detectar en el lugar mismo en que se producen y debido a la deformación del campo eléctrico en la descarga, la multiplicidad de las cavidades y la interacción de sus diversos esfuerzos hacen que las descargas sean de amplitud y periodo diferentes; es decir, arbitrarias; de ahí que el voltaje de encendido y extinción de descarga sean diferentes. Por estas razones, se desconocen los valores de los parámetros que involucran la medición de las descargas parciales para encontrar su comportamiento matemático; de ahí la calibración de la medición.

La calibración consiste en inyectar en el circuito un pequeño pulso de corriente, con magnitud de carga conocida q_0 , mediante un generador de pulsos patrón (calibrador), el cual emite pulsos rectangulares, en serie con una capacitancia pequeña C_0 de valor conocido, pero de un valor tal que sea mucho muy pequeña en comparación con la capacitancia C_t del objeto bajo prueba:

$$C_0 \ll C_t$$

El generador permite que la amplitud U_0 del pulso sea ajustable, para definir exactamente la magnitud de carga q_0 a inyectar en el circuito. El tiempo de incremento del pulso debe estar en el rango de 50 a 100 nS para asegurar que el pulso tenga un espectro de frecuencia similar a los pulsos de las descargas parciales originales.

El proceso de calibración, se debe realizar para cada prueba de descargas parciales o cada vez que se hagan cambios en el circuito de prueba.

Existen dos métodos de calibración, los cuales son:

- Calibración directa.
- Calibración indirecta.

1.8.3.1 Calibración directa.

Consiste en inyectar los pulsos entre las terminales del objeto bajo prueba.

Si la capacitancia C_0 del calibrador es suficientemente pequeña, comparada con la capacitancia de acoplamiento C_k , además de la

del objeto de prueba C_t , el pulso de calibración equivale a una carga con magnitud:

$$q_0 = U_0 C_0 \quad (17)$$

La lectura del medidor de descargas parciales corresponde directamente a la carga aparente q y se puede expresar como:

$$L_{cd} = F q_0 \quad (18)$$

donde F es el factor de calibración.

Como se conoce el valor de carga q_0 , es posible calcular el factor F como sigue:

$$F = \frac{L_{cd}}{q_0} \quad (18.1)$$

1.8.3.2 Calibración indirecta.

Consiste en inyectar los pulsos a través de la impedancia de medición.

Como el instrumento y el circuito de medición es el mismo que el empleado en la calibración directa, la lectura del instrumento es:

$$L_{ci} = F q_0 \left(1 + \frac{C_t}{C_k} \right) \quad (19)$$

donde $q_0 (1+C_t/C_k)$ corresponde a la carga aparente q y q_0 a la carga medible q_m , que es la conocida (ver ecuación 9). Cuando la lectura en el instrumento medidor corresponde al valor de carga inyectada q_0 , resulta ser igual a la producida por una carga aparente q y se obtiene la relación:

$$L_{ci} = F q_0 = F q$$

resolviendo para q :

$$q = \frac{L_{ci}}{F} \quad (20)$$

sustituyendo (19) en (20) da:

$$q = q_0 \left(1 + \frac{C_t}{C_k} \right) \quad (21)$$

que resulta la ecuación (9), salvo por q_0 que debe ser q_m , pero como ya se mencionó que la carga que se inyecta es la que se mide, entonces:

$$q_m = q_0$$

De la ecuación (21) se deduce que para $C_k \gg C_t$ se obtiene el valor correcto de la carga aparente, lo que trae como consecuencia que la calibración indirecta proporciona el valor más exacto.

La figura 15, muestra los dos tipos de calibración.

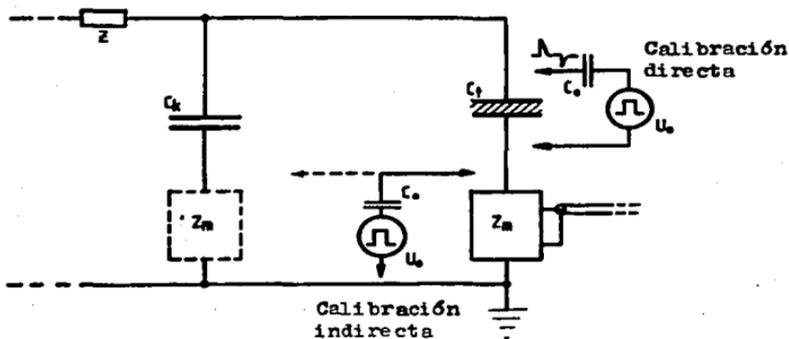


FIGURA 15 Calibración de los detectores de descargas parciales.

1.8.4 Integradores de pulsos.

Las impedancias de medición consisten, como ya se vio, de los circuitos RC y RCL, por los cuales debe pasar la corriente de descarga $i(t)$. La descarga se propaga a través del aislamiento produciendo una señal en las terminales del objeto bajo prueba,

que es proporcional al pulso producto de la descarga, el que se recoge en la impedancia de medición y se envía al medidor de descargas parciales mediante cable coaxial.

Las descargas parciales producen pulsos muy pequeños, los cuales al transmitirlos por el cable coaxial llegan al medidor de descargas (indicado como I en las figuras 13 y 14) distorsionados, por ello, es necesario amplificar dichos pulsos y así poder apreciarlos en un osciloscopio, registrador o en algún otro medidor. Para amplificar las descargas, se emplea el integrador de pulsos, que es básicamente un sistema de filtros paso-banda con amplificación electrónica.

Existen dos tipos de amplificadores, los cuales son:

- Amplificador de banda ancha.
- Amplificador de banda angosta.

El pulso de corriente de descarga $i(t)$ que amplifica el circuito integrador, en función de la frecuencia se obtiene de la integral de Fourier:

$$I(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} i(t) \exp(-j\omega t) dt \quad (22)$$

pero solo la amplitud es suficiente, por lo que:

$$I(\omega) = |I(j\omega)| \quad (23)$$

El tiempo característico del pulso se puede aproximar por la caída exponencial de dicho pulso con:

$$i(t) = I_0 \exp(-t/T) \quad (24)$$

así, la carga aparente transportada por la aproximación es:

$$q = \int_0^{\infty} i(t) dt = I_0 T \quad (25)$$

El espectro complejo del pulso exponencial depende de la frecuencia angular.

Con la relación $\omega = 2\pi f$ y la ecuación (23) se obtiene la amplitud del espectro $I(\omega)$:

$$I(\omega) = \frac{q}{\sqrt{1 + (2\pi fT)^2}} \quad (26)$$

1.8.4.1 Integrador de banda ancha.

El integrador de banda ancha amplifica el voltaje $U'_m(t)$ (en el rango de mV) formado al final del cable coaxial al momento de la descarga. El ancho de banda del amplificador está en el rango de la frecuencia de resonancia f_0 de la impedancia de medición Z_m , puesto que también actúa como filtro. Esta frecuencia de resonancia está influenciada por C_t y C_k .

El valor pico del voltaje de salida del amplificador, $U''_m(t)$, es también proporcional a la carga de los pulsos de descarga parcial y se muestran en un medidor de lectura pico en el instrumento correspondiente (usualmente en pC). También puede observarse el tiempo de $U''_m(t)$ en un osciloscopio o viendo simultáneamente las señales superpuestas en el trazo de la tensión de prueba de corriente alterna. Las descargas se presentan, usualmente, sobre un trazo elíptico, en el los pulsos individuales $U''_m(t)$ sólo son reconocibles como líneas verticales de diferentes alturas o carga respectivamente.

Cuando se utiliza el trazo elíptico en un osciloscopio, una rotación completa corresponde a un periodo del sistema de alimentación (16.7 ms).

El ancho de banda del integrador de pulsos (amplificador) de banda ancha es típicamente de 150 a 200 kHz.

En la figura 16, se aprecia el integrador de pulsos de banda ancha.

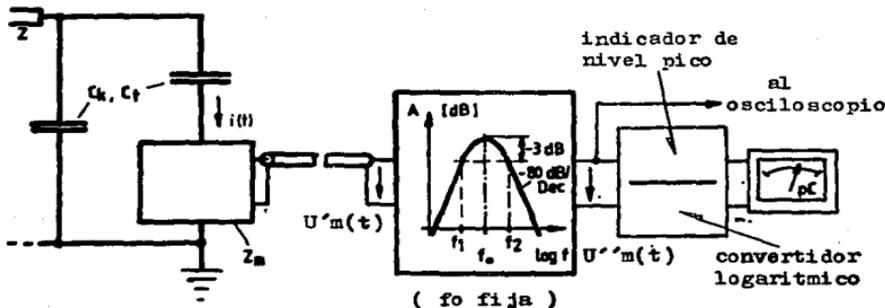


FIGURA 16 Amplificador de pulsos de banda ancha de descarga parcial.

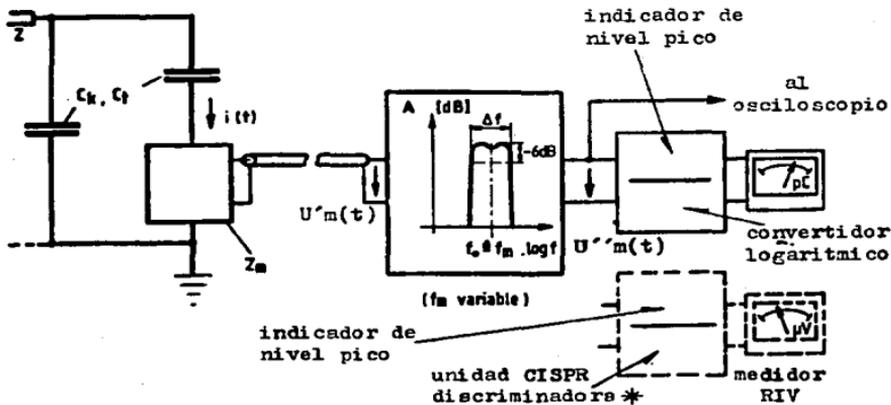
1.8.4.2 Integrador de banda angosta.

Este tipo de amplificador es básicamente, un receptor medidor de alta sensibilidad, con una medición continuamente variable o centro de frecuencia en el rango de aproximadamente 50 kHz a varios MHz. Su ancho de banda es, típicamente, sólo de 9 kHz (-6 db). Para circunstancias especiales, existen sistemas con ancho de banda mayor o menor a los 9 kHz.

Este tipo de instrumento se conoce como medidor de ruido o medidor de radiointerferencia (medidor RIV). Puede estar referido en μV ; en ciertas circunstancias, la lectura puede calibrarse en pC.

En los instrumentos de tiempo atrás, su respuesta era no lineal, puesto que estaban concebidos de acuerdo a la respuesta al ruido del oído humano. La señal de salida de los instrumentos actuales tienen una relación lineal de la carga de los pulsos de corriente de descarga parcial, los valores medidos se indican directamente en pC.

En la figura 17, se muestra el integrador de banda angosta.



* CISPR weighting en ingles

FIGURA 17 Amplificador de banda angosta.

En la impedancia de medición Z_m , un valor bajo de resistencia previene que la conexión serie de las capacitancias C_t y C_k del circuito de prueba no atenuen las componentes de alta frecuencia de las señales de descarga; de lo contrario, el medidor no registraría dichos pulsos.

La resolución del pulso en este tipo de amplificador es de $T_r=220$ μ S, que es mucho más grande que $T_r=13$ μ S del amplificador de banda ancha; pese a ello, la polaridad de los pulsos se pierde en este tipo de amplificador.

La unidad CISPR weighting (discriminadora) suprime las descargas de interferencia que llegan con las descargas del objeto de prueba. Los amplificadores de banda angosta actuales no contienen esta unidad, lo que hace que su respuesta sea lineal.

1.8.4.3 Diferencias de integradores.

El sistema de medición de descargas parciales, se compone por impedancia de medición Z_m , cable coaxial e instrumento de medición, en el que se incluye el filtro integrador. La integración de los pulsos de descarga en los dos sistemas de medición (sistema con integrador de banda ancha y sistema con integrador de banda angosta) depende de la banda de frecuencia de paso del sistema de medición. La diferencia de ambos integradores reside principalmente en su capacidad para suprimir interferencias: sus ventajas y desventajas se indican en la tabla siguiente.

| | Sistema de banda angosta | Sistema de banda ancha |
|--|--|---|
| Ancho de banda | $f = 9 \text{ kHz}$ (a -6 db) | $f_2 - f_1 =$ 150 - 200 kHz (a -3 db) |
| Centro de frecuencia | Variable $f_n = 50 \text{ kHz} \dots 2 \text{ MHz}$ | Fijo $f_0 = 80 - 150 \text{ kHz}$ |
| Sensibilidad al ruido | Bajo (mediciones selectivas, posibles mediante un centro variable de frecuen- cia) | Relativamente alta (el número de fuentes de interfe- rencia se incrementa grandemente con el ancho de banda) |
| Ancho máximo admisi- ble del pulso de descarga parcial | Depende de la selección del centro de frecuencia | Aproximadamente 1 μs ($T \sim 150 - 200 \text{ nS}$) |
| Tiempo de resolu- ción del pulso | Grande $T_r \sim 220 \text{ } \mu\text{s}$ | Pequeño $T_r \sim 15 \text{ } \mu\text{s}$ |
| Polaridad del pulso | No es detectable | Detectable |
| Indicación del valor medido | Directamente en pC \star | Directamente en pC |

\star En el sedidor RIV, la indicación es en μV cuando contiene la unidad discriminadora, en pC cuando no la contiene.

TABLA 1 Características típicas de los sistemas de medición de descargas parciales.

1.8.5 El osciloscopio como medidor de descargas parciales.

Las descargas parciales en el objeto de prueba causan transferencia de carga, los pulsos formados por dicha transferencia se filtran (impedancia de medición), se amplifican (integradores de banda ancha y banda angosta) y finalmente se muestran en el instrumento de medición.

El instrumento de medición que más se emplea es el osciloscopio de rayos catódicos, con una base de tiempo elíptica sincronizada con la tensión de prueba, con ello, los pulsos de descarga individuales, los cuales tienen valores pico proporcionales a las correspondientes cantidades de descarga q , se muestran en su pantalla. Se pueden distinguir diferentes tipos de descargas parciales y de entre ellas las que deben medirse y los disturbios extraños.

El pulso de calibración de magnitud de carga conocida inyectado al circuito de prueba, (ver calibración de los detectores en el subtema 1.8.3) también aparece en la pantalla del osciloscopio, con el se comparan las descargas que ocurren en el objeto de prueba para así poder determinar la magnitud de éstas, la cual se da en μC . La señal de calibración puede ser variada sobre un rango específico del instrumento de medición.

La base de tiempo también puede ser lineal, es decir, las descargas se muestran sobre una señal sinusoidal. Ambas bases de tiempo se muestran en la figura 18.

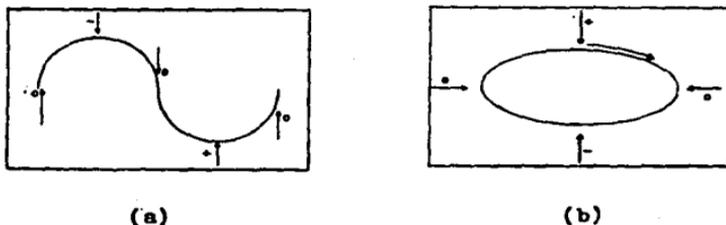


FIGURA 18 (a) Base de tiempo lineal. (b) Base de tiempo elíptica.

1.8.6 Medidores para otras cantidades relacionadas con las descargas parciales.

Existen instrumentos que miden otras cantidades de descarga como la frecuencia de repetición n , el promedio de corriente I , etc. (ver subtema 1.7, definición de cantidades relacionadas con las descargas parciales). En la tabla 2, muestra estos instrumentos,

así como sus características útiles.

| Clase | Cantidad medida | Características que se aprovechan en varios instrumentos |
|--|---|---|
| Medidor de pulsos individuales (Usados en circuitos balanceados y no balanceados) | Magnitud de descarga parcial q | - Osciloscopio, muestra los pulsos individuales - Medidor indicador de descarga pico (calibrado para leerse en pC) - Respuesta en banda ancha o banda angosta |
| Medidores e indicadores de la tasa de los pulsos de repetición | Tasa de los pulsos de repetición n (en relación a las magnitudes de q) | - Contadores electrónicos (indican el número de descargas en un tiempo dado) - Medidores de la proporción de los pulsos (indican el número promedio de descargas por segundo) - Discriminadores para ajustar el rango de la magnitud medida |

TABLA 2.

| Clase | Cantidad medida | Características que se aprovechan en varios instrumentos |
|---|------------------------|--|
| Instrumentos de medición de cantidades de descarga integradas | Corriente promedio I | - Medidor que indica lecturas del promedio de la corriente de descarga |
| | Tasa cuadrática D | - Medidores que indican la tasa cuadrática - Detector de ley cuadrática o detector térmico |
| | Potencia de descarga D | - Puente de capacitancias con osciloscopio, muestra la energía por ciclo (trazo elíptico) o - Puente de Schering sucesivamente balanceado con detector sintonizado e indicador de rayos catódicos |
| Medidores de radio-interferencia | Voltaje cuasi-pico | - Medidor indicador de lectura de voltaje cuasi-pico (escala logarítmica) - Respuesta en banda angosta (~ 9 kHz) con sintonización de frecuencia variable - Circuito "ponderador" (determina la influencia de la tasa de repetición n) |

TABLA 2 (continuación).

1.9 Representación de diferentes formas de las descargas parciales.

El número y magnitud de descargas, que aparecen en la elipse, depende de la construcción del objeto de prueba, de la naturaleza de la localización de la falla y de la magnitud de la tensión aplicada. Las descargas se producen de muy distintas maneras y ellas se reflejan en la forma como se presentan sobre la pantalla del osciloscopio. A continuación se da una lista de las diferentes formas de cómo se pueden presentar las descargas parciales sobre la elipse y que es lo que las produce.

FIGURA 19. Descargas producidas en un dieléctrico debidas a una cavidad.

FIGURA 20. Descargas producidas por fisuras en aislamiento elastomérico (polímero elástico) en la dirección del campo eléctrico. También ocurren dentro de una cavidad rodeada de aislamiento termoplástico que contiene inhibidores y/o polímeros plastificados (plasticizer) en elastómeros.

FIGURA 21. Este tipo de descargas pueden producirse alguno de los siguientes tres casos:

21.1: Descargas internas en número de cavidades de diferente forma y tamaño.

21.2: Descargas en superficies externas de dieléctrico entre dos conductores juntos.

21.3: Descargas en una superficie externa de dieléctrico en áreas de alta presión tangencial.

FIGURA 22. Proceso de fabricación de un dieléctrico defectuoso. Las descargas se producen por defectos (cavidades) en los sistemas de aislamiento de resina. La formación de productos eléctricamente conductores puede resultar de la acción de la descarga sobre la resina en éstos sitios.

FIGURA 23. Descargas debidas a cavidades laminares encontradas en aislamiento de máquinas que contienen mica y otra capa de material.

FIGURA 24. Descargas que toman lugar en burbujas de gas en aislamientos líquidos en contacto con celulosa húmeda (papel impregnado en aceite), frecuentemente en capacitores. Las burbujas se generan por la acción de la presión eléctrica en la celulosa húmeda, las que se incrementan en número y tamaño bajo la acción de las descargas, pero se disuelven y desaparecen dejando de aplicar tensión por un periodo de tiempo.

FIGURA 25. Descargas producidas en una cavidad existente entre un lado conductor (metal o carbón) y por el otro dieléctrico. Las descargas ocurren cerca del voltaje pico y son asimétricas, es decir, tienen un número diferente de descargas, así como de magnitudes en los dos medios ciclos, usualmente de relación 3:1, pero se necesitan aproximadamente de 10:1 para distinguirlas de las descargas de la figura 19. Si la elipse presenta un pequeño número de grandes descargas en el pico negativo y gran número de pequeñas descargas en el pico positivo, usualmente la cavidad se localiza en el lado del metal de gran potencial y otro lado dieléctrico (vease figura).

FIGURA 26. La forma de las descargas pueden ser causadas por:

- 26.1: Las descargas que ocurren en cavidades de varios tamaños entre un lado metálico y otro dieléctrico.
- 26.2: Las descargas superficiales que toman lugar entre el exterior de un metal y una superficie dieléctrica.

FIGURA 27. Las descargas pueden ser causadas por:

- 27.1: Espacio de aire en un conductor metálico, tal como una conexión flotante al blindaje o a una pantalla.
- 27.2: Por abertura entre dos objetos metálicos independientes que cruzan la tensión producida por inducción electrostática del circuito de prueba, tal como objetos metálicos no aterrizados, pero que se encuentran en el piso del área de prueba.

FIGURA 28. Descargas producidas por el acrecentamiento de los canales de carbón por sobrecalentamiento de materia orgánica (figura 28.1). Las descargas también pueden presentarse como en la figura 28.2. Cuando las descargas se presentan como en la figura 28.2, es probable que sean erráticas con un cambio rápido y substancial en magnitud a los pocos minutos.

FIGURA 29. Descargas producidas en aislamiento orgánico contaminado con una cavidad y un canal que ya han provocado las descargas, las descargas originadas en el interior de la cavidad originan que el canal se degrade en un canal más grande, pero no muy largo, que se produce activamente. Las descargas aumentan en número, el incremento en magnitud es despreciable.

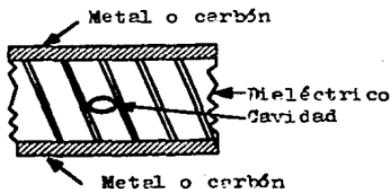


FIGURA 19.

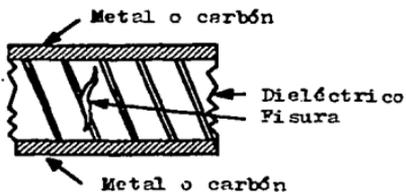
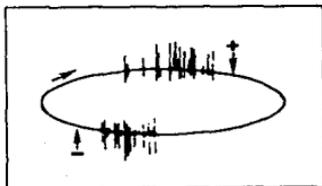
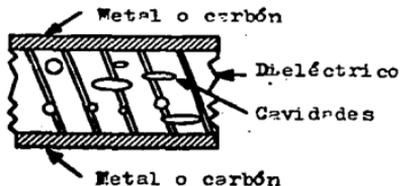
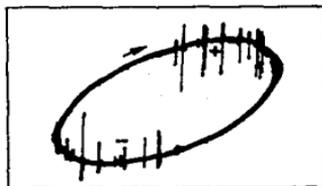
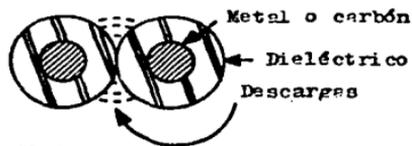


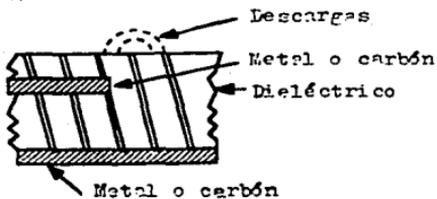
FIGURA 20.



21.1



21.2



21.3



FIGURA 21.

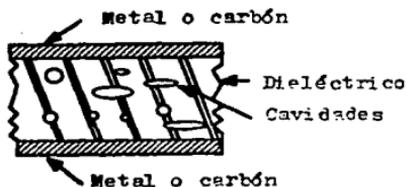


FIGURA 22.

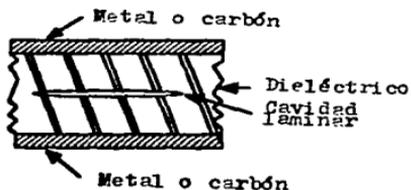
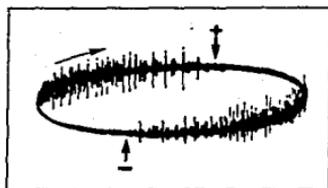


FIGURA 23.

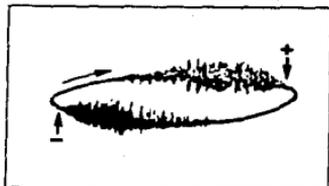
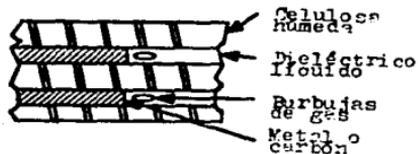
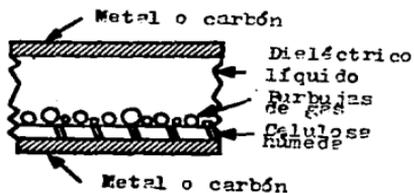
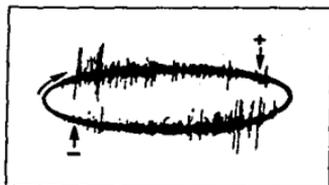


FIGURA 24.

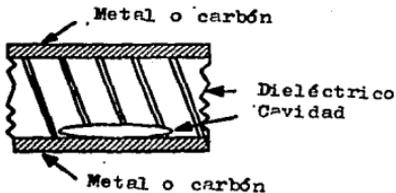
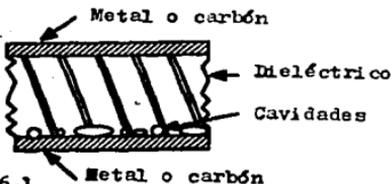
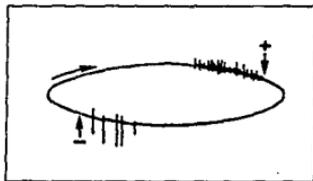


FIGURA 25.



26.1

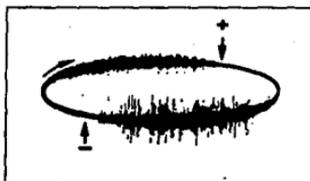
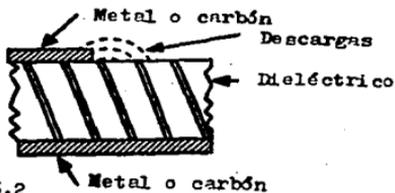
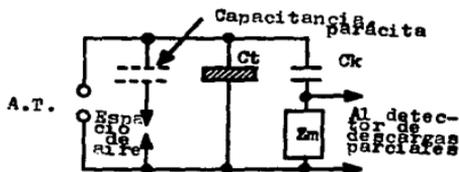


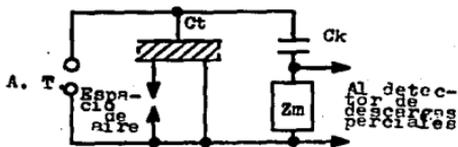
FIGURA 26.



26.2

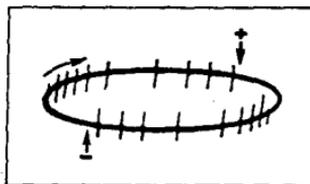


27.2



27.1

FIGURA 27.



ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

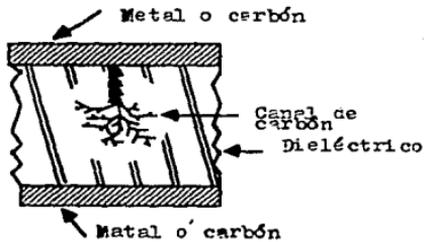
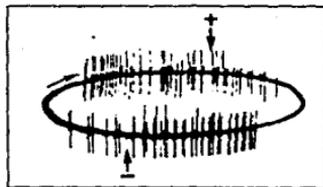
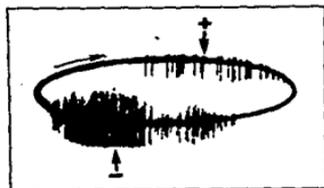


FIGURA 28.



28.1



28.2

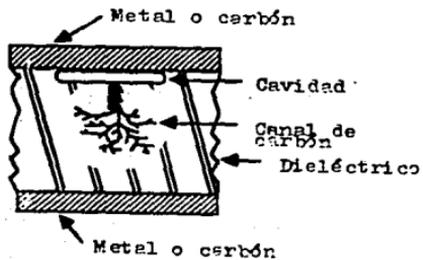
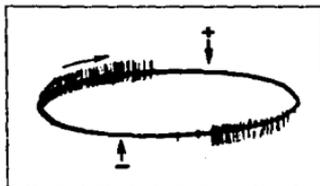


FIGURA 29.



1.10 Componentes de un circuito de prueba de descargas parciales.

En el subtema 1.5, se vió el circuito básico de prueba y sus elementos componentes, en el presenta subtema se describen los componentes que debe contener un circuito de prueba de descargas parciales, además de los del circuito básico.

La figura 30, muestra el circuito de prueba y todos los elementos que lo forman.

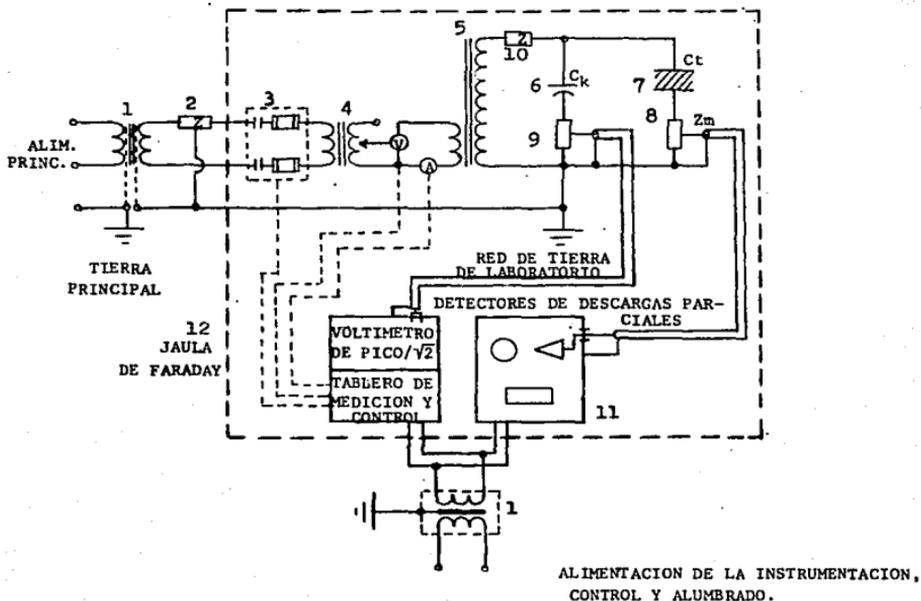


FIGURA 30 Elementos que constituyen un circuito de prueba de descargas parciales.

La descripción de los componentes se da a continuación.

- 1- Transformadores de aislamiento: protege al circuito de prueba, de medición y control de la interferencia.

- 2- **Filtro paso-bajas:** protege al circuito de prueba de la interferencia.
- 3- **Contactador principal:** en las pruebas de descargas parciales este elemento debe ser capaz de energizar e interrumpir el circuito de la alimentación principal, debe estar provisto de fusibles con capacidad interruptiva adecuada.
- 4- **Transformador regulador de tensión:** provee las diferentes tensiones desde cero hasta la nominal para la prueba de descargas parciales. Debe trabajar en forma continua (corriente nominal) en las diferentes tensiones.
- 5- **Transformador elevador de tensión:** provee al objeto de prueba la tensión de prueba.
- 6- **Capacitor de acoplamiento Ck.**
- 7- **Objeto bajo prueba Ct:** objeto al que se le mide el nivel de descargas parciales.
- 8- **Impedancia de medición Z_m:** en ella se recogen los pulsos de descarga producidos en el objeto bajo prueba Ct para su medición, en los aparatos para este efecto.
- 9- **Unidad secundaria:** envía al voltmetro de pico, una tensión de entrada para la medición de la tensión en el secundario del transformador elevador, la unidad debe ser capacitiva, puesto que el capacitor de acoplamiento se utiliza como divisor de tensión capacitivo. En el tablero de control debe haber un interruptor que conecte a dicha unidad para la medición de la tensión o en pruebas de descargas parciales cortocircuite para la medición de los pulsos de descarga.
- 10- **Filtro de radiofrecuencia:** protege al circuito de prueba de las interferencias.
- 11- **Detector de descargas parciales:** tiene integrados osciloscopio, generador de pulsos patrón e integrador de pulsos (amplificador).
- 12- **Jaula de Faraday:** protege al circuito de prueba y circuito de medición y control de las interferencias.

1.11 Niveles permisibles de descargas parciales en los transformadores.

Los transformadores se manufacturan con arreglos complejos en sus conductores y aislamientos, ello hace que el ensamble y secado (deshidratado y desgasificado) sin defectos sea difícil; esto propicia el que ocurran las descargas parciales a esfuerzos dieléctricos relativamente bajos.

Con la técnica de las descargas parciales, pueden detectarse esos defectos, éstos involucran pequeñas cantidades de energía (fracciones de microjoules) que no son apreciables pero sí medibles; sin embargo, provocan el debilitamiento progresivo del aislamiento y como consecuencia la disminución de la vida útil. Detectarlos oportunamente evita trastornos mayores que contribuyan a incrementar los costos de fabricación y operación.

Las descargas parciales pueden ser provocadas por diversos factores a continuación se da una lista de ellos.

- Sobreesfuerzos de campo eléctrico en aislamientos.
- Sobreesfuerzos de campo eléctrico en los ductos de aceite.
- Proceso de secado (deshidratado y desgasificado).
- Presencia de burbujas, partículas extrañas o contaminación.
- Partes metálicas aisladas en campos eléctricos elevados.
- Aterrizamiento inadecuado de las partes metálicas.
- Materiales aislantes defectuosos.
- Partes metálicas con bordes no redondeados.
- Conexiones flojas o recubrimiento aislante en la superficie de contacto.
- Aplicación inadecuada de los aislamientos.

En algunas partes del transformador, como en el aceite aislante o una gran porción de aislamiento sólido el nivel de descargas, puede tolerarse en un cierto nivel, pero éste en otras partes puede resultar peligroso como en el aislamiento entre las

espiras.

Para asegurarse de que el nivel de descargas presente en un transformador no representa un riesgo para la vida de los aislamientos, se recomienda:

- a) Si el nivel de descargas sobrepasa el nivel que recomiendan las normas, rechazar el transformador, no importando en qué región ocurren. El transformador sólo se aceptará hasta que se corrija el defecto y el nivel de descargas producido no contribuya en gran medida en el deterioro de los aislamientos.
- b) Localizado el punto de ocurrencia de las descargas, decidir si el nivel de las mismas en el transformador es aceptable, si se acepta con penalización o si es necesario el rechazarlo.

Para los transformadores de distribución sumergidos en aceite aislante, normalmente no se les practica la prueba de descargas parciales, ello por razones económicas e importancia del equipo. Esto se debe a que en los transformadores sumergidos en aceite, las descargas parciales suelen aumentar frecuentemente con el tiempo, siendo el fenómeno acumulativo y peligroso para el aislamiento. El fenómeno es debido a que durante la descomposición de los materiales aislantes se genera gas, que a la vez provocan mayores descargas, lo que puede originar el desencadenamiento de una falla franca en el transformador.

Realizar mediciones de descargas parciales con detectores de radiointerferencia, puede resultar difícil, particularmente en los transformadores de potencia (los que se siguen usando en la industria), dado que se miden las magnitudes de los pulsos en valor cuasi-pico, cuya tensión es menor que los pulsos de valor pico verdaderos, así, las descargas pequeñas, constantes, repetitivas e inocuas pueden dar la misma lectura que pocas descargas grandes y variadas, nocivas para la vida de los aislamientos.

Los niveles permitidos de descargas parciales en los transformadores varían de una a otra norma; presentan discrepancias, así como también en la secuencia y duración de la prueba.

La mínima intensidad de descarga parcial medible, depende del nivel de disturbio o ruido interno en el área de prueba y de los parámetros del circuito de prueba, especialmente de las capacitancias del objeto de prueba y del capacitor de acoplamiento C_t y C_k respectivamente y de la impedancia de medición Z_m , incrementos en los valores de C_t , C_k , $1/Z_m$ y en la

relación Ct/Ck, en general hace incrementar la mínima intensidad de descarga medible.

En las pruebas de descargas parciales, se persigue que los transformadores no presenten descargas a tensión nominal, por ello, se hace necesario garantizar que el nivel de descargas no sea superior al recomendado por norma o al establecido por criterio de fabricante. Algunos fabricantes presentan criterios en el nivel de descargas menores a los recomendados por norma, ello con el fin de hacer más eficientes sus aparatos.

A continuación se dan las modalidades de algunas normas referente a la prueba de descargas parciales.

1.11.1 Transformadores de potencia (normas IEC 76-3 e IEEE Std. 262B).

NORMA IEC 76-3.

Recomiendan que la medición de descargas parciales se efectúe durante la prueba de potencial inducido y con un detector de máxima carga aparente. La tensión rms de exploración (de fase a tierra) de descargas parciales debe ser:

$$V_1 = 1.7 V_{m\acute{a}x} / \sqrt{3}$$

donde $V_{m\acute{a}x}$ es la tensión rms máxima de diseño del transformador.

La tensión rms de prueba es:

$$V_p = 1.5 V_{m\acute{a}x} / \sqrt{3}$$

se permite un nivel máximo de descargas parciales de 500 pC.

Para una tensión de prueba de:

$$V_p = 1.3 V_{m\acute{a}x} / \sqrt{3}$$

se permite un nivel de descargas parciales de 300 pC.

La figura 31, muestra la secuencia de aplicación de la tensión de prueba y duración de la misma.

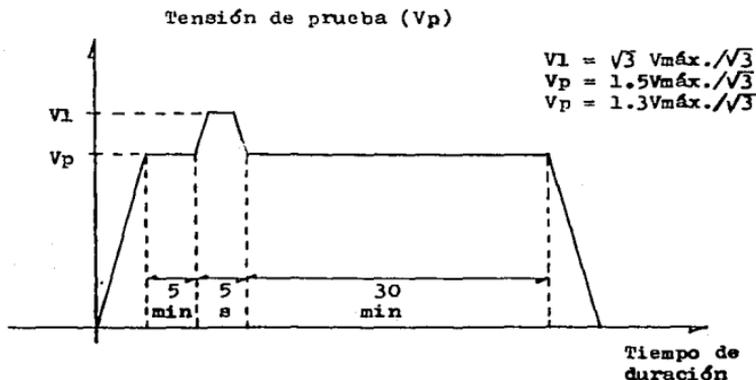


FIGURA 31.

NORMA IEEE STD. 262B.

Esta norma tambi3n recomienda que la prueba se realice durante la prueba de potencial inducido. La medici3n se efectúa con un detector de radiointerferencia, tomando lecturas a intervalos de 5 y 10 minutos. La tensi3n de prueba (de fase a tierra) tiene un valor de:

$$V_p = 1.5 V_{m\acute{a}x} / \sqrt{3}$$

El nivel de descargas permitido es de 150 microVolts (μV).

En la figura 32, se indica la secuencia de aplicaci3n de la tensi3n de prueba, as3 como la duraci3n de la misma.

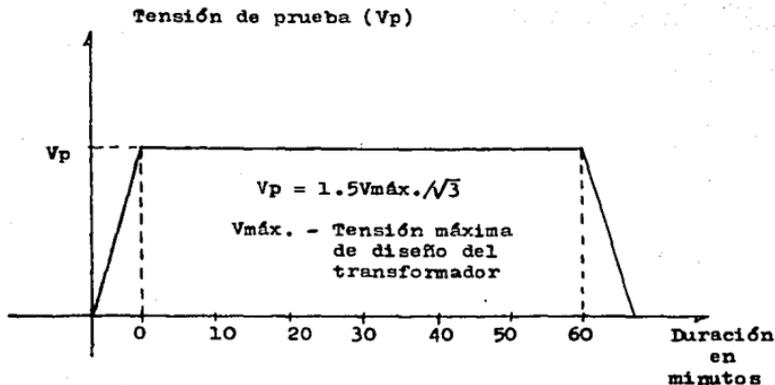


FIGURA 32.

1.11.2 Transformadores de distribución (sumergidos en aceite, normas NEMA TR-1).

La prueba se realiza durante la prueba de potencial aplicado o inducido, si los transformadores son de aislamiento reducido, la prueba se hace sólo durante la prueba de potencial inducido. La prueba se realiza con un detector de radiointerferencia.

El nivel de descargas parciales no debe exceder los 100 microVolts para transformadores de 500 kVA y menores, para sistemas con tensiones nominales de 23 kV y menores, y nivel básico de impulso (BIL) A de 125 kV y menores.

A El nivel básico de impulso BIL (Basic Impulse Level) es un nivel de aislamiento que se toma como referencia para la aplicación de la tensión durante las pruebas de impulso para simular las condiciones atmosféricas.

Para transformadores con nivel básico de impulso de 150 kV y mayores, el nivel de descargas parciales no debe exceder los valores indicados en la tabla 3.

| Tensión nominal del sistema (Un) en kV | Tensión de prueba en kV | Nivel de descargas parciales permitidas en microVolts |
|--|-------------------------|---|
| 0.6 | 0.76 | |
| 2.4 | 1.67 | 250 |
| 4.16 | 2.89 | 250 |
| 4.8 | 3.34 | 250 |
| 7.2 | 5.01 | 250 |
| 8.32 | 5.77 | 250 |
| 12.0 | 8.00 | 250 |
| 12.47 | 8.32 | 250 |
| 13.2 | 8.79 | 250 |
| 14.4 | 9.41 | 250 |
| 23.0 | 15.7 | 650 |
| 27.6 | 18.8 | 650 |
| 34.5 | 23.0 | 650 |
| 46.0 | 29.3 | 1 250 |
| 69.0 | 44.0 | 1 250 |
| 115.0 | 73.4 | 2 500 |
| 138.0 | 88.0 | 2 500 |
| 161.0 | 102.5 | 5 000 |
| 230.0 | 147.0 | 5 000 |
| 288.0 | 183.0 | 5 000 |
| 345.0 | 220.0 | 5 000 |
| 400.0 | 254.0 | 5 000 |

TABLA 3 Niveles permitidos de descargas parciales para transformadores de distribución con BIL de 150 kV y mayores y transformadores de potencia con BIL de 1050 kV y menores.

TRANSFORMADORES DE POTENCIA (SUMERGIDOS EN ACEITE).

La prueba se realiza en las mismas condiciones que para los transformadores de distribución. También el nivel de descargas parciales no debe exceder los valores dados en la tabla 3.

La tensión de prueba para ambos tipos de transformadores (distribución y potencia) es de:

$$V_p = 1.1 V_n / \sqrt{3}$$

donde V_n es la tensión nominal del sistema (rms).

La figura 33 muestra la secuencia y duración de la prueba.

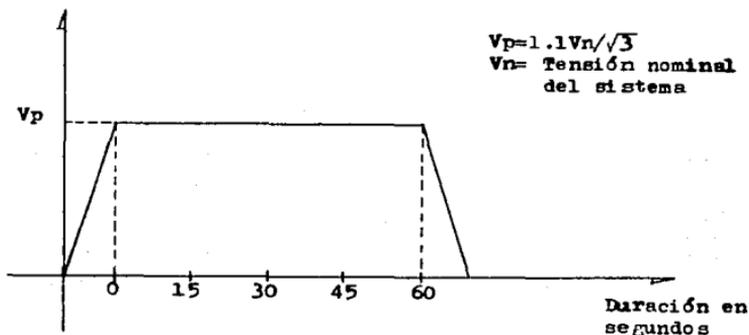


FIGURA 33.

1.11.3 Transformadores de instrumento (norma IEC 44-4, 1980).

Los niveles permisibles de descargas parciales son los mostrados en la tabla 4, para transformadores con aislamiento impregnado en aceite y tipo sólido. En la tabla, también se dan las diferentes tensiones de prueba para cada tipo de transformador de instrumento.

La prueba de descargas parciales se realiza con un detector de máxima carga aparente.

Las figuras 34, 35 y 36 dan la secuencia y duración de la prueba y los circuitos de prueba usados respectivamente.

Los transformadores de instrumento censan las señales del sistema

eléctrico y las transforman a valores apropiados para los sistemas de control y medición, trabajan a altas tensiones, por lo que deben soportar elevados gradientes de potencial que deben controlar por un reducido volumen de aceite, para ayudar a soportar dichos niveles de gradientes, se utilizan pantallas conductoras electrostáticas. Por lo anterior, la prueba de descargas parciales es importante en los transformadores de instrumento.

| TIPO DE ATERRIA- MIENTO DEL SISTE- MA. | TIPO DE TRANS- FORMADOR DE INSTRU- MENTO | TENSION DE EXPLORA- CION "V" DURACION = 10s | TENSION DE MEDICION "V" DURACION = 50s | TIPO DE AISLA- MIENTO DEL TRANSFORMADOR DE INSTRUMENTO. | NIVEL DE DESCAR- GAS PARCIALES PERMISIBLES EN PICOCULOMBRES (pC) |
|--|---|---|---|--|--|
| Red eléctrica con neutro ais- lado o aterriza- do por medio de un circuito de resonante | -Transformador de corriente y de potencial de fase a tie- rra | 1.3 V _{ef} . | 1.1 V _{ef} . | Sumergido en aceite aislante sólido. | 100 250 |
| | -Transformador de potencial de fase a fa- se | 1.3 V _{ef} . | 1.1 $\frac{V_{ef}}{\sqrt{3}}$. | Sumergido en aceite aislante sólido. | 10 50 |
| Red eléctrica con neutro efectivamente aterrizado | -Transformador de corriente y de potencial de fase a tierra | 0.8 x 1.3 V _{ef} . | 1.1 $\frac{V_{ef}}{\sqrt{3}}$. | Sumergido en aceite aislante sólido. | 10 50 |
| | -Transformador de potencial de fase a fase | 1.3 V _{ef} . | 1.1 V _{ef} . | Sumergido en aceite aislante sólido. | 10 50 |

TABLA 4 Niveles recomendados de tensión de prueba y descargas parciales, sólo se aplica si existe acuerdo entre fabricante y cliente.

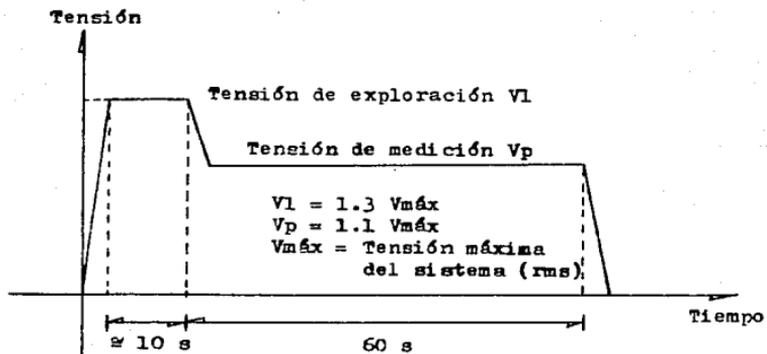
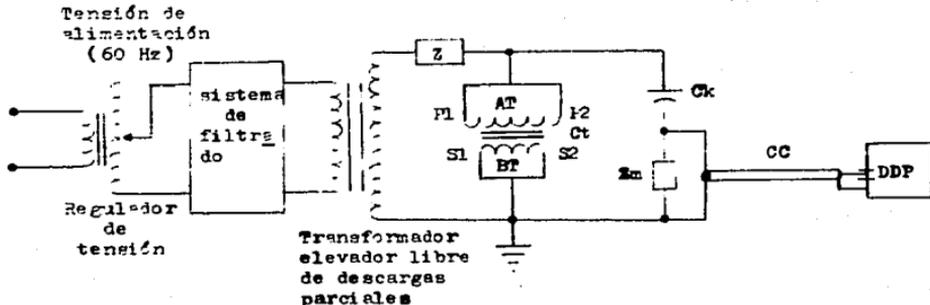
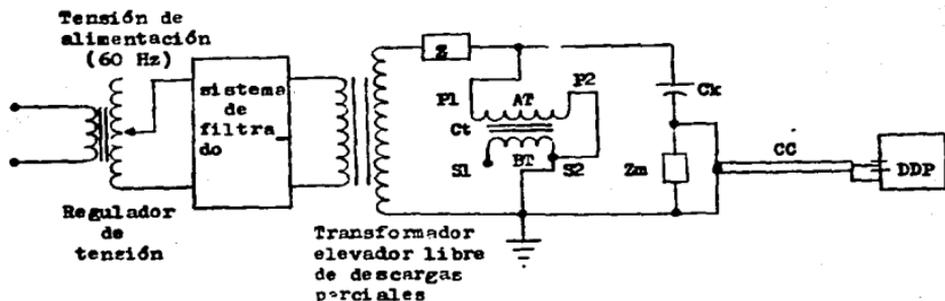


FIGURA 34.



- Ct - Transformador de corriente bajo prueba (TC).
- Ck - Capacitor de acoplamiento.
- Zm - Impedancia de medición.
- CC - Cable coaxial.
- DDP - Detector de descargas parciales.
- AT y ET - Devanados de alta y baja tensión.
- Z - Filtro de descargas parciales.

FIGURA 35 Circuito de prueba empleado para transformadores de corriente.



Ct - Transformador de potencial bajo prueba (TP).

FIGURE 36 Circuito de prueba empleado para transformadores de potencial.

1.12 Resultados de prueba a un transformador de distribución y uno de instrumento.

De las normas listadas, la IEC es la más representativa de las condiciones de operación.

A continuación, como ilustración de los niveles de descargas parciales que manejan los fabricantes, se dan los resultados de pruebas hechas a dos tipos de transformadores: transformador de distribución monofásico en aceite de 5 kVA y transformador de corriente (de instrumento) con clase de aislamiento de 400 kV. La hoja 1 y tabla 5, corresponden al transformador de distribución y la hoja 2, al transformador de instrumento. La prueba para ambos transformadores se hizo con un detector de máxima carga aparente.

Las consideraciones para cada transformador son:

TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCION.

El parámetro de la descarga parcial en el detector, se mide en db, mediante la tabla 5 de voltajes de salida del generador de pulsos de calibración, los valores de voltaje de esta tabla se obtuvieron con la fórmula:

$$db = 20 \log (100/V)$$

teniendo el valor de la descarga en V, se utiliza la fórmula de la carga aparente (ecuación 21) para obtener la magnitud de ésta:

$$q = U_0 C_0 (1 + C_t/C_k)$$

donde:

- Ct - Capacitancia del objeto bajo prueba.
- Ck - Capacitancia del capacitor de acoplamiento.
- Co - Capacitancia de calibración.
- Uo - Magnitud en volts del pulso de calibración.
- qo - Magnitud de la descarga.

Uo Co = qo - Magnitud del pulso de calibración.

TRANSFORMADOR DE INSTRUMENTO.

El transformador consta de dos partes: superior e inferior, para ambas partes se indican las mediciones de descargas parciales. El nivel de descargas no debe exceder 10 pC, que es el criterio de fabricante para su aceptación, por lo que solo se indica que el nivel medido sea inferior a 10 pC.

Las mediciones se realizaron a 3 transformadores en sus dos partes y simultáneamente con la prueba de tensión aplicada, también se indican en la hoja 2 los resultados de las mediciones del factor de pérdidas ($\tan \delta$, ver capítulo IV).

Las lecturas de descargas parciales también se dan en db, pero mediante una tabla en la que ya se tiene la conversión de db a pC se determinó el nivel de descargas en pC.

MEDICION DE DESCARGAS PARCIALES

TIPO DE PRUEBA: DESCARGAS PARCIALES

OBJETO DE LA PRUEBA: MEDIR LA FUERZA DE LAS DESCARGAS

CARACTERISTICAS DEL OBJETO DE PRUEBA: TUBO DE PROTECCION...

PROYECTIL: PROYECTIL EN ACERO, 0.0175, N.º 19, 05/0.170.

PRUEBA

CAPACITANCIA DEL OBJETO:

CONDICIONES AMBIENTALES: TEMPERATURA: 77°C

PRESION ATMOSFERICA: ALTITUD: 1517, N.S.N.M.

NIVEL DE RUIDO DE FONTO: 118 db (0.0224Hz)

QUIPO UTILIZADO: DETECTOR DE DESCARGAS PARCIALES

| PRUEBA | 1a. PRUEBA | | | 2a. PRUEBA | | | 3a. PRUEBA | | | 4a. PRUEBA | | | 5a. PRUEBA | | |
|-------------------|----------------------|---------------------|--------------------------|------------|-----------|--------------------------|------------|-----------|--------------------------|------------|-----------|--------------------------|------------|-----------|--------------------------|
| | TENSION DE PRUEBA KV | FUERZA DE PRUEBA db | TIEMPO DE PRUEBA MIN-SEG | TENSION KV | FUERZA db | TIEMPO DE PRUEBA MIN-SEG | TENSION KV | FUERZA db | TIEMPO DE PRUEBA MIN-SEG | TENSION KV | FUERZA db | TIEMPO DE PRUEBA MIN-SEG | TENSION KV | FUERZA db | TIEMPO DE PRUEBA MIN-SEG |
| V _i | 10 | 50 | 10 | 14.3 | 55 | 10 | 14.5 | 55 | 10 | 14.3 | 55 | 10 | 14.3 | 55 | 10 |
| V _n | 19.00 | 47 | 10 | 18.00 | 48 | 10 | 18.00 | 48 | 10 | 18.00 | 48 | 10 | 18.00 | 48 | 10 |
| 1.2V _n | 22.80 | 47 | 7 | 22.00 | 48 | 7 | 22.00 | 48 | 7 | 22.00 | 48 | 7 | 22.00 | 48 | 7 |
| V _e | 18.00 | 50 | 8 | 18.00 | 49 | 8 | 18.00 | 49 | 8 | 18.00 | 49 | 8 | 18.00 | 49 | 8 |
| V _e | 14 | 50 | 10 | 12 | 57 | 10 | 12.0 | 58 | 10 | 12.5 | 57 | 10 | 14 | 58 | 10 |
| OSER-VACIO-NEF. | | | | | | | | | | | | | | | |

V_i - Voltaje de inicio de descargas
V_n - Voltaje nominal
V_e - Voltaje de extinción de descargas
Co - Objeto bajo prueba
Ca - Capacitor de acoplamiento
Z_m - Impedancia de medición
D.J.P. - Detector de descargas parciales
OSC - Osciloscopio.

| 4b | Voltage | 4b | Voltage | 4b | Voltage | 4b | Voltage |
|----|---------|----|---------|-----|---------|-----|---------|
| 9 | 1.00 V | 40 | 1.00 V | 90 | 10.0 V | 120 | 100 uV |
| 1 | 20.1 V | 41 | 20.1 uV | 91 | 2.91 V | 121 | 29.1 uV |
| 2 | 7.4 V | 42 | 7.4 uV | 92 | 7.4 uV | 122 | 70.4 uV |
| 3 | 70.3 V | 43 | 7.03 uV | 93 | 7.03 uV | 123 | 70.3 uV |
| 4 | 63.1 V | 44 | 63.1 uV | 94 | 6.31 uV | 124 | 63.1 uV |
| 5 | 56.2 V | 45 | 56.2 uV | 95 | 5.62 uV | 125 | 56.2 uV |
| 6 | 50.1 V | 46 | 50.1 uV | 96 | 5.01 uV | 126 | 50.1 uV |
| 7 | 44.5 V | 47 | 44.5 uV | 97 | 4.47 uV | 127 | 44.7 uV |
| 8 | 39.3 V | 48 | 39.3 uV | 98 | 3.93 uV | 128 | 39.3 uV |
| 9 | 35.5 V | 49 | 35.5 uV | 99 | 3.55 uV | 129 | 35.5 uV |
| 10 | 31.6 V | 50 | 31.6 uV | 90 | 3.16 uV | 130 | 31.6 uV |
| 11 | 28.2 V | 51 | 28.2 uV | 91 | 2.82 uV | 131 | 28.2 uV |
| 12 | 25.1 V | 52 | 25.1 uV | 92 | 2.51 uV | 132 | 25.1 uV |
| 13 | 22.4 V | 53 | 22.4 uV | 93 | 2.24 uV | 133 | 22.4 uV |
| 14 | 20.0 V | 54 | 20.0 uV | 94 | 2.00 uV | 134 | 20.0 uV |
| 15 | 17.8 V | 55 | 17.8 uV | 95 | 1.78 uV | 135 | 17.8 uV |
| 16 | 15.9 V | 56 | 15.9 uV | 96 | 1.59 uV | 136 | 15.9 uV |
| 17 | 14.1 V | 57 | 14.1 uV | 97 | 1.41 uV | 137 | 14.1 uV |
| 18 | 12.6 V | 58 | 12.6 uV | 98 | 1.26 uV | 138 | 12.6 uV |
| 19 | 11.2 V | 59 | 11.2 uV | 99 | 1.12 uV | 139 | 11.2 uV |
| 20 | 10.0 V | 60 | 100 uV | 100 | 1.00 uV | 140 | 10.0 uV |
| 21 | 8.91 V | 61 | 29.1 uV | 101 | 29.1 uV | | |
| 22 | 7.94 V | 62 | 7.94 uV | 102 | 7.94 uV | | |
| 23 | 7.03 V | 63 | 70.3 uV | 103 | 70.3 uV | | |
| 24 | 6.31 V | 64 | 63.1 uV | 104 | 63.1 uV | | |
| 25 | 5.62 V | 65 | 56.2 uV | 105 | 56.2 uV | | |
| 26 | 5.01 V | 66 | 50.1 uV | 106 | 50.1 uV | | |
| 27 | 4.47 V | 67 | 44.7 uV | 107 | 44.7 uV | | |
| 28 | 3.93 V | 68 | 39.3 uV | 108 | 39.3 uV | | |
| 29 | 3.55 V | 69 | 35.5 uV | 109 | 35.5 uV | | |
| 30 | 3.16 V | 70 | 31.6 uV | 110 | 31.6 uV | | |
| 31 | 2.82 V | 71 | 28.2 uV | 111 | 28.2 uV | | |
| 32 | 2.51 V | 72 | 25.1 uV | 112 | 25.1 uV | | |
| 33 | 2.24 V | 73 | 22.4 uV | 113 | 22.4 uV | | |
| 34 | 2.00 V | 74 | 20.0 uV | 114 | 20.0 uV | | |
| 35 | 1.78 V | 75 | 17.8 uV | 115 | 17.8 uV | | |
| 36 | 1.59 V | 76 | 15.9 uV | 116 | 15.9 uV | | |
| 37 | 1.41 V | 77 | 14.1 uV | 117 | 14.1 uV | | |
| 38 | 1.26 V | 78 | 12.6 uV | 118 | 12.6 uV | | |
| 39 | 1.12 V | 79 | 11.2 uV | 119 | 11.2 uV | | |

TABLE 5 Voltajes del pulso de calibración a la salida del generador de pulsos.

2 Interferencias y su eliminación.

2.1 Perturbaciones y sensibilidad en mediciones de descargas parciales.

Durante la realización de pruebas dieléctricas en laboratorios de alta tensión, los instrumentos de medición pueden dar lecturas erróneas, particularmente cuando se miden valores pequeños de variables, por ello, es necesario optimizar dichas mediciones para así interpretar de manera correcta los resultados.

En pruebas de descargas parciales, dicha optimización es de suma importancia, dado que los pulsos que se miden son muy pequeños, los cuales involucran niveles de voltaje del orden de microVolts (μV) y de carga del orden de μC . Los errores en las mediciones en este tipo de pruebas son causados por la presencia de perturbaciones o interferencias, cuyos pulsos son muy parecidos al del fenómeno de las descargas parciales y se presentan frecuentemente en el mismo ancho de banda del detector de descargas parciales.

La alta sensibilidad requerida en este tipo de prueba se ve limitada por los niveles de interferencia presentes en el circuito de prueba, interferencia que proviene de medios diferentes.

Los factores que afectan la sensibilidad de la medición son los siguientes:

NIVEL DE RUIDO DEL DETECTOR DE DESCARGAS PARCIALES.

La máxima sensibilidad, la limita el ruido de agitación térmica del circuito de prueba y el nivel que puede obtenerse es de una magnitud menor y está determinada por el nivel de descargas del propio detector.

DESCARGAS ORIGINADAS EN EL CIRCUITO DE PRUEBA PERO NO EN EL OBJETO DE PRUEBA.

Las descargas pueden estar siendo producidas por el transformador elevador, capacitor de acoplamiento, transformador regulador de tensión, conductores de alta tensión y puntos o bordes afilados sometidos a alta tensión. Para una alta sensibilidad, todos los componentes del circuito de prueba deben estar libres de descargas a la máxima tensión de prueba.

DESCARGAS EN EL CIRCUITO DE PRUEBA INCLUYENDO EL OBJETO BAJO PRUEBA.

Ejemplos de estos disturbios son: puenteo entre conductores, movimiento mecánico de electrodos, ruido de contacto, corrientes de fuga (tracking) y altas armónicas en la tensión de prueba. Estos disturbios pueden localizarse en la medición de descargas sobre el objeto de prueba a excepción de las altas armónicas que disminuyen la sensibilidad de la medición, por lo cual deben eliminarse.

INTERFERENCIA DE ORIGEN EXTERNO.

La interferencia está definida como alguna señal eléctrica que entra al circuito de medición y ha seguido el mismo camino que los pulsos de descarga a medir. Para obtener una sensibilidad óptima, es necesario que el circuito de prueba de descargas parciales cuente con una serie de dispositivos y medidas que impidan la introducción de las interferencias, no es posible obtener un nivel de perturbación cero en el circuito de prueba, siempre quedará un pequeño nivel al que se le llama ruido de fondo, con éste puede definirse la sensibilidad de las mediciones de descargas parciales.

2.2 Clasificación de interferencias.

Para obtener una buena sensibilidad en las mediciones de descargas parciales es menester tener conocimiento de los medios donde se originan las interferencias y poder tomar las medidas pertinentes para su eliminación.

Las interferencias que afectan las mediciones de descargas parciales se agrupan en dos categorías:

- a) Interferencias que son independientes de la tensión de prueba.
- b) Interferencias asociadas con la tensión de prueba.

En el caso (a), se encuentran las interferencias producidas por el contenido de armónicas en la fuente de alimentación, defectos en los componentes de control, operación de interruptores, realización de otras pruebas (de impulso, de tensión inducida, de contaminación, de corriente-tiempo, de saturación, de temperatura, de interrupción de arco, etc.), descargas corona en

líneas de alta tensión cercanas, emisiones de radio y televisión, alumbrado fluorescente, ruido térmico del detector de descargas parciales, red de tierra y conexiones flojas de las terminales de tierra.

En el caso (b), son debidas a descargas en el transformador elevador y capacitor de acoplamiento, descargas corona en los electrodos y conectores de alta tensión, blindaje inadecuado de la impedancia de medición y chisporroteo en objetos cercanos no efectivamente aterrizados. Este tipo de interferencias se incrementa con la tensión de prueba.

2.3 Patrones de interferencia.

Los pulsos de descarga parcial a la salida del detector de descargas se muestran en la pantalla de un osciloscopio, el cual permite visualizar pulsos de descarga individuales, ésta cualidad permite obtener información importante a cerca de la naturaleza de las descargas. Los pulsos que presenta el osciloscopio no solo son producidos por debilidad estructural en los aislamientos de aparatos que se prueban, también están presentes los pulsos de descarga provocados por diferentes perturbaciones; sin embargo, por la cualidad arriba mencionada, es posible discriminar los diferentes pulsos para diferenciar entre las descargas verdaderas a medir y las provocadas por interferencias. Es difícil distinguir los diferentes tipos de interferencias presentes en mediciones de descargas parciales, la correcta interpretación depende de la experiencia del observador; sin embargo, existen algunos patrones que facilitan su diferenciación.

El diagnóstico del origen de la interferencia se basa en la observación de la localización de los pulsos sobre la forma de onda que presenta el osciloscopio (elíptica), grado de variación de los pulsos y su magnitud en los semiciclos positivos y negativos de la onda, además de su dependencia respecto a la magnitud de la tensión de prueba. Esto junto con los patrones facilitan la identificación, y eliminación, con lo que se logra una mejor sensibilidad en la medición.

A continuación se listan los tipos de disturbios más comunes y las diferentes fuente que los originan.

FIGURA 37. Ruido por contacto debido a un metal imperfecto para contactos metálicos o pantallas semiconductoras en cables. También puede ser debido a inserciones metálicas usadas para hacer contacto con la placa de capacitores. Las descargas pueden desaparecer a un nivel particular de tensión, así para tensiones

arriba de este nivel, la elipse puede no presentar descargas, esto puede deberse a contactos que se funden a un nivel particular de tensión.

FIGURA 38. Interferencia producida por armónicas. La fuente puede ser la saturación magnética del núcleo de un transformador o reactor y una alta densidad de flujo fluye por el circuito de prueba. También puede deberse por atenuación de armónicas causada por la resonancia con carga capacitiva o aún por una inadecuada atenuación por parte del detector de descargas de frecuencias abajo del límite más bajo de la banda de paso. Las descargas aumentan con la tensión y son inafectadas por el tiempo.

FIGURA 39. Descarga corona. Las descargas son bien definidas y uniformemente distribuidas en torno al pico negativo de la señal de voltaje. Si las descargas aparecen en el pico positivo, las descargas son provocadas por sobretensión en una orilla metálica o punto a potencial de tierra.

La figura 39.1 muestra descargas corona producidas en un transformador.

FIGURA 40. El caso es similar al de la figura 39, sólo que la orilla metálica o punto está en un medio aislante líquido. Las descargas más grandes son las que primero aparecen y al disminuir la tensión, la extinción de las descargas coincide con la tensión de encendido. El encendido puede tardar unos pocos segundos para estabilizarse, después de esto, las descargas son inafectadas por el tiempo. Los cambios que pueda haber en la magnitud de las descargas son debidas a erosión producida por las mismas descargas.

FIGURA 41.

41.1: El arco de mercurio o tiristor rectificador o circuito de control produce un alto nivel de interferencia. La figura 41.1a presenta las descargas que producen las válvulas rectificadoras de arco de mercurio y la figura 41.1b las producidas por tiristores.

41.2: Descargas producidas por lámparas fluorescentes.

41.3: Descargas producidas por máquinas asíncronas.

FIGURA 42.

- 42.1:** Descargas producidas por recepción de transmisiones de radio o radiación de un amplificador de potencia a alta frecuencia u oscilador.
- 42.2:** Descargas por transmisiones radiofónicas.
- 42.3:** Descargas que produce el equipo industrial de alta frecuencia, tal como calentadores de inducción y generadores ultrasónicos.

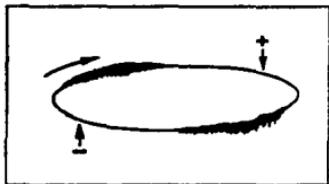


FIGURA 37.

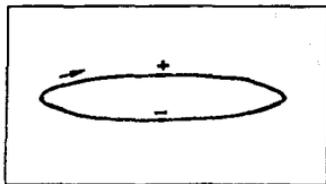


FIGURA 38.

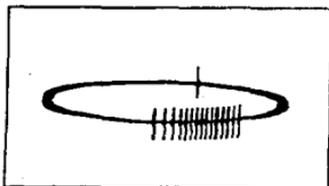


FIGURA 39.



39.1

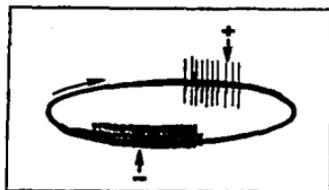
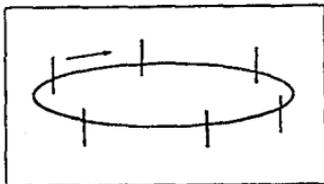
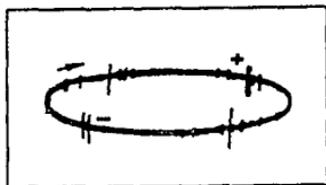


FIGURA 40.

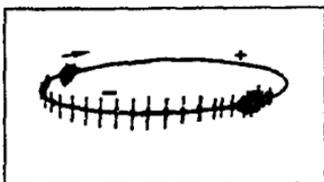


41.1a

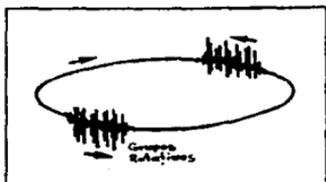


41.1b

41.1

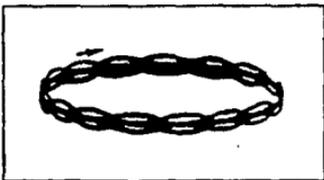


41.2



41.3

FIGURA 41.

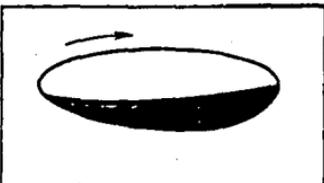


42.1



42.2

FIGURA 42.



42.3

2.4 Vías por las que se introduce la interferencia en el circuito de prueba de descargas parciales.

Existen cuatro distintas partes por las cuales la interferencia se introduce al circuito de prueba, las cuales son:

- a) Acoplamiento capacitivo.
- b) Acoplamiento inductivo.
- c) Acoplamiento por tierra.
- d) Acoplamiento via fuente de alta tensión.

ACOPLAMIENTO CAPACITIVO.

La interferencia puede introducirse dentro del circuito de prueba mediante las capacitancias C_{s1} o C_{s2} entre un conductor que lleva interferencia (por ejemplo el cableado principal) y el circuito de prueba, como lo muestra la figura 43a. Es más probable que ocurra en pruebas con aparatos de baja capacitancia, la cual si es extremadamente baja puede ser significativo.

ACOPLAMIENTO INDUCTIVO.

La interferencia puede introducirse al circuito de prueba mediante una inductancia mutua M entre un conductor que lleva interferencia y el circuito de prueba, esto se muestra en la figura 43b. Es muy posible que ocurra en pruebas con aparatos de alta capacitancia, una inductancia mutua extremadamente baja puede ser significativo.

ACOPLAMIENTO POR TIERRA.

La interferencia también se puede introducir al circuito de prueba por medio de las distintas conexiones de tierra, esto se muestra en la figura 43c. La corriente de interferencia se introduce por alguna conexión y sale por otra, creando una caída de tensión en el circuito de prueba.

ACOPLAMIENTO VIA FUENTE DE ALTA TENSION.

La fuente de alimentación puede traer consigo cierto nivel de interferencia, como se muestra en la figura 43d, las que al llegar al transformador elevador se amplifican, teniendo en el lado secundario de este un nivel más alto de las interferencias.

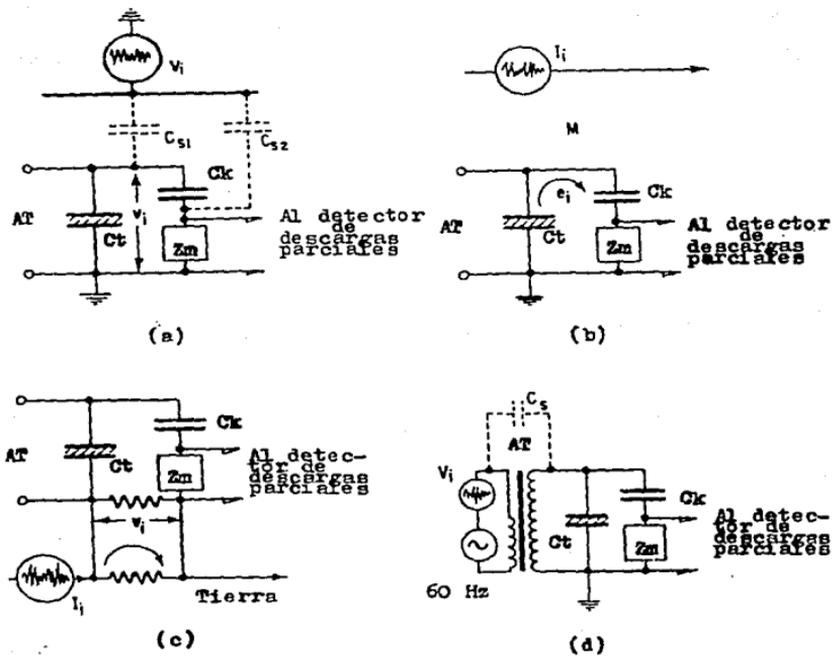


FIGURA 43 Las cuatro vías por las que puede ser acoplada la fuente de interferencia.

2.5 Eliminación de interferencias en el circuito de prueba de descargas parciales.

Las diferentes interferencias pueden afectar en forma seria las pruebas de descargas parciales, reduciendo la sensibilidad del detector de descargas, si éstas ocurren en forma más o menos continua y uniforme en magnitud. Cuando la interferencia se incrementa con el aumento de la tensión, la sensibilidad se ve proporcionalmente reducida, por ello, para tener una sensibilidad máxima, es importante que todos los componentes del circuito de prueba estén libres de descargas parciales a la máxima tensión de prueba y la interferencia que pueda presentarse reducirla al mínimo y emplear un detector equipado con osciloscopio para tener la máxima oportunidad de distinguir las verdaderas descargas que ocurren en el objeto de prueba.

Tener componentes libres de descargas parciales en el circuito de prueba es difícil y a la vez costoso; sin embargo, existen dispositivos y medidas que ayudan a evitar que las interferencias se presenten al hacer pruebas de descargas parciales, dichas medidas y dispositivos se tratan en el presente capítulo.

2.5.1 De las fuentes independientes de la tensión de prueba.

2.5.1.1. Fuentes no externas.

ALIMENTACION PRINCIPAL.

La alimentación del circuito de fuerza, puede llevar consigo interferencias que afectan las mediciones de las descargas parciales, la reducción se logra:

a) Utilizando un transformador de aislamiento con doble pantalla; con la pantalla primaria conectada a la tierra principal del sistema y la pantalla secundaria conectada a la red de tierra del laboratorio. Se elimina la componente asimétrica de la perturbación. La capacidad del transformador de aislamiento debe ser la misma que la del transformador elevador y estar libre de descargas parciales.

b) Insertando un filtro en el lado primario del transformador regulador de tensión. El filtro actúa como complemento del transformador de aislamiento en la eliminación de las interferencias. El filtro debe ser paso-bajas, ya que debe rechazar todas las frecuencias dentro del ancho de banda del detector de descargas parciales y dejar pasar la frecuencia de la tensión de prueba (60 Hz), debe soportar la corriente y tensión nominales del primario del transformador regulador.

c) Usando una fuente de tensión por circuito resonante, con resonancia sintonizada a la frecuencia de la tensión de prueba (60 Hz). Debe diseñarse de tal modo que la capacitancia a través del inductor sea baja en comparación con la capacitancia del circuito de prueba, la relación de estas dos capacitancias determina la atenuación de la interferencia a la frecuencia de detección.

d) Usando un circuito de prueba tipo puente, que no es más que el circuito de prueba con detector balanceado, pero modificado, como se muestra en la figura 44.

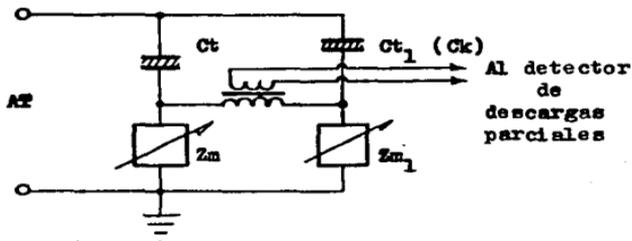


FIGURA 44 Circuito de prueba tipo puente.

Quando el puente está balanceado, hay una reducción en la interferencia de la tensión del lado de alto voltaje del circuito de prueba sin perjudicar las descargas del objeto bajo prueba. Para lograr un buen balance con un detector de banda ancha, se recomienda probar dos muestras construidas del mismo material aislante o dividir una sola muestra en dos partes.

Los circuitos balanceados son particularmente importantes, puesto que permiten distinguir de las descargas presentadas las que ocurren en el objeto de prueba y las producidas en otras partes del circuito de prueba o ruido de fondo. Con este tipo de circuito, en áreas de prueba industriales un nivel de disturbio de algunos cientos de pC puede reducirse abajo de 10 pC.

Para eliminar las interferencias de la alimentación, control y alumbrado se utiliza también un transformador de aislamiento, pudiendo ser de una pantalla y estar libre de descargas parciales.

TRANSFORMADOR REGULADOR DE TENSION.

El transformador regulador, permite variar la tensión desde cero hasta la de prueba, es un aparato que debe trabajar en forma continua (corriente nominal) a las diferentes tensiones de prueba.

La capacidad (kVA), debe ser la misma que del transformador elevador y estar libre de descargas parciales. Se recomienda que el regulador de tensión posea microswitchs de fin de carrera para que pueda ser energizado sólo cuando la tensión de salida sea mínima (cero).

Un regulador de tensión de escobillas (pasos) produce interferencias (descargas entre contactos) al variar la tensión, por lo que se recomienda emplear un regulador de tensión de bobina móvil. Si el regulador presenta descargas de magnitud considerable se puede colocar un filtro (paso-bajas) entre el regulador y el transformador elevador.

ALIMENTACION DE LA INSTRUMENTACION Y CONTROL.

La interferencia se elimina con un transformador de aislamiento, pudiendo ser de una pantalla o colocando en la alimentación un filtro.

SISTEMA DE TIERRAS.

La interferencia que se introduce por las conexiones de tierra, se elimina evitando sus múltiples conexiones, es decir, usar solamente un punto de conexión a tierra. Esto, en la práctica, es algunas veces difícil de realizar, puesto que la fuente de tensión y el detector de descargas son energizados de la alimentación principal y por ello puede ser asociado con partes de la red de tierra diferentes, de la cual el circuito de prueba está conectado para dar seguridad.

Las múltiples conexiones de tierra son inevitables, pero la situación puede mejorar algunas veces al instalar un sistema de tierra de baja impedancia consistente de tiras metálicas anchas o varios conductores conectados en paralelo.

Cuando se utiliza un solo punto de conexión a tierra, aún hay un acoplamiento capacitivo C_s entre el lado aterrizado del circuito y la tierra del sistema, como se muestra en la figura 45a. La interferencia debida a esta causa puede ser reducida interponiendo un conductor y conectándolo al punto de tierra común, como se muestra en la figura 45b.

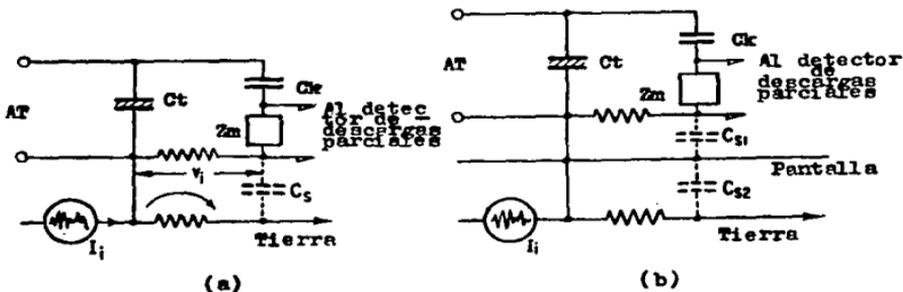


FIGURA 45 (a) Acoplamiento de tierra mediante capacitancia parásita C_s . (b) Eliminación por inserción de una pantalla.

2.5.1.2 Fuentes externas.

CAMPOS ELECTROMAGNETICOS EXTERNOS.

Cuando los disturbios externos como inducción electrostática o magnética, radiación electromagnética causada por pruebas de alta tensión en la vecindad, transmisiones de radio, etc. no pueden ser eliminadas, debe blindarse el circuito de prueba mediante una malla formando una caseta o jaula. La función de la caseta blindada consiste en proteger al circuito de prueba de las

perturbaciones de alta frecuencia; sin embargo, usualmente son ineficientes a la frecuencia de detección de las descargas parciales, que normalmente es de 10 kHz a 1 MHz, por lo que es menester tener un alto factor de blindaje (cuidadoso diseño). Al disminuir dichas perturbaciones, se incrementa la sensibilidad en la medición de las descargas parciales.

Si se quiere proteger al circuito de prueba sólo contra acoplamiento electrostático, se emplea malla metálica extendida (lámina de aluminio) u hoja metálica delgada.

La caseta blindada, también llamada 'Jaula de Faraday', puede ser de malla metálica, lámina de cobre, aluminio o acero, esto depende del aspecto económico y de la sensibilidad que se requiera.

Se obtiene un blindaje efectivo con lámina metálica cuando el espesor es mayor en comparación con la profundidad de penetración de la perturbación a la frecuencia de detección (0.7-0.07 mm para el cobre, 0.9-0.09 para el aluminio y aproximadamente 0.2-0.02 para el acero en el rango de frecuencias de 10 kHz a 1 MHz).

La eficiencia de un blindaje depende del grado de filtración por aberturas y conexiones; las pequeñas aberturas pueden tener un efecto importante. En estructuras electrostáticas y magnéticas, dichas filtraciones pueden reducirse usando cinta adhesiva conductora (metálica) y cinta adhesiva magnética respectivamente. Las uniones de láminas y mallas deben tener una baja resistencia, para que el blindaje sea efectivo.

Las filtraciones también son de importancia en cables de alimentación y medición dentro de la jaula, que también pueden tener pequeñas aberturas. El efecto se reduce conectando todas sus pantallas a un solo punto de la jaula, si algún cable tiene doble pantalla, se conecta la pantalla exterior.

Para una alta sensibilidad en las mediciones de las descargas parciales, es ventajoso emplear doble blindaje aislado entre sí y unido sólo en un punto, que es por donde entran los cables de alimentación, en este punto se conectan también las pantallas de los cables de alimentación y medición anteriores.

Además de los anterior, la jaula debe aislarse del piso y aterrizarse en un solo punto.

Los instrumentos de medición y control pueden estar dentro de la jaula, pero también en el exterior, en este caso deberán blindarse con malla metálica.

Dentro de la jaula, respecto a la iluminación, para evitar disturbios por iluminación fluorescente puede emplearse alumbrado incandescente, además, si la jaula está totalmente blindada,

deberá instalarse aire acondicionado para disipar el calor y filtrar cualquier alimentación eléctrica o telefónica que entre en la jaula.

2.5.2 De las fuentes asociadas con la tensión de prueba.

TRANSFORMADOR ELEVADOR DE TENSION.

Un transformador elevador libre de descargas parciales es antieconómico y difícil de obtener, por ello se debe ser cuidadoso al seleccionar el nivel máximo permisible de descargas como ruido de fondo. En laboratorios de investigación, como el caso del Laboratorio de Salazar, el nivel máximo permisible es de una fracción de pC; para laboratorios de pruebas de rutina es de algunos pC.

Si el transformador elevador, presenta descargas en un nivel alto en comparación con la sensibilidad que se requiere, se puede usar un filtro en el lado de alta tensión del transformador, no siendo el detector de descargas de banda ancha, pues si lo fuera dicho filtro resulta costoso. El filtro, además de disminuir las interferencias del transformador actúa como una alta impedancia (10 a 20 k Ω) para eliminar la posibilidad de que la corriente de interferencia circule por la capacitancia parásita del transformador, también evita que las descargas parciales provenientes del objeto de prueba afecten al transformador elevador (fuente de tensión).

CONECTORES Y TERMINALES DE ALTA TENSION.

Las descargas corona ocurren en estas partes, debido a un diseño inadecuado de los conectores y a no evitar puntas agudas o filosas en los terminales de alta tensión (como en bushings de transformadores y capacitores, finales de cables y terminales, etc.). Para disminuir dicho efecto, se emplean en las terminales esferas lisas de cobre o aluminio de diámetro suficiente; sin embargo, para tensiones elevadas, las desventajas de las esferas son su costo y difícil manejo. Para solucionar este problema, se utilizan estructuras toroidales, las cuales presentan ventajas sobre las esferas, pueden ser introducidas sin arreglos especiales en las terminales; pueden ser acopladas en diferentes formas entre sí, por ejemplo, uno o dos toroides acoplados en forma coaxial con sus planos paralelos, tres formando un triángulo, cuatro formando un tetraedro, etc. en general se emplea un arreglo de uno o dos toroides, según la capacidad del equipo en que se requiera.

Los conectores de alta tensión deben ser lisos, de forma cilíndrica y de diámetro adecuado a la tensión de prueba.

CAPACITOR DE ACOPLAMIENTO.

Un capacitor de acoplamiento libre de descargas, al igual que el transformador elevador, es antieconómico y difícil de obtener. Cuando se tiene un nivel considerable de descargas en el capacitor, es preferible utilizar un circuito balanceado, en el que se usan dos objetos de prueba y uno de ellos puede considerarse como capacitor de acoplamiento.

ACOPLAMIENTO CAPACITIVO.

La interferencia se puede reducir:

- a) Interponiendo una malla metálica.
- b) Encerrando el circuito de prueba con pantalla electrostática.
- c) Usar un circuito de prueba balanceado, como el mostrado en la figura 44.
- d) Intercambiando C_t por C_k y haciendo C_k más grande que C_t cuando el acoplamiento es vía C_{s1} (figura 43a).

ACOPLAMIENTO INDUCTIVO.

Si se tiene acoplada la impedancia de medición Z_m con el detector de descargas parciales mediante un transformador de aislamiento, también hay acoplamiento inductivo de la interferencia entre el cable que la lleva y el transformador de aislamiento, debido a la alta inductancia de éste, provocando que la interferencia se introduzca al circuito de prueba vía circuito de medición.

Variar el nivel de la interferencia se puede lograr:

- a) Rearreglando el circuito de prueba.
- b) Girando el cable que lleva la interferencia.
- c) Girando el transformador de aislamiento.

Para reducir el nivel puede lograrse:

- a) Reduciendo el circuito de prueba.
- b) Encerrando el circuito de prueba en una pantalla electromagnética o por neutralización.

La reducción de la interferencia por neutralización puede lograrse incluyendo en el circuito de prueba una bobina con núcleo de aire y ajustarla para dar una salida que contrarreste la interferencia en el circuito de prueba. La bobina puede ir conectada en serie con el circuito de prueba, como se indica en la figura 46, puede rotarse hasta obtener una respuesta mínima de la interferencia. La eficiencia de este método se ve limitada por:

- a) La interferencia puede venir de más de una fuente.
- b) El balance no puede llevarse a cabo en toda la banda de frecuencia de detección.
- c) El ajuste depende en gran medida, de la disposición del circuito de prueba.

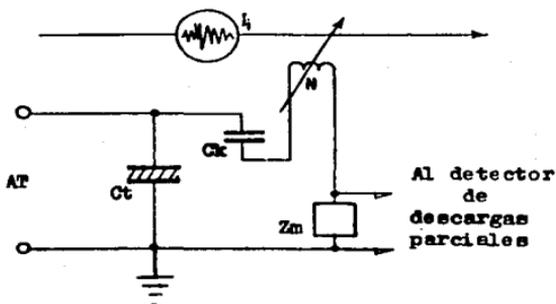


FIGURA 46 Neutralización de la interferencia por acoplamiento inductivo mediante bobina con núcleo de aire.

DEL MEDIO DE TRANSMISION DE LOS PULSOS DE DESCARGA DEL CIRCUITO DE PRUEBA AL DETECTOR DE DESCARGAS PARCIALES.

Disminuir las interferencias captadas por los cables de conexión de la impedancia de medición al detector de descargas parciales, puede lograrse empleando cable coaxial de una o doble pantalla; cuando es de una pantalla, se recomienda aterrizar el extremo del lado del circuito de prueba; sin embargo, puede fluir una corriente de interferencia producida por el efecto capacitivo entre el otro extremo y el sistema de tierra, esto se muestra en la figura 47.

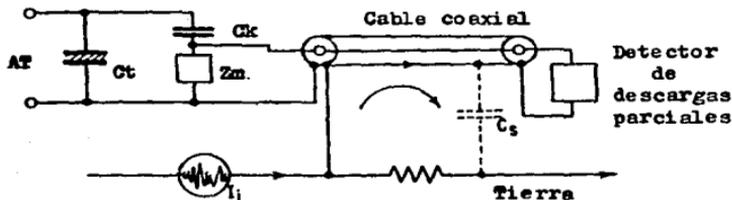


FIGURA 47 Acoplamiento por tierra via capacitancia parásita entre la pantalla de un cable coaxial y tierra.

Debe tenerse cuidado de que el largo del cable, no se aproxime a un cuarto de la longitud de onda de la frecuencia de detección, porque entonces, la corriente de interferencia se incrementa por resonancia, cuando ocurre esto, es recomendable multiples aterrizamientos de la pantalla. La eficiencia de un cable coaxial de una sola pantalla no es muy buena a la frecuencia de detección normal de descargas parciales (10 kHz a 1 MHz); sin embargo, la eficiencia se puede mejorar envolviendo el cable coaxial con cinta de alta permeabilidad magnética.

Cuando el cable coaxial es de doble pantalla, (la cual es preferible), además de la condición para el de una sola pantalla, se recomienda aterrizar ambos extremos de la pantalla exterior. El circuito formado por la pantalla exterior y el retorno de tierra debe ser tan pequeño como sea posible, también se recomienda que el cable sea tan corto como se pueda. En este tipo de cable la corriente de interferencia fluirá por la malla externa.

En ambos casos (simple y doble pantalla), el blindaje eficiente

lo determina la impedancia superficial de transferencia, la cual se define como la relación de voltaje transferido U (de acuerdo a la longitud l del cable) a la corriente i que fluye en la malla:

$$Z(\omega) = \frac{U(\omega)}{i(\omega) l} \quad \omega = 2\pi f$$

Los conectores de cable coaxial presentan un ancho rango de impedancia superficial de transferencia, si éstos están mal diseñados o si el contacto entre ellos es malo, la eficiencia del cable puede disminuir. A continuación se da una lista de las impedancias superficiales de transferencia para ciertos cables a 5 MHz:

- Cable coaxial de una sola pantalla 25-50 mV/A.m
- Cable coaxial de doble pantalla 5-15 mV/A.m
- Conductor doble con dos pantallas entrelazadas 5 mV/A.m
- Conductor doble con una sola pantalla 100 mV/A.m

La figura 48, muestra las curvas de la impedancia superficial de transferencia medida en varios tipos de cables hasta 10 MHz.

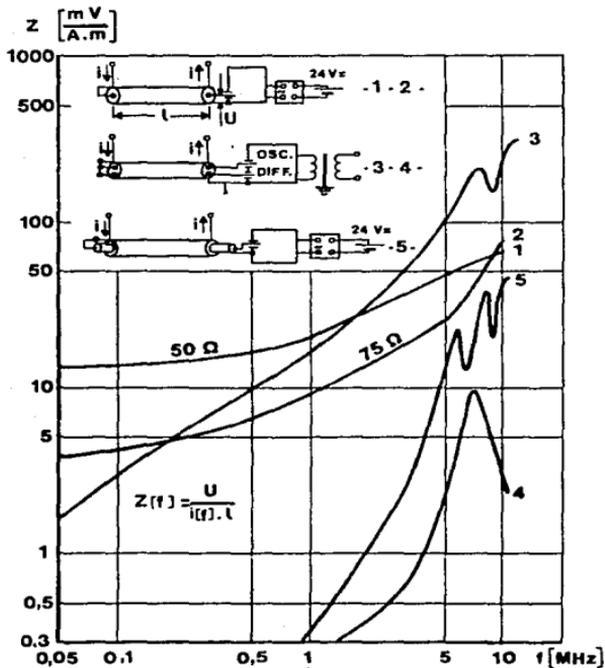


FIGURE 48 Impedancia superficial de transferencia para varios tipos de cables:

- 1-2: Cable coaxial de una pantalla.
- 3: Conductor doble con una sola pantalla trenzada.
- 4: Conductor doble con dos pantallas cruzadas y trenzadas.
- 5: Cable coaxial con doble pantalla.

La lista y figura anteriores, muestran que son preferibles los cables coaxiales de doble pantalla a los de una pantalla, así como los conductores dobles con dos pantallas trenzadas sobre los de una pantalla.

RUIDO DE CONTACTO.

Son causa de disturbio los malos contactos o el mal aterrizamiento.

El aparato que se está probando puede tener este efecto, como por ejemplo los capacitores, los cuales contienen pequeñas piezas metálicas que hacen contacto mediante presión, pero que no están soldadas, éstas partes deben soldarse.

En transformadores, el cambiador de derivaciones o la pobre conexión a tierra de una boquilla causa interferencias, que no son peligrosas para el dieléctrico; sin embargo, reduce la resolución en la medición de las descargas parciales.

En cables con aislamiento de plástico, la interferencia puede generarse en una capa semiconductor entre el aislamiento y la parte conductora disminuyendo sensibilidad en la medición, esto tal vez no pueda eliminarse, pero para aumentar la sensibilidad del circuito se puede ir decrementando la impedancia de medición.

Para tener una idea más clara de las fuentes de perturbación, así como sus formas de eliminación se da la tabla 6.

| | INTERFERENCIA | ELIMINACIÓN. |
|-------------------------------------|--|--|
| CAPTACIÓN. | <p>Interferencia en la alimentación principal.</p> <p>Pruebas adyacentes de alta tensión.</p> <p>Ondas de radio y televisión.</p> <p>Descargas inductivas.</p> | <p>Conectar un filtro en los conectores de alimentación y/o en la línea de alta tensión.</p> <p>Utilizar un detector balanceado.</p> <p>Blindar. Quitar las pruebas.</p> <p>Blindar. Utilizar un detector libre de señales de radio.</p> <p>Colocar un filtro antes del detector.</p> <p>Eliminar la causa. Blindar.</p> |
| DESCARGAS EN EL CIRCUITO DE PRUEBA. | <p>Fuente de alta tensión.</p> <p>Línea de alta tensión - - (conectores).</p> <p>Capacitor de acoplamiento.</p> <p>Terminales. Descargas en los conductores, buses, - etc.</p> | <p>Transformador libre de descargas parciales.</p> <p>Filtro en la línea de alta tensión, usar detector balanceado.</p> <p>Línea de alta tensión libre de descargas parciales.</p> <p>Filtro en el final de la línea de A.T., usar detector balanceado.</p> <p>Capacitor de acoplamiento libre de descargas parciales o probar dos muestras al mismo tiempo.</p> <p>Terminales, buses, etc., - deben estar libres de descargas parciales; emplear detector balanceado.</p> |
| RUIDO POR MALOS CONTACTOS. | <p>Ruido por mal contacto en el circuito de prueba.</p> <p>Ruido por mal contacto en la boquilla, en el cambiador de derivaciones o el aterrisamiento de el núcleo de transformadores.</p> | <p>Buenas conexiones y aterrisamiento.</p> <p>Verificación de los contactos antes de la prueba.</p> |

TABLA 6 Origen de interferencias y su forma de eliminación.

CAPITULO III

TENSION APLICADA

La prueba de tensión aplicada es otra de las diferentes técnicas que se emplean para la evaluación de los aislamientos en transformadores. Tal prueba tiene por objeto comprobar el aislamiento entre los devanados de alta y baja tensión a tierra y se verifica que tan homogéneo es el aislamiento. Esta técnica ya se usaba en la década de los veinte, y fue el primer parámetro que se tuvo para evaluar las características de los materiales aislantes y equipos eléctricos.

1 Recomendaciones de Norma.

La prueba se realiza con el equipo adecuado, cuidados necesarios y conforme a normas vigentes. Las normas como la IEEE No. 4 - USAS C68.1, 1968, 'Techniques for Dielectric Tests' y la IEEE Std. 4, 1978, 'Standard Techniques for High-Voltage Testing', recomiendan que el voltaje a aplicar sobre el objeto a probar debe ser alimentado, ya sea por un transformador elevador o por medio de un circuito resonante serie, comúnmente se emplea para realizar la prueba el transformador elevador. El circuito de alta tensión empleado para la prueba de descargas parciales también se usa para la prueba de tensión aplicada.

El transformador elevador para esta prueba, según las normas arriba mencionadas, no debe liberar una corriente mayor a 1 A rms, esto para evitar que el voltaje aplicado al objeto de prueba descienda o se distorciona, el voltaje debe ser lo más estable posible y ser inafectado por alguna variación de corriente. Para elementos a probar que ya hayan sido operados en servicio normal (su fortaleza dieléctrica se encuentra disminuida), es posible que se requiera una corriente mayor a 1 A rms, para tener la estabilidad en el voltaje. Además de la condición anterior, deben cumplir otras, como tener en el circuito de alta tensión electrodos y conectores apropiados (esferas y tubos cilíndricos)

para evitar las descargas corona y cumplir el transformador los mismos requerimientos que para la prueba de descargas parciales, (ver capítulo II).

2 Calibración del transformador elevador.

El transformador elevador, debe estar calibrado adecuadamente para obtener en el lado secundario un voltaje que concuerde con el del lado primario, de acuerdo a la relación de transformación.

La calibración puede realizarse de dos maneras:

- Calibración mediante voltmetro de esferas.
- Calibración mediante divisor de voltaje.

2.1 Calibración mediante voltmetro de esferas.

La calibración se lleva a cabo con un voltmetro de esferas y la indicación de un voltmetro, oscilógrafo u otro dispositivo conectado en el circuito de control del circuito de alta tensión.

El voltaje que se mide con el voltmetro de esferas, se deriva del espacio entre las esferas, a un voltaje dado ocurre descarga disruptiva. Mediante tablas se determina la relación entre distancia y voltaje.

El procedimiento que se sigue para la calibración es el siguiente:

Se aplica voltaje con una amplitud suficientemente baja para que no cause descarga disruptiva durante el cambio de voltaje, se incrementa lentamente para que el indicador de bajo voltaje puede leerse exactamente en el instante de la descarga disruptiva en el espacio. Alternativamente un voltaje constante puede ser aplicado a que cruce el gap y reducido lentamente el espacio entre las esferas hasta que ocurra la descargas disruptiva.

A Descarga disruptiva: Es el arco eléctrico que puentea dos electrodos.

para evitar las descargas corona y cumplir el transformador los mismos requerimientos que para la prueba de descargas parciales, (ver capítulo II).

2 Calibración del transformador elevador.

El transformador elevador, debe estar calibrado adecuadamente para obtener en el lado secundario un voltaje que concuerde con el del lado primario, de acuerdo a la relación de transformación.

La calibración puede realizarse de dos maneras:

- Calibración mediante voltmetro de esferas.
- Calibración mediante divisor de voltaje.

2.1 Calibración mediante voltmetro de esferas.

La calibración se lleva a cabo con un voltmetro de esferas y la indicación de un voltmetro, oscilógrafo u otro dispositivo conectado en el circuito de control del circuito de alta tensión.

El voltaje que se mide con el voltmetro de esferas, se deriva del espacio entre las esferas, a un voltaje dado ocurre descarga disruptiva. Mediante tablas se determina la relación entre distancia y voltaje.

El procedimiento que se sigue para la calibración es el siguiente:

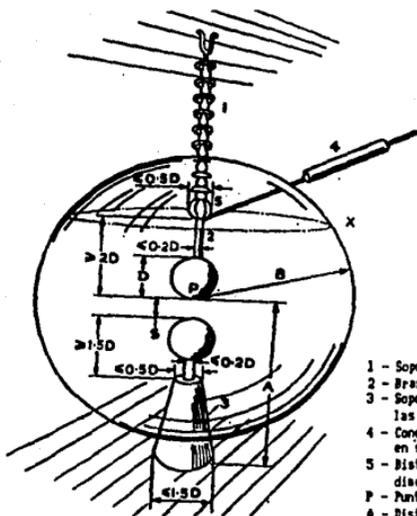
Se aplica voltaje con una amplitud suficientemente baja para que no cause descarga disruptiva durante el cambio de voltaje, se incrementa lentamente para que el indicador de bajo voltaje puede leerse exactamente en el instante de la descarga disruptiva en el espacio. Alternativamente un voltaje constante puede ser aplicado a que cruce el gap y reducido lentamente el espacio entre las esferas hasta que ocurra la descargas disruptiva.

A Descarga disruptiva: Es el arco eléctrico que puentea dos electrodos.

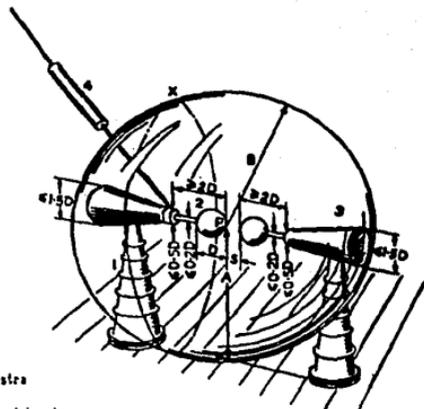
Polvo o material fibroso en el aire puede afectar la medición, ya que pueden ocurrir bajas y numerosas descargas y puede ser necesario realizar numerosas pruebas antes de obtener resultados consistentes. La medición final puede ser la media de tres lecturas sucesivas que concuerden dentro de un 3 %.

La figura 1, muestra al voltmetro de esferas en sus dos modalidades y la tabla 1, la relación de distancias entre esferas, voltaje y diámetro de esferas.

AA Gap: Espacio entre los electrodos que forman las esferas.



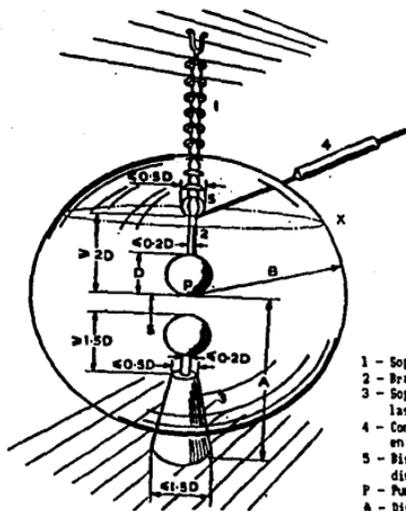
VERTICAL



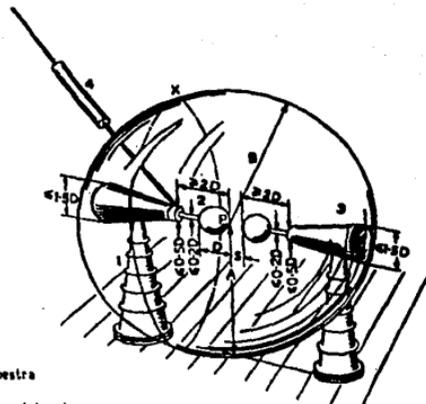
HORIZONTAL

- 1 - Soporte aislante.
- 2 - Brazo de esfera.
- 3 - Soporte de brazo y esfera, muestra las máximas dimensiones.
- 4 - Conexión de alto voltaje con resistencia en serie.
- 5 - Distribuidor de esfuerzo, muestra máximas dimensiones.
- P - Punta de chispeo de la esfera de alto voltaje.
- A - Distancia de P al plano de tierra.
- B - Radio del espacio libre de la estructura externa.
- X - El elemento 4 no pasa através del plano dentro de una distancia B desde P.

FIGURA 1 Voltmetros de esferas típicos usados en calibración de transformadores de alto voltaje.



VERTICAL



HORIZONTAL

- 1 - Soporte aislante.
- 2 - Brazo de esfera.
- 3 - Soporte de brazo y esfera, muestra las adexas dimensiones.
- 4 - Conexión de alto voltaje con resistencia en serie.
- 5 - Distribuidor de esfuerzo, muestra adexas dimensiones.
- P - Punto de chispeo de la esfera de alto voltaje.
- A - Distancia de P al plano de tierra.
- B - Radio del espacio libre de la estructura externa.
- X - El elemento 4 no pasa através del plano dentro de una distancia B desde P.

FIGURA 1 Voltmetros de esferas típicos usados en calibración de transformadores de alto voltaje.

Kilovolts pico a 20 grados C: 1013 milibars

!Espacio entre!
!las esferas,!

Díámetro de esferas, cm

| cm | 2 | 5 | 6.25 | 10 | 12.5 | 15 | 25 | 50 | 75 | 100 | 150 | 200 |
|------|---|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|-----|-----|-----|
| 0.05 | | (88.5) | (95.0) | 109 | 108 | 110 | 112 | 112 | 112 | 112 | | |
| 0.10 | | | (101) | 115 | 119 | 122 | 125 | 125 | 125 | 125 | | |
| 0.15 | | | (107) | 123 | 129 | 133 | 137 | 138 | 138 | 138 | 138 | |
| 0.20 | | | | (131) | 138 | 143 | 149 | 151 | 151 | 151 | 151 | |
| 0.25 | | | | (138) | 146 | 152 | 161 | 164 | 164 | 164 | 164 | |
| 0.30 | | | | (144) | (154) | 161 | 173 | 177 | 177 | 177 | 177 | |
| 0.40 | | | | (150) | (161) | 169 | 184 | 189 | 190 | 190 | 190 | |
| 0.50 | | | | (155) | (168) | 177 | 195 | 202 | 203 | 203 | 203 | |
| 0.60 | | | | | (174) | (185) | 206 | 214 | 215 | 215 | 215 | |
| 0.70 | | | | | (185) | (198) | 226 | 239 | 240 | 241 | 241 | |
| 0.80 | | | | | (195) | (209) | 244 | 263 | 265 | 266 | 266 | 266 |
| 0.90 | | | | | | (219) | 261 | 286 | 290 | 292 | 292 | 292 |
| 1.0 | | | | | | (229) | 275 | 309 | 315 | 318 | 318 | 318 |
| 1.2 | | | | | | | (289) | 331 | 339 | 342 | 342 | 342 |
| 1.4 | | | | | | | (302) | 353 | 363 | 366 | 366 | 366 |
| 1.5 | | | | | | | (314) | 373 | 387 | 390 | 390 | 390 |
| 1.6 | | | | | | | (326) | 392 | 410 | 414 | 414 | 414 |
| 1.8 | | | | | | | (337) | 411 | 432 | 438 | 438 | 438 |
| 2.0 | | | | | | | (347) | 429 | 453 | 462 | 462 | 462 |
| 2.2 | | | | | | | (357) | 445 | 473 | 486 | 486 | 486 |
| 2.4 | | | | | | | (366) | 460 | 492 | 510 | 510 | 510 |
| 2.6 | | | | | | | | 489 | 530 | 555 | 560 | 560 |
| 2.8 | | | | | | | | 515 | 565 | 595 | 610 | 610 |
| 3.0 | | | | | | | | (540) | 600 | 635 | 635 | 660 |
| 3.5 | | | | | | | | (565) | 635 | 675 | 700 | 705 |

TABLA 1 Relación de distancias entre esferas, voltaje y diámetro de esferas.

| Kilovolts pico a 20 grados C: 1013 milibars | | | | | | | | | | | | |
|---|-------------------------|--------|--------|------|------|------|------|------|------|------|-----|-----|
| Espacio entre las esferas, cm | Diámetro de esferas, cm | | | | | | | | | | | |
| | 2 | 5 | 6.25 | 10 | 12.5 | 15 | 25 | 50 | 75 | 100 | 150 | 200 |
| 0.05 | 2.8 | | | | | | | | | | | |
| 0.10 | 4.7 | | | | | | | | | | | |
| 0.15 | 6.4 | | | | | | | | | | | |
| 0.20 | 8.0 | 8.0 | | | | | | | | | | |
| 0.25 | 9.6 | 9.6 | | | | | | | | | | |
| 0.30 | 11.2 | 11.2 | | | | | | | | | | |
| 0.40 | 14.4 | 14.3 | 14.2 | | | | | | | | | |
| 0.50 | 17.4 | 17.4 | 17.2 | 16.8 | 16.8 | 16.8 | | | | | | |
| 0.60 | 20.4 | 20.4 | 20.2 | 19.9 | 19.9 | 19.9 | | | | | | |
| 0.70 | 23.2 | 23.4 | 23.2 | 23.0 | 23.0 | 23.0 | | | | | | |
| 0.80 | 25.8 | 25.3 | 26.2 | 26.0 | 26.0 | 26.0 | | | | | | |
| 0.90 | 28.3 | 29.2 | 29.1 | 28.9 | 28.9 | 28.9 | | | | | | |
| 1.0 | 30.7 | 32.0 | 31.9 | 31.7 | 31.7 | 31.7 | 31.7 | | | | | |
| 1.2 | (35.1) | 37.6 | 37.5 | 37.4 | 37.4 | 37.4 | 37.4 | | | | | |
| 1.4 | (38.5) | 42.9 | 42.9 | 42.9 | 42.9 | 42.9 | 42.9 | | | | | |
| 1.5 | (40.0) | 45.5 | 45.5 | 45.5 | 45.5 | 45.5 | 45.5 | | | | | |
| 1.6 | | 48.1 | 48.1 | 48.1 | 48.1 | 48.1 | 48.1 | | | | | |
| 1.8 | | 53.0 | 53.5 | 53.5 | 53.5 | 53.5 | 53.5 | | | | | |
| 2.0 | | 57.5 | 58.5 | 59.0 | 59.0 | 59.0 | 59.0 | 59.0 | 59.0 | | | |
| 2.2 | | 61.5 | 63.0 | 64.5 | 64.5 | 64.5 | 64.5 | 64.5 | 64.5 | | | |
| 2.4 | | 65.5 | 67.5 | 69.5 | 70.0 | 70.0 | 70.0 | 70.0 | 70.0 | | | |
| 2.6 | | (69.0) | 72.0 | 74.5 | 75.0 | 75.5 | 75.5 | 75.5 | 75.5 | | | |
| 2.8 | | (72.5) | 76.0 | 79.5 | 79.5 | 80.0 | 81.0 | 81.0 | 81.0 | | | |
| 3.0 | | (75.5) | 79.5 | 84.0 | 85.0 | 85.5 | 86.0 | 86.0 | 86.0 | 86.0 | | |
| 3.5 | | (82.5) | (87.5) | 95.0 | 97.0 | 98.0 | 99.0 | 99.0 | 99.0 | 99.0 | | |

TABLA 1 (Continuación) Relación de distancias entre esferas, voltaje y diámetro de esferas.

2.2 Calibración mediante divisor de voltaje.

La calibración se realiza conectando en el lado secundario del transformador elevador, un divisor de voltaje patrón que junto con un voltmetro (Vcal), calibrado, darán el valor de lectura patrón. La lectura patrón se compara con las lecturas de:

- El voltmetro del propio circuito de alta tensión (situado en el equipo de medición y control) que indica los kV en el lado secundario del transformador elevador.
- Voltmetro (V), en el lado primario del transformador elevador conectado mediante el transformador de potencial.

Con ello se obtendrá un factor de error de medición en X.

El arreglo para la calibración en el circuito de alta tensión se muestra en la figura 2 siguiente:

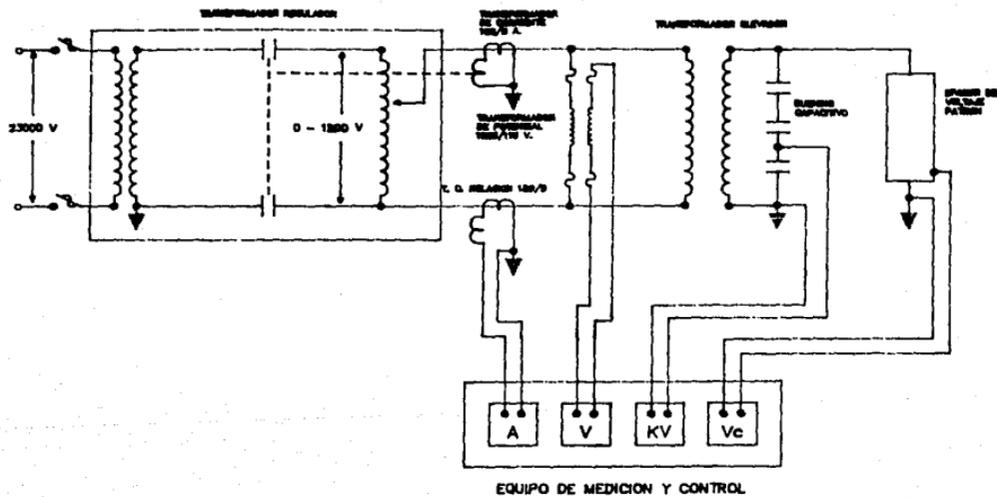


FIGURA 2

Así, el voltaje que realmente produce en su salida el transformador será:

$$V_{\text{divisor}} = (V_{\text{cal}}) (\text{relación del divisor}) \quad (1)$$

Las lecturas de los voltímetros V y kV afectados por el factor de error deberán dar el voltaje real:

$$V_{\text{sec}} = (kV) (\% \text{ error}) = (V) (\text{relac. TP}) (\text{relac. transf.}) \quad (2)$$

así:

$$V_{\text{divisor}} = V_{\text{sec}} \quad (3)$$

3 Procedimiento de prueba.

La prueba de tensión aplicada tiene una duración de 1 minuto y se realiza a frecuencia industrial (60 Hz). Los devanados primarios deben cortocircuitarse al igual que los devanados secundarios, pero éstos, además, a tierra.

El procedimiento de prueba que se sigue es el siguiente:

Aplicar al objeto de prueba, un voltaje con un valor suficientemente bajo para prevenir algún efecto de sobrevoltaje debido a transitorios por switcheo (cambio del voltaje al incrementarlo), se incrementa lentamente para permitir una lectura exacta del instrumento de medición, pero no tan lento como para que cause una prolongación innecesaria del voltaje sobre el objeto de prueba cerca del voltaje de prueba, se mantiene el nivel de voltaje durante el tiempo especificado y en seguida decrementarlo rápidamente, pero no interrumpirlo repentinamente, ya que pueden generarse transitorios por switcheo que pueden causar daño o resultados de prueba erráticos.

4 Efectos en los aislamientos durante la prueba.

El aislamiento de los transformadores, está constituido en unos por aislantes líquidos, en otros por aislantes sólidos y líquidos y otros más con aislantes sólidos y gaseosos. Al aplicar voltaje a un transformador, pueden ocurrir dentro de él, en sus aislamientos, efectos eléctricos asociados con descargas

disruptivas. Estos efectos pueden ser nocivos para el aislamiento y provocar pérdidas en el transformador que pueden ser permanentes o temporales.

Las descargas disruptivas que pueden ocurrir son:

1. **Sparkover:** Descarga disruptiva que ocurre en dieléctricos líquidos o gaseosos.
2. **Flashover:** Descarga disruptiva que ocurre sobre la superficie de un dieléctrico sólido en un medio líquido o gaseoso.
3. **Puncture:** Descarga disruptiva que ocurre a través de un dieléctrico sólido.

Las descargas disruptivas que dañan al transformador, son las que ocurren en los aislantes sólidos y son las que ocasionan las pérdidas permanentes; en los aislantes líquidos y gaseosos, las pérdidas son temporales.

Cuando un elemento falla en la prueba de tensión aplicada, es porque se puentea el aislamiento que se está probando, así, el voltaje entre los electrodos desciende a cero o cerca de cero.

El voltaje de pruebas sobre el elemento, provoca efecto corona en aristas conductoras sometidas a la alta tensión, esto hace que el medio gaseoso en torno a la arista (aire) se ionice o cargue, provocando que la descarga disruptiva o arco entre los electrodos ocurra por fuera del elemento, en cuyo caso no se está probando el aislamiento interno. Para uniformizar el efecto corona y al mismo tiempo reducirlo, se colocan en las aristas del elemento, esferas de aluminio.

Si durante la prueba no ocurre descarga disruptiva, entonces el elemento pasó la prueba, así se garantiza que el elemento no sufrirá descargas disruptivas a su voltaje nominal de operación.

El voltaje de prueba de tensión aplicada es mayor al voltaje nominal de operación.

5 Pruebas de tensión aplicada y descargas parciales.

Durante la prueba de tensión aplicada, pueden realizarse mediciones de descargas parciales en transformadores con aislamiento completo, donde el aislamiento de ambos extremos de los devanados de alta tensión son equivalentes, es decir, que todas las partes de los devanados de alta tensión están

igualmente aislados con respecto a tierra.

Muchos fabricantes nacionales no tienen incluída en las pruebas prácticas a transformadores, la prueba de descargas parciales, que es tanto más importante que la prueba de tensión aplicada. Cuando sí se tiene incluída, se debe determinar si la prueba de tensión aplicada se practicará antes o después de la prueba de descargas parciales.

Algunos fabricantes de transformadores practican a todos sus elementos de alta tensión, en forma simultánea, las pruebas de tensión aplicada y descargas parciales.

El procedimiento que se sigue es el que se describe a continuación:

Al elemento bajo prueba se le aplica el voltaje especificado para la prueba de descargas parciales, se espera el tiempo también especificado y se determina el nivel de descargas parciales, en seguida se incrementa el valor de voltaje al voltaje de prueba de tensión aplicada, se espera el tiempo especificado y a continuación se disminuye el voltaje determinado para nuevamente la prueba de descargas parciales, esperar el tiempo definido y determinar el tiempo de descargas parciales.

La prueba de tensión aplicada, también se practica entre devandos secundarios; entre ellos y con relación a tierra. El voltaje de prueba es diferente al aplicado a los devandos primarios y secundarios a tierra. En transformadores de instrumento se aplican 2.5 kV por Normas ANSI y 2 kV por Normas IEC.

Si existen defectos en el aislamiento, se observarán en las lecturas de los instrumentos de medición: el voltmetro indicará una disminución en el voltaje aplicado y el amperímetro un aumento en la corriente. El nivel de descargas parciales en este caso se incrementa.

La prueba de tensión aplicada también se conoce como prueba dieléctrica.

6 Niveles de aislamiento y tensiones de prueba.

El voltaje de prueba aplicado a transformadores, sean de instrumento (transformadores de corriente y potencial), de potencia o distribución, es determinado con base a la tensión nominal de aislamiento. Esta define el nivel de aislamiento de

los aparatos.

Las tablas 2, 3, 4 y 5 muestran el nivel de voltaje de tensión aplicada para transformadores con diferentes niveles de aislamiento.

TABLA 2 Clases de aislamiento y valores para la prueba dieléctrica para transformadores de instrumento (normas ANSI).

| CLASE DE AISLAMIENTO | PRUEBA DE FRECUENCIA INDUSTRIAL (kV) | CLASE DE AISLAMIENTO | PRUEBA DE FRECUENCIA INDUSTRIAL (kV) |
|----------------------|--------------------------------------|----------------------|--------------------------------------|
| 0.6 | 4 | 180 | 360 |
| 1.2 | 10 | 196 | 395 |
| 2.5 | 15 | 215 | 430 |
| 5.0 | 19 | 230 | 460 |
| 8.7 | 26 | 260 | 520 |
| 15 | 34 | 287 | 575 |
| 15 | 34 | 315 | 630 |
| 18 | 40 | 345 | 690 |
| 25 | 50 | 375 | 750 |
| 34.5 | 70 | 400 | 800 |
| 46 | 95 | 430 | 860 |
| 69 | 140 | 460 | 920 |
| 92 | 185 | 490 | 980 |
| 115 | 230 | 520 | 1040 |
| 138 | 275 | 545 | 1090 |
| 161 | 325 | | |

TABLA 3 Clases de aislamiento y valores para la prueba dieléctrica en transformadores de distribución sumergidos en líquido aislante (normas CCONNIEA).

| CLASE DE AISLAMIENTO | PRUEBA DE FRECUENCIA INDUSTRIAL (kV) |
|----------------------|--------------------------------------|
| 1.2 | 10 |
| 2.5 | 15 |
| 5.0 | 19 |
| 8.7 | 26 |
| 15.0 | 34 |
| 25.0 | 50 |
| 34.5 | 70 |
| 46.0 | 95 |
| 69.0 | 140 |

TABLA 4 Clases de aislamiento y valores para la prueba dieléctrica en transformadores de distribución tipo seco (normas CCONNIEA).

| CLASE DE AISLAMIENTO KV CRESTA | PRUEBA DE FRECUENCIA INDUSTRIAL (KV) |
|-----------------------------------|---|
| 1.2 | 4 |
| 2.5 | 10 |
| 5.0 | 12 |
| 8.7 | 19 |
| 15.0 | 31 |

TARLA 5 Clases de aislamiento y valores para la prueba dieléctrica en transformadores de potencia sumergidos en aceite (normas CCONNIEA).

| CLASE DE AISLAMIENTO | PRUEBA DE FRECUENCIA INDUSTRIAL (kV) |
|----------------------|--------------------------------------|
| 1.2 | 10 |
| 2.5 | 15 |
| 5.0 | 19 |
| 8.7 | 26 |
| 15 | 34 |
| 18 | 40 |
| 25 | 50 |
| 34.5 | 70 |
| 46 | 95 |
| 69 | 140 |
| 92 | 185 |
| 115 | 230 |
| 138 | 275 |
| 161 | 325 |
| 196 | 395 |
| 215 | 430 |
| 230 | 460 |
| 315 | 630 |
| 345 | 690 |
| 375 | 750 |
| 400 | 800 |

* Norma CCONNIE 2.1-2, Octubre 1975, "Transformadores de Potencia".

CAPITULO IV

FACTOR DE PERDIDAS

1 Fenómeno eléctrico en un capacitor ideal.

Si se usa el vacío absoluto como dieléctrico o aislamiento entre dos electrodos, como se muestra en la figura 1, el arreglo sirve como un elemento capacitivo ideal.

Un capacitor perfecto permite almacenar cargas Q_0 sin pérdidas de energía, y la capacitancia se define como $C_0=Q_0/U$. La relación entre densidad de carga en los electrodos y el campo eléctrico se puede expresar como:

$$\sigma_0 = \epsilon_0 E_0 \quad (1)$$

donde ϵ_0 se le conoce como la permitividad absoluta del vacío y E_0 es el gradiente de potencial lineal (campo eléctrico) entre los electrodos.

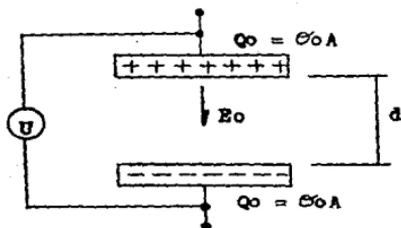


FIGURA 1 El vacío como dieléctrico entre electrodos metálicos.

2 Fenómeno eléctrico en un dieléctrico entre dos electrodos.

Cuando un bloque de material aislante sólido es introducido entre el espacio de los electrodos planos, como se muestra en la figura 2, se crean capas de carga por la polarización del material sólido. Este desplazamiento de carga puede representarse matemáticamente por capas de carga de densidad σ_p en los sólidos separados por una distancia p .

Los campos eléctricos dentro del capacitor son:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \quad , \quad E = \frac{\sigma - \sigma_p}{\epsilon_0} \quad (2)$$

El voltaje aplicado es igual a la suma de los campos multiplicados por las distancias:

$$U = E_1 (d-p) + E_2 p = E d \quad (3)$$

Sustituyendo (2) en (3) y resolviendo para σ se tiene:

$$\sigma = \epsilon_0 E + \frac{P \sigma_p}{d} \quad (4)$$

donde la densidad de carga sumada en el arreglo para comparar los saltos de cargas en el sólido es:

$$\sigma_Q = \frac{P \sigma_p}{d} \quad (5)$$

y llamado densidad de carga de polarización. Por simplicidad $d \sim p$ y $\sigma_Q = \sigma_p$.

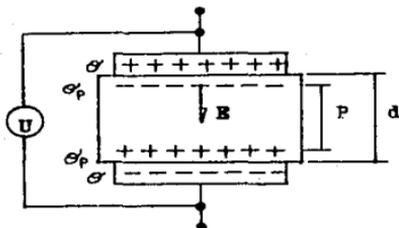


FIGURA 2 Dieléctrico sólido entre electrodos metálicos.

La capacitancia del dieléctrico sólido es $C = Q/U$, y la permitividad relativa se define como:

$$\kappa_E = \frac{\sigma}{\sigma_0} = \frac{Q}{Q_0} = \frac{C}{C_0} = 1 + \frac{\sigma_p}{\epsilon_0 E} \quad (6)$$

y C es:

$$C = K_E C_0 = K_E \epsilon_0 \frac{A}{d} \quad (7)$$

donde A es el área del electrodo y de (6):

$$C = C_0 + \frac{A \sigma p}{d E} = C_0 + \frac{Qp}{U} = C_0 + C_p \quad (8)$$

Así, la capacitancia de un dieléctrico sólido puede verse como la suma de dos capacitancias en paralelo ($C_0 + C_p$), donde:

$$C_p = \frac{\sigma p A}{E d}$$

es el incremento de capacitancia por capas de carga en un dieléctrico sólido.

3 Circuito equivalente de un dieléctrico.

Si se aplica un voltaje alterno al material sólido entre los dos electrodos, el material no puede ser descrito solamente por el cambio de capacitancia, dado que hay pérdidas de energía que pueden representarse por una resistencia o conductancia. Es conveniente representar al elemento capacitivo por un circuito equivalente que consista de capacitancias y conductancias en paralelo.

El arreglo es representado por una admitancia compleja:

$$Y = G + j\omega C \quad (9)$$

donde: $\omega = 2\pi f$

En analogía con la ecuación (6), la permitividad relativa compleja está definida como:

$$K_A = \frac{Y}{Y_0} = \frac{Y}{j\omega C_0} \quad (10)$$

Sustituyendo (9) resulta:

$$KA = \frac{G + j\omega C}{j\omega C_0} = \frac{C}{C_0} - j \frac{G}{\omega C_0} = K' - jK'' \quad (11)$$

Se observa que K' es la permitividad relativa vista en la ecuación (6); la parte imaginaria K'' se conoce índice de pérdida o factor de pérdidas.

Sustituyendo las dimensiones del capacitor en (11) se tiene:

$$K'' = \frac{1}{\omega \rho E_0} \quad (12)$$

donde ρ es la resistividad volumétrica efectiva del material, un valor de resistividad volumétrica que puede representar las pérdidas observadas, incluyendo las que no son causadas por conducción libre.

El circuito equivalente completo para el dieléctrico es el que se muestra en la figura 3a, que consiste de dos capacitores en paralelo C_c y C_A . La resistencia o fricción al movimiento de las cargas en C_A puede ser representado como una conductancia G_A en serie con C_A . Las pérdidas de carga a través del dieléctrico son representadas por la conductancia G_r . El fenómeno de polarización en el dieléctrico es así representado por C_A y G_A , parámetros que dependen de la temperatura, frecuencia y potencial. El diagrama vectorial para el circuito equivalente es el mostrado en la figura 3b.

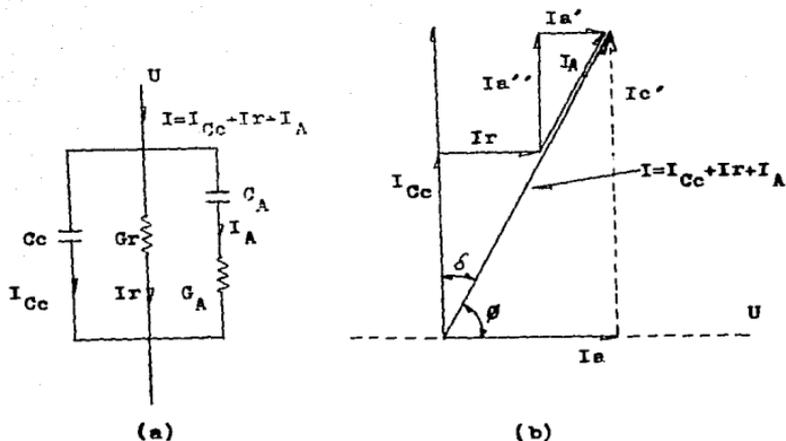


FIGURA 3 (a) Circuito equivalente para el dieléctrico sólido. (b) Diagrama vectorial para el circuito equivalente en (a).

donde I_A es una corriente de absorción dieléctrica, I_r corriente de conducción debida a la resistencia ohmica del material e I_{Cc} debida a la capacitancia del dieléctrico. La corriente de absorción I_A tiene dos componentes; una activa ($I'A$) y otra capacitiva ($I''A$).

El diagrama vectorial de la figura 3b se le conoce también como diagrama vectorial de pérdidas en los dieléctricos bajo la acción de una corriente alterna, y es la representación más exacta, pero su aplicación resulta laboriosa, por lo que para fines prácticos se emplea un diagrama vectorial de pérdidas más simplificado. En la figura 4, se muestra el circuito eléctrico y el diagrama vectorial simplificados.

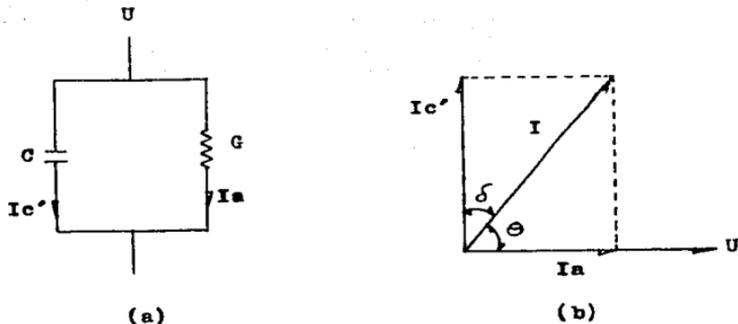


FIGURA 4 (a) Circuito eléctrico simplificado. (b) Diagrama vectorial simplificado del circuito (a).

$$I_a = I' a + I_r \quad \text{es la corriente total}$$

$$I' c = I'' a + I C c \quad \text{es la corriente capacitiva total}$$

Idealmente, un capacitor bajo la acción de una tensión defasa 90 grados la corriente respecto a aquél, esto se muestra en la figura 5, dicho defasamiento es debido a la impedancia infinita que representa el elemento. En la realidad, cualquier dieléctrico entre las placas de un capacitor presentará una cierta resistencia, que es la que provoca las pérdidas. El defasamiento provocado entre la tensión y la corriente es ahora menor a 90 grados, la diferencia en el ángulo es el indicado como δ en la figura 4b.

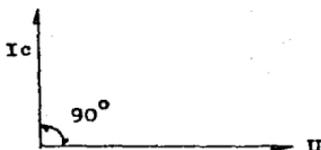


FIGURA 5 Ángulo de fase entre corriente y voltaje en un capacitor ideal.

4 Pérdidas dieléctricas en aislantes.

La mayoría de los dieléctricos sólidos al someterse bajo la acción de un voltaje permiten el paso de una pequeña corriente I , ya que se comportan en parte como conductores. Por la simplificación ya hecha, la corriente tiene dos componentes; la corriente capacitiva total I'_c y la corriente de conducción I_a .

La corriente de conducción I_a , provoca pérdidas que se manifiestan en forma de calor. Estas pérdidas pueden ser de varios tipos:

- a) Pérdidas por conducción (muy pequeñas y de poca importancia).
- b) Pérdidas de polarización.
- c) Pérdidas por histéresis dieléctrica.
- d) Descargas parciales (ver capítulo II).

Las causas de estas pérdidas son las siguientes:

- a) Las pérdidas por conducción aparecen por efecto de la traslación de carga eléctrica, que pueden ser electrones o iones; las primeras se deben al movimiento de electrones libres (en cantidades pequeñas) que existen en todos los materiales dieléctricos; las segundas sólo aparecen en materiales capaces de producir iones, su movilidad depende en gran parte de la temperatura.

- b) Las pérdidas por polarización se deben al movimiento de los dipolos que tienden a orientarse por la acción del campo eléctrico.
- c) Las pérdidas por histéresis se producen por la distribución con variaciones y caída de tensión de sentido contrario al campo aplicado, lo que hace que se puedan presentar diferencias de potencial muy fuertes en determinadas capas del dieléctrico.

De la figura 4b, el ángulo δ es el defasamiento entre la corriente total y la provocada por la capacitancia del elemento o aparato, se le conoce como ángulo de pérdidas y a la tangente de éste como factor de disipación, factor de pérdidas, índice de pérdidas, tangente de pérdidas o simplemente $\tan \delta$, se calcula mediante la siguiente relación:

$$\tan \delta = I_a / I'c \quad (13)$$

Las pérdidas dieléctricas ocurren en todos los dieléctricos, ya sean sólidos, líquidos o gaseosos por pequeñas que sean. Estas pérdidas pueden ser temporales en los dieléctricos líquidos y gaseosos y permanentes en los dieléctricos sólidos.

En algunos aislantes sólidos de constitución heterogénea (con cavidades) aparecen regiones limitadas de gran conductividad, produciendo un aumento considerable en las pérdidas, pueden existir canales de pérdidas. Un material aislante, lo más homogéneo posible aún presenta pérdidas, éstas aumentan con la temperatura provocada por la corriente I_a .

Dentro de los aislamientos de los transformadores, el aceite juega un importante papel, puesto que proporciona aislamiento eléctrico de y entre las partes energizadas, actúa como refrigerante y protege a los aislamientos sólidos contra la humedad y aire, además actúa como agente que transfiere el calor al medio ambiente.

En proceso de fabricación un transformador no debe contener humedad, si posee debe ser la menor cantidad posible, no tener burbujas en el aceite, estar libre de aire y el aislamiento sólido ser lo más homogéneo posible, aunque esto en materias coladas o extruidas es difícil de obtener. Los aislamientos deben ser capaces de soportar los esfuerzos dieléctricos impuestos durante el servicio, más aún en los transformadores que en equipos de muy alta potencia los esfuerzos son muy severos.

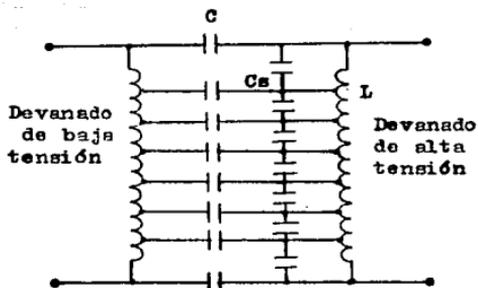
Humedad y aire son muy perjudiciales para los aislamientos. En el equipo durante servicio normal, provocan la disminución de la rigidez dieléctrica, provocando que un aislamiento eléctrico sea ya inadecuado, por la disminución en la vida del mismo.

El aceite aislante, con el tiempo sufre un deterioro normal debido a las condiciones de operación del equipo eléctrico, provocando cambios en sus características que afectan también a los materiales aislantes sólidos, interfiriendo en el funcionamiento del equipo, acortando la vida útil y en muchos casos aumentando las pérdidas.

Para detectar humedad, contaminaciones o productos de deterioro tales como agua, productos de oxidación, partículas conductoras, partículas coloidales, barniz, etc. se utiliza la técnica de la $\tan \delta$ que es un método independiente de la cantidad de aislamiento bajo prueba, el valor arrojado por este método es proporcional a la energía disipada en forma de calor por los aislantes. Es altamente necesario mantener las pérdidas dieléctricas al mínimo, un valor alto indica presencia de contaminantes, productos de deterioro o humedad.

5 Factor de pérdidas, nivel de tensión y sus efectos en el tiempo en transformadores.

Al efectuar pruebas de factor de disipación sobre un transformador, es muy importante trazar un esquema equivalente con todas las capacitancias que puedan intervenir en la medición, un ejemplo lo muestra la figura 6, por ello, es necesario considerar la disposición física de los embobinados y tener en cuenta, además, los factores externos tales como inducción de líneas o aparatos cerca del aparato bajo prueba, las capacitancias a tierra, el material entre terminales, el estado superficial del aislador, falsos contactos de las terminales de prueba, etc. cuyos efectos puedan ser mayores al del propio dieléctrico.



- C - Capacitancia entre el devanado de baja tensión y alta tensión.
- C_s - Capacitancia entre espiras del devanado.
- L - Autoinductancia por unidad de longitud.

FIGURA 6 Representación esquemática de las capacitancias que involucran los devanados de un transformador.

Un solo valor de $\tan \delta$ no es suficiente para juzgar la calidad de un aislamiento, se debe considerar su variación en función de la tensión y del tiempo. El aumento en la $\tan \delta$ se puede deber a la aparición de descargas parciales, pérdidas iónicas o dipolares.

La figura 7b, representa a un transformador en aceite con burbujas de aire o con pequeños poros entre capas de los devanados. Al incrementar la tensión aumenta la $\tan \delta$ y a cierto valor se producen descargas parciales, al seguir aumentando la tensión las burbujas o los poros se ponen completamente en cortocircuito, lo que ocasiona que disminuya el valor de la $\tan \delta$. La gráfica de capacitancia aumenta progresivamente hasta llegar a un valor que depende de cada material.

La figura 7a, representa a un transformador en buenas condiciones, se observa un aumento ligero de la $\tan \delta$ y la capacitancia, ello indica que el transformador tiene el mínimo número de cavidades y/o burbujas de aire. A la tensión nominal de operación prácticamente no tiene incremento de capacitancia ni descargas parciales.



(a)



(b)

FIGURA 7 Curvas características de $\tan \delta$ - KV.

La forma de hacer la prueba es como sigue:

Se conecta en paralelo con el transformador elevador un capacitor de acoplamiento (también llamado capacitor patrón).

Los devanados primarios del transformador a probar se

cortocircuitan al igual que los devanados secundarios, si es transformador de corriente, además, los devanados secundarios se conectan a la masa del aparato (el objeto a probar debe estar aislado de tierra). El puente de Schering se conecta a los devanados secundarios del objeto a probar y al capacitor patrón.

Realizadas estas maniobras se energiza el objeto bajo prueba y se aplican diferentes niveles de tensión, por ejemplo 30, 100 y 150 % de la tensión de la clase de aislamiento del aparato (los niveles dependen del criterio de cada fabricante), en cada nivel de tensión se manipulan los controles del puente de Schering hasta obtener en el indicador nulo del mismo la indicación cero. El factor de pérdidas se lee directamente en el puente, además también da la lectura de la resistencia R_3 . El valor de R_3 en cada nivel de tensión sufre una pequeña variación que puede despreciarse, por ello, normalmente se toma en cuenta solo el valor de la primera lectura.

Con el valor de R_3 y valores conocidos de C_M y R_4 , es posible calcular la capacitancia del aparato probado mediante la ecuación (14).

La figura 8 muestra un reporte de laboratorio en el que se lleva un control de la $\tan \delta$, capacitancia C del aparato probado (indicado como C_x) y R_3 del aparato probado.

transformadores de instrumento se tienen los siguientes niveles en el factor de pérdidas:

Transformadores de corriente.

Aparato nuevo: $\tan \delta < 0.3 \%$

Aparato retratado: $\tan \delta < 0.4 \%$

Transformadores de potencial.

$\tan \delta < 3 \%$

6 Variación del factor de pérdidas con la frecuencia.

El factor de pérdidas también varía con la frecuencia. La figura 9, indica las variaciones de la $\tan \delta$ respecto a la frecuencia para dieléctricos simples. Las regiones donde las pérdidas dieléctricas se incrementan, se conocen como regiones de dispersión. A altas frecuencias (microondas y más allá) los incrementos se cortan intempestivamente, a estas discontinuidades se conocen como resonancias. Los materiales tienen diversas resonancias debido a polarizaciones iónicas y electrónicas.

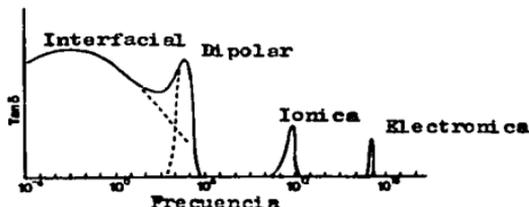


FIGURA 9 Variación de la $\tan \delta$ respecto a la frecuencia para diferentes tipos de polarización.

Así, en dieléctricos gaseosos el valor del factor de pérdidas $\tan \delta \sim 1E-08$ es común a 1 kHz. En los mejores dieléctricos

sólidos y líquidos tienden a tener un valor de $1E-05 < \tan \delta < 1E-02$.

Las tablas 1 y 2 muestran valores de $\tan \delta$ de diferentes dieléctricos usados como aislamiento a diferentes temperaturas de operación.

| Nombre | Tangente de pérdidas 20 grados C 1 kHz | Temperatura más alta de trabajo (grados C) |
|--|--|--|
| Porcelana (básicamente silicato de aluminio) | 0.005 | 150 |
| Mulita (básicamente silicato de aluminio) | 0.005 | 1800 |
| Esteatita (básicamente silicato de magnesio) | 0.005 | 1000 |
| Corindón (básicamente óxido de aluminio) | 0.002 | 1800 |
| PTFE (Politetrafluoretileno) | 0.00005 | 280 |
| Cristal simple de mica (básicamente silicato de aluminio) | 0.001 | 300 |
| Cristales simples de zafiro y espinel (básicamente óxido de aluminio y magnesio aluminizado respectivamente) | 0.0001 | > d = 200 |

TABLA 1 Valores del factor de pérdidas a diferentes temperaturas de dieléctricos cristalinos simples.

| | Tangente de pérdidas ! más bajo que se usa | Temperatura más alta de trabajo (grados C) |
|------------------------------|---|--|
| ! Poliamida | 0.01 | 450 |
| ! Politetrafluoretileno | 0.00001 | 280 |
| ! Polisulfonato | 0.01 | 160 |
| ! Tereftalato de polietileno | 0.01 | 140 |
| ! Policarbonato | 0.003 | 125 |
| ! Polipropileno | 0.0001 | 100 |
| ! Poliestireno | 0.0001 | 75 |
| ! Polietileno | 0.00005 | 70 |
| ! Óxido de polifenilina | 0.001 | 175 |
| ! Papel + aceite | 0.01 | 85 |

TABLA 2 Factor de pérdidas a diferentes temperaturas de polímeros usados en aislamientos.

Medir propiedades dieléctricas con el puente de Schering tiene sus ventajas pero también sus desventajas: las ventajas es que se puede usar para bajos o muy altos voltajes y corrientes, además, de dar la lectura directamente; la desventaja es que las desviaciones pueden dar errores, usualmente no se miden pérdidas tan bajas como en el puente transformador.

La figura 10 muestra el rango de frecuencias en el que opera el puente de Schering.

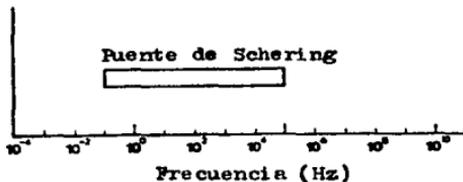


FIGURA 10 Rango de frecuencias de operación del puente de Schering.

CAPITULO V

FACTOR DE POTENCIA

1 Factor de potencia e índice de pérdidas.

La técnica de factor de potencia, al igual que la de factor de pérdidas, mide las pérdidas dieléctricas.

El factor de potencia se obtiene de la figura 4b (capítulo IV), el cual es el coseno del ángulo complementario de δ :

$$fp = \cos \theta = I_a / I \quad (1)$$

de la misma figura, pero en función de C y G:

$$fp = \cos \theta = \frac{1}{\frac{1}{G} - j \frac{1}{\omega C}} \quad (2)$$

Cuando las corrientes que provocan las pérdidas (corrientes de fuga) son muy pequeñas, el ángulo δ es muy pequeño, lo que origina que:

$$fp = \cos \theta \approx \tan \delta \quad (3)$$

El factor de potencia puede ser calculado en función de la $\tan \delta$, de la figura 4b (capítulo IV):

$$I^2 = I_a^2 + I_c^2 \quad (4)$$

resolviendo para I_c :

$$I_c = \sqrt{I^2 - I_a^2} \quad (5)$$

sustituyendo la ecuación (5) en la ecuación (13) del capítulo IV:

$$\tan \delta = \frac{I_a}{\sqrt{I^2 - I_a^2}} = \frac{\sqrt{\frac{I_a^2}{I^2 - I_a^2}}}{1} \quad (6)$$

elevando la ecuación (6) a la -1:

$$\frac{1}{\tan \delta} = \sqrt{\frac{I^2 - I_a^2}{I_a^2}} \quad (7)$$

pero por la ecuación (1), (7) queda:

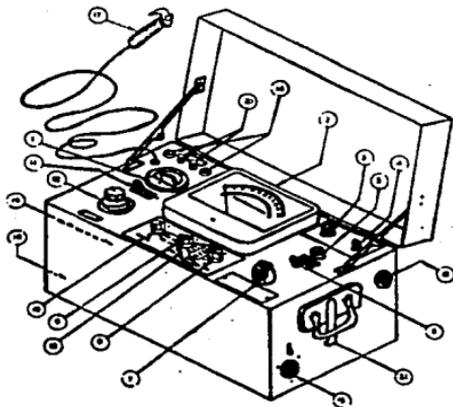
$$\tan \delta = \frac{fp}{\sqrt{1 - fp^2}} \quad (8)$$

con lo que se obtiene la relación entre el factor de potencia y el factor de pérdidas, así se conoce el factor de potencia a partir de la $\tan \delta$ y viceversa, esto mediante la ecuación (8).

2 Medidor del factor de potencia MEU.

Para la determinación del factor de potencia en aislamientos, se emplea, por su gran precisión, el llamado puente de pérdidas, fabricado por la Doble Engineering Company en sus dos tipos: MEU con aplicación de 2500 volts máximos y MH con 10 000 volts máximos. El probador tipo MEU, se muestra en la figura 1 con sus partes correspondientes. Con este aparato se efectúan mediciones directas en milivoltamperes (mVA) y miliwatts (mW) de pérdidas, cuando se alimenta con una fuente de 110 volts y 60 Hz. Con estas mediciones se calcula el factor de potencia, que se expresa en porcentaje de acuerdo con la expresión siguiente:

$$\% fp = (\text{miliwatts/milivoltamperes}) \times 100 \quad (9)$$



PARTES PRINCIPALES DEL MEU

- 1- VOLTMETRO
- 2- INDICADOR DE mVA y mW
- 3- PERILLA PARA AJUSTE DE MEDICION (METER ADJ.)
- 4- L.V. SWITCH (GROUND, GUARD Y UST)
- 5- PERILLA DE POLARIDAD
- 6- REV. SWITCH PARA COMPROBACION DE LECTURAS (DIRECTA-FUERA-INVERSA)
- 7- AJUSTE DE MILLIWATTS (mW ADJ.)
- 8- PERILLA PARA RANGOS DE mW (MILLIWATTS)
- 9- PERILLA PARA RANGOS DE mVA (MILLI-VOLTAmpERES)
- 10- PERILLA PARA RANGOS DE MEDIDA (HIGH, MED Y LOW)
- 11- SWITCH DE ENCENDIDO (ON - OFF)
- 12- PERILLA PARA RANGOS DE VOLTAJE
- 13- SWITCH SELECTOR (mVA , CHECAR Y mW)
- 14- FOCOS DE PILOTO VERDE Y ROJO
- 15- ENTRADA PARA CABLE DE PRUEBA DE ALTA TENSION
- 16- ENTRADA PARA CABLE DE PRUEBA, GUARDA O BAJO VOLTAJE
- 17- SWITCH DE SEGURIDAD
- 18- ENTRADA PARA CONECTOR, SWITCH DE SEGURIDAD
- 19- CLAVIJA PARA ALIMENTACION DE C.A.
- 20- FUSIBLES DE PROTECCION
- 21- PUNTO PARA CONEXION A TIERRA DEL APARATO

FIGURA 1 Probador MEU para factor de potencia con sus partes correspondientes.

Con el probador MEU, se pueden seleccionar tres diferentes mediciones del factor de potencia (fp) de aislamiento y son: GROUND, GUARD y UST, ello por medio de la perilla selectora LV SWITCH que se indica en la figura anterior con el número 4.

En la figura 2, se indica al probador MEU conectado a dos conductores aislados entre sí y del tanque que los contiene. Al energizarse el conductor H, por medio del cable de prueba de A.I., se producen corrientes de fuga hacia el conductor L y hacia el tanque, el cual está aterrizado. Para cerrar el circuito, las corrientes que se fugan al conductor L se conducen al probador MEU por medio del cable de guarda y las de tierra regresan por la conexión correspondiente del instrumento. Según el tipo de medición, el circuito selector se modifica para permitir que una u otra corriente, o ambas, sean detectadas por el circuito de medición.

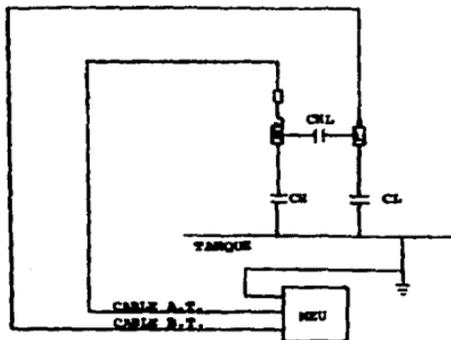


Figura 2 Conexión típica del MEU.

2.1 El medidor MEU en conexión GROUND.

Para la medición en GROUND (tierra), se muestra la figura 3, en la que se mide la suma del total de las corrientes que se derivan por el cable de guarda y por tierra, es decir, $G + I$. La resistencia del rango, (R) limita a un valor despreciable la corriente que no pasa por el circuito de medición. Mide

C + C .
HL H

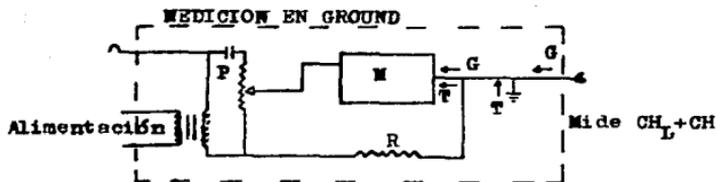


Figura 3 Conexión del MEU en GROUND.

2.2 El medidor MEU en conexión GUARD.

Para la medición en GUARD (guarda), se muestra la figura 4. En esta medición, la corriente del cable de guarda es discriminada al derivarse sin pasar por el circuito de medición y solamente es medida la corriente que regresa al aparato por su conexión a tierra, es decir, mide C .

H

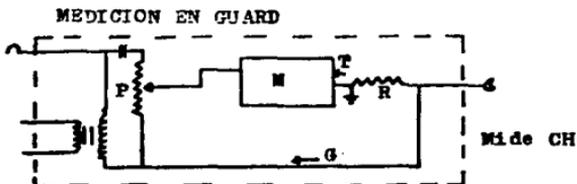


Figura 4 Conexión del MEU en GUARD.

2.3 El medidor MEU en conexión UST.

Para la prueba en UST. (de las siglas en inglés Unground Specimen Test, que significa prueba a muestra sin conexión a tierra), se muestra la figura 5, en la que sólo se mide la corriente que regresa al aparato por el cable de guarda, y queda derivada sin pasar por el circuito de medición, la corriente que regresa por tierra, es decir se mide C_{HL} .

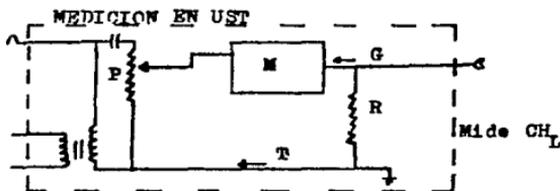


Figura 5 Conexión del MEU en UST.

3 Precauciones en la medición del factor de potencia.

Al igual que la técnica de $\tan \delta$, la técnica del factor de potencia detecta humedad y otras contaminaciones que producen pérdidas en los devanados de los transformadores.

Esta técnica, también es independiente de la cantidad de aislamiento bajo prueba.

Antes de hacer la prueba, se deben tomar ciertas precauciones, se listan a continuación:

- La prueba debe realizarse en el transformador totalmente desconectado, tanto en baja como en alta tensión.
- Desconectar los neutros de tierra de cada devanado.

- Conectar en cortocircuito cada devanado en sus boquillas terminales (A.T. y B.T.).
- Conectar a tierra el tanque del transformador.

Al realizar la prueba, se debe tomar la temperatura a la cual se realiza, para después normalizar o corregir las lecturas a una temperatura estándar. Así por ejemplo, para transformadores de potencia en la tabla 1, se muestran los factores de corrección para normalizar las lecturas a 20 grados C.

4 Niveles permitidos en el factor de potencia.

Al igual que en la prueba de factor de pérdidas, (capítulo IV), para este tipo de pruebas no existen valores normalizados tope que indique qué tan bueno es un aislamiento. Los valores tope son criterio de cada fabricante, así por ejemplo, para transformadores de potencia, la interpretación de los resultados es como sigue:

Z fp a 20 grados C.

CONDICION DE AISLAMIENTO

0.5 a 1.0
 1.0 a 2.0
 2.0 a 3.0
 más de 3.0

Excelente
 Bueno
 Deficiente
 Peligroso

| TEMPERATURA DE PRUEA | TRANSE. CON ASKAREL | TRANSE. CON ACEITE Y CON SERV. DE AIRE | TRANSE. CON ACEITE, SE- LLADOS |
|-------------------------|------------------------|--|--------------------------------------|
| GRADOS CIGRADOS F | | | |
| 0 | 32.0 | | 1.56 |
| 5 | 41.0 | | 1.46 |
| 10 | 50.0 | | 1.39 |
| 12 | 53.6 | | 1.31 |
| 14 | 57.2 | | 1.24 |
| 15 | 59.0 | | 1.20 |
| 16 | 60.8 | | 1.16 |
| 18 | 64.4 | | 1.08 |
| 20 | 68.0 | 1.00 | 1.00 |
| 22 | 71.6 | 0.90 | 0.91 |
| 24 | 75.2 | 0.81 | 0.83 |
| 25 | 77.0 | 0.76 | 0.79 |
| 26 | 78.8 | 0.72 | 0.76 |
| 28 | 82.4 | 0.64 | 0.70 |
| 30 | 86.0 | 0.56 | 0.63 |
| 32 | 89.6 | 0.51 | 0.58 |
| 34 | 93.2 | 0.46 | 0.53 |
| 35 | 95.0 | 0.44 | 0.51 |
| 36 | 96.8 | 0.42 | 0.49 |
| 38 | 100.4 | 0.39 | 0.45 |
| 40 | 104.0 | 0.35 | 0.42 |
| 42 | 107.6 | 0.33 | 0.38 |
| 44 | 111.2 | 0.30 | 0.36 |
| 45 | 113.0 | 0.29 | 0.34 |
| 46 | 114.8 | 0.28 | 0.33 |
| 48 | 118.4 | 0.26 | 0.30 |
| 50 | 122.0 | 0.24 | 0.28 |
| 52 | 125.6 | 0.22 | 0.26 |
| 54 | 129.2 | 0.21 | 0.23 |
| 56 | 132.8 | 0.19 | 0.21 |
| 58 | 136.4 | 0.18 | 0.19 |
| 60 | 140.0 | 0.16 | 0.17 |
| 64 | 147.2 | 0.14 | 0.15 |
| 68 | 154.4 | 0.13 | 0.13 |
| 70 | 158.0 | 0.12 | 0.12 |
| 74 | 165.2 | 0.11 | 0.11 |
| 76 | 168.8 | 0.10 | 0.10 |
| 78 | 172.4 | 0.09 | 0.09 |
| 80 | 176.0 | 0.09 | 0.09 |

TABLA 1 Factores de corrección por temperatura para factor de potencia.

CAPITULO VI

PUESTA EN SERVICIO DEL LABORATORIO DE SALAZAR

1 Circuito de alta tensión del Laboratorio.

Los laboratorios de pruebas eléctricas son una componente fundamental para el diseño, construcción y evaluación de equipos eléctricos. En ellos se experimentan y verifican parámetros referidos a condiciones y capacidad de los mismos, así como las hipótesis de procesos innovadores para el mejoramiento del equipo eléctrico.

El objetivo del Laboratorio de Pruebas Eléctricas de Salazar Edo. de México del Instituto de Investigaciones Eléctricas, (I.I.E.) es la investigación y desarrollo para el diseño y mejora del equipo eléctrico. En él, los fabricantes pueden probar el desarrollo de sus equipos durante el proceso de diseño, y con la información obtenida realimentar dicho diseño. En el Laboratorio de Salazar, también se realizan pruebas de prototipo de equipo para los fabricantes.

Los laboratorios de pruebas eléctricas, son el medio para aumentar la calidad de los equipos eléctricos, con ello, pueden sustituirse importaciones y los fabricantes sean más competitivos en el mercado.

El Laboratorio de Pruebas del I.I.E., se ubica en Salazar, Edo. de México a 3000 metros sobre el nivel del mar, a 50 km abajo de la subestación de San Mateo Atenco. Edo. de México.

La técnica que se usa en el Laboratorio de Salazar para la evaluación de los aislamientos de los transformadores, es la de tensión aplicada.

En la fotografía 1, se muestra una vista del Laboratorio de Salazar.



FOTOGRAFIA 1 Vista general del Laboratorio de Pruebas Eléctricas de Salazar Edo. de México.

El equipo con que cuenta el laboratorio para la prueba de tensión aplicada se describe a continuación.

1.1 Circuito de alta tensión.

El circuito de alta tensión del Laboratorio de Salazar, recibe alimentación de la línea de 23 kV, la cual tiene una potencia de cortocircuito de 50 MVA trifásicos, que viene de la subestación de Amomolulco. El circuito consta de los elementos que a continuación se listan.

- 1.- Un transformador regulador de tensión, marca Brentford de dos fases con los siguientes datos:

- Tensión de alimentación en el primario de 20 000 a 23 000 V.
- Corriente primaria de 10 a 8.75 Amperes.
- Tensión de salida regulada de 0 a 1200V.
- Corriente secundaria 167 Amperes.
- Potencia 200 kVA.
- Frecuencia de operación 60 Hz.
- Aislamiento en aceite.

En el secundario del transformador regulador, se tiene solo una salida, que es donde se obtiene la regulación de voltaje.

El diagrama 1, muestra todos los elementos componentes del circuito de alta tensión, en el se puede observar al transformador regulador.

2.- Transformador elevador de tensión o transformador principal con "bushing" capacitivo, monofásico, marca Ferranti LTD, con los siguientes datos nominales:

- Tensión primaria 1100 V.
- Tensión secundaria 400 kV.
- Potencia 350 kVA.
- Frecuencia 60 Hz.
- Aislamiento de aceite.

Este transformador posee un blindaje que lo protege de las descargas parciales.

Este elemento también se muestra en el diagrama 1.

3.- Apartarrayo, protege al circuito de alta tensión de las descargas atmosféricas. Este elemento se muestra en el diagrama 2.

4.- Protecciones que impiden que las fallas que puedan ocurrir durante una prueba dañen tanto al circuito de alta tensión como los instrumentos de medición de la consola de control. Las protecciones se listan a continuación:

a) Transformador de corriente con relación de transformación de 180/5 e interruptores de sobrecorriente situados en el lado primario del transformador elevador, protegen a éste de las sobrecorrientes. Existen dos protecciones de este tipo, una de ellas protege al amperímetro que mide la corriente en el lado primario del transformador elevador, ver diagrama 1.

- b) Fusible principal F1, situado en el lado secundario de 600 V del transformador regulador, protege al circuito de una sobretensión, ver diagrama 1.
- c) Fusibles 89-4 situados en el circuito alimentador de 23 kV, es decir, en el lado primario del transformador regulador, también protege al circuito de alta de una sobretensión. Se tienen dos de estos elementos en el circuito de alta tensión, con las siguientes características:

Marca AB Chance.

- Tipo F3.
- Clase 27 kV.
- Amp. cont. 100 a 150 kV de NBI (nivel básico de impulso).
- Amp. int. 6000 asimétricos.

Estos elementos se muestran en el diagrama 2.

- d) Cuchillas 89-3 situadas en la subestación de 23 kV, también actúan como protección, se deben accionar en forma manual antes de efectuar pruebas para energizar al circuito de alta tensión. Las cuchillas se muestran en el diagrama 2.
- e) Cuchillas 89-P, tienen la misma función que las cuchillas 89-3 sólo, que además de energizar al circuito de alta tensión, energiza otros lugares para otros tipos de prueba. Estas cuchillas también se sitúan en la subestación. Las cuchillas se muestran en el diagrama 2.

La fotografía 2, muestra la subestación de 23 kV en la que se sitúan las cuchillas 89-3 y 89-P.



FOTOGRAFIA 2.

f) Contactores principales 1-3 y 2-4, actúan también como protección, están situados en el lado de 600 V del transformador regulador, físicamente están en el cubículo de contactores. También se accionan manualmente antes de efectuar pruebas. Los contactores se muestran en el diagrama 1.

g) Contactores 7 y 8, ubicados en el transformador regulador, se accionan desde la consola de control al realizar pruebas, físicamente se localizan en el cubículo de contactores. Los elementos se muestran en el diagrama 1.

La fotografía 3, muestra el cubículo de contactores, además del transformador elevador, transformador regulador, apartarrayos, el lugar donde se ubica la subestación de 23 kV y el lugar donde se hacen las pruebas.



FOTOGRAFIA 3.

1.2 Circuito de medición y control.

1.2.1 Circuito de medición.

Una parte del circuito de medición, se localiza en el circuito alimentador de 1200 V del transformador regulador (salida del regulador), consiste básicamente de dos indicadores:

- a) Un amperímetro de baja tensión de 0-180 Amperes, marca Ferranti, está conectado mediante un transformador de corriente de relación 180/5 y protegido de sobrecarga por un

interruptor de sobrecorriente.

- b) Un voltmetro de baja tensión de 0-1200 V, marca Ferranti, está conectado en el lado primario del transformador elevador mediante un transformador de potencial de relación 1200/110 V. Dos fusibles, F4 y F5, protegen al transformador de potencial y por ende al voltmetro de las sobretensiones. Estos fusibles se sitúan en el lado primario del transformador de potencial. En el lado secundario del transformador de potencial, se tienen dos fusibles, F6 y F7, también para protección por sobretensión pero para el voltmetro.

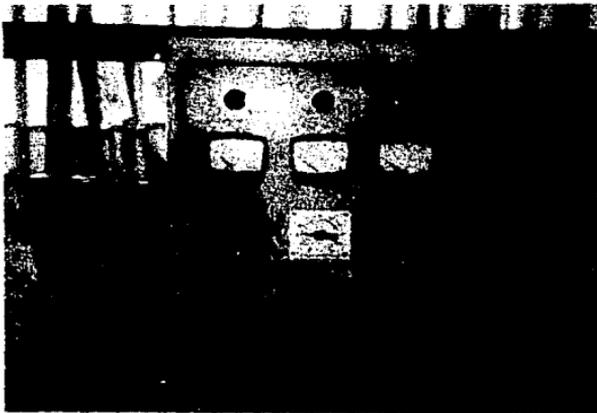
La otra parte del circuito de medición, se sitúa en el lado secundario del transformador, consiste de un voltmetro de alta tensión de 0-400 kV, marca Ferranti.

El circuito de medición se puede observar en el diagrama 1.

Los indicadores descritos, físicamente se localizan en la consola de control, en ellos se miden y observan los niveles de voltaje y corriente que se aplican y regulan al probar un aparato durante la prueba de potencial aplicado, su precisión debe ser tal que reflejen los valores de los niveles de tensión y corriente que se producen en el circuito de alta tensión durante la prueba, por ello, deben mantener su calibración al realizar pruebas de potencial aplicado o calibrarlos antes de efectuarlas.

1.2.2 Circuito de control.

El circuito de control, está protegido por sobretensión mediante los fusibles F2 y F3 colocados en el lado primario del transformador de potencial. Parte del circuito de control, se localiza en el área del circuito de alta tensión y la otra parte, en la consola de control, en ésta se localizan los indicadores de voltaje y corriente ya descritos, además de controles e indicadores que muestran estados del circuito de alta tensión, esto se indica en la fotografía 4.



FOTOGRAFIA 4.

Se describen a continuación los controles e indicadores de la consola de control.

- 1- Lámpara "ISOLATOR CLOSED". Para energizar el circuito de alta tensión, se siguen varios pasos, uno de ellos y el más importante es habilitar la alimentación de 23 kV al circuito de alta tensión, ello se logra cerrando las cuchillas 89-3 de la subestación; el segundo paso es accionar los contactores principales (del cubículo de contactores) en la posición "ON", con esto en la consola de control se enciende la lámpara indicada como "ISOLATOR CLOSED".
- 2- Lámpara "INTERLOCKS COMPLETE" e interruptor termomagnético "ISOLATOR". Accionar el interruptor termomagnético en la posición "ON" antes de iniciar una prueba, permite energizar al circuito de control, la acción provoca que la lámpara "INTERLOCKS COMPLETE" se encienda indicando que los contactos permisivos están permitiendo el inicio de la prueba.

- 3- **Botón pulsador verde "H.V. ON" y lámpara "CONTACTOR CLOSED".** El tercer y último paso para que el circuito de alta tensión quede energizado es accionar el botón pulsador, acción que provoca que el contactor situado en el transformador regulador (ver diagrama 1) se cierre, la acción también provoca que se encienda la lámpara "CONTACTOR CLOSED", los indicadores de voltaje y corriente deben indicar en ese instante una lectura cero.

Durante una prueba, la lámpara "INTERLOCKS COMPLETE" indica cuando hay o no voltaje en el transformador elevador; se enciende cuando hay un voltaje cero, cuando hay un voltaje diferente de cero se mantiene apagada.

- 4- **Perilla de control de voltaje (VOLTAGE REGULATOR).** Tiene dos posiciones que son, la manual (HAND) y automática (AUTO) para que el circuito de control permita al operador aplicar al objeto bajo prueba la tensión deseada, dicha perilla debe estar en la posición manual.
- 5- **Perilla de regulación de voltaje (VOLTAGE REGULATOR).** Tiene tres posiciones: subir (RAISE), neutra y bajar (LOWER). La posición neutra físicamente se indica con la perilla colocada entre las indicadas "RAISE" y "LOWER". En una prueba, la posición "RAISE" permite incrementar lenta y gradualmente la tensión aplicado al objeto bajo prueba; la posición neutra mantiene un voltaje dado y la posición "LOWER" lo disminuye.
- 6- **Botón pulsador rojo "H.V. OFF".** Al final de una prueba, para interrumpir la energía al transformador elevador se acciona el botón pulsador seguido del interruptor termomagnético (ISOLATOR), es el proceso inverso al tercer paso para energizar el circuito de alta tensión.

Durante una prueba, cuando ocurra una falla en el aparato que se esté probando, se acciona también el botón pulsador y el interruptor termomagnético, el nivel de tensión en este caso disminuye gradualmente a cero.

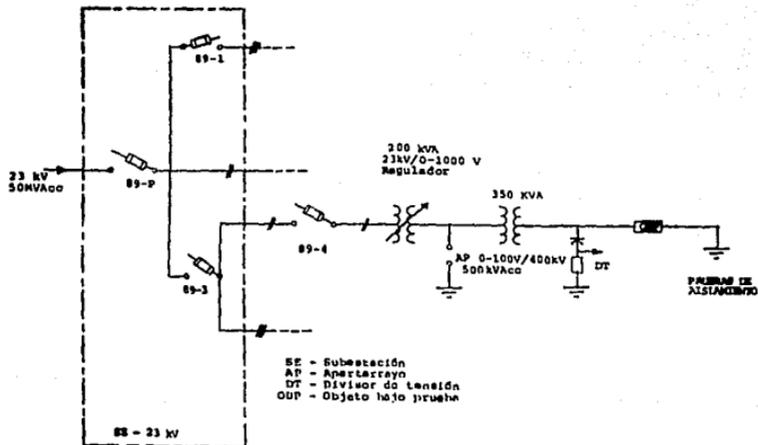


DIAGRAMA 2 Circuito de alimentación del transformador regulador proveniente de la subestación interior de 23 kV.

2 Consideraciones necesarias al circuito de alta tensión del Laboratorio para un circuito de prueba de descargas parciales.

2.1 Circuito de alta tensión e interferencias.

El circuito de alta tensión con que cuenta el Laboratorio de Salazar consta básicamente de transformador regulador de tensión y transformador elevador de tensión, además de una serie de dispositivos que protegen al circuito en momentos de falla, y sus sistema de medición. En la figura 1 se muestran las componentes básicos del circuito de alta tensión.

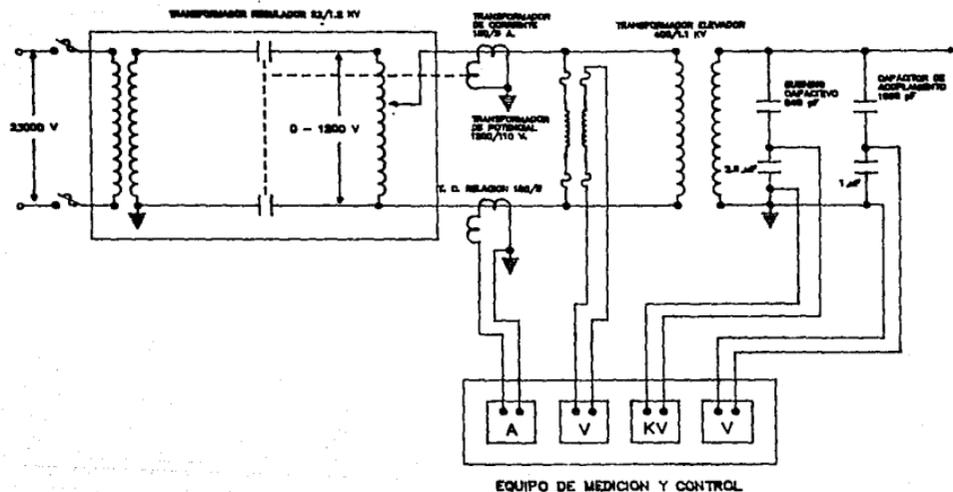


FIGURA 1. Elementos básicos del circuito de alta tensión.

El circuito de alta tensión es tipo intemperie y solo el equipo de medición y control se encuentra en el interior del laboratorio, debido a ello, el circuito está expuesto a las interferencias externas como el efecto corona de una línea de transmisión que pasa junto al laboratorio y de la cual recibe energía, dicha línea es de 115 kV (junto al laboratorio pasan otras dos líneas de transmisión, que anteriormente eran de 150 kV, actualmente estas están fuera de servicio); al efecto corona de la subestación de 115 kV que alimenta al laboratorio; otro fenómeno que afecta al laboratorio son las emisiones de radio y televisión. Otros fenómenos externos como operación de interruptores y realización de otras pruebas afectan al circuito en un grado menor, debidos a que estos fenómenos ocurren en el interior del laboratorio.

El laboratorio está forrado con un material metálico, que protege al circuito de alta tensión de los fenómenos de alta frecuencia que ocurren dentro del laboratorio, dicho material o malla metálica se encuentra conectado a la red de tierras, la cual hace disminuir al mínimo las interferencias que absorbe.

La red de tierras está formada por una malla de cable de cobre de calibre 250 MCM, las uniones de la red se encuentran soldadas y tiene una resistencia de 8.45Ω . La red se encuentra a 0.5 m de profundidad y el espaciamiento entre conductores de la malla es de 1.5 m.

De las componentes que constituyen el circuito de alta tensión, el transformador regulador produce un determinado nivel de interferencias, dado que es un regulador de pasos (escobillas), las descargas se producen entre los contactos cuando se varía la tensión. En el transformador elevador, las descargas que pudiera producir se ven disminuidas dado que el elemento posee un blindaje que protege ambas bobinas, de alta y baja tensión, particularmente la bobina de baja tensión está doblemente protegida, dado que se tiene una pantalla a cada lado de ella. La figura 2 muestra la protección contra descargas parciales que posee el transformador elevador.

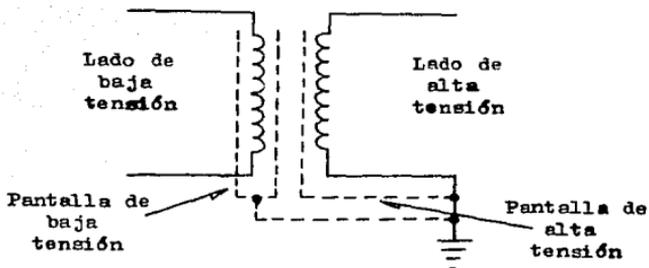


Figura 2 Protección contra descargas parciales del transformador elevador.

Para que el circuito de alta tensión puedan realizarse pruebas de descargas parciales es necesario realizar mediciones de interferencias, diseñar los filtros necesarios, agregar elementos y hacer arreglos, es decir, diseñar el circuito de prueba de descargas parciales a partir del circuito de alta tensión con que cuenta el laboratorio de Salazar.

En esta parte del presente capítulo, se pretende dar algunas consideraciones necesarias para que además de la prueba de potencial aplicado pueda realizarse la prueba de descargas parciales en el circuito de alta tensión.

2.2 Cálculo de la capacitancia máxima de elementos a probar.

Antes de iniciar los cálculos y arreglos al circuito de alta tensión es importante establecer varias consideraciones relevantes como punto de partida.

Debe quedar establecido el valor máximo de capacitancia del objeto a probar para pruebas de descargas parciales, de acuerdo a la potencia del transformador elevador y a la tensión máxima que puede dar éste. El valor de la capacitancia puede obtenerse con la relación siguiente:

$$P_{te} = \omega (C_k + C_t) V^2 \quad (1)$$

donde:

- Pte - Potencia del transformador elevador en kVA
- ω - Frecuencia angular de la señal de frecuencia industrial
- C_k - Capacitancia de acoplamiento en pF
- C_t - Capacitancia del objeto a probar en pF
- V - Tensión máxima de prueba en kV

El transformador elevador posee en su secundario cuatro capacitores, de los cuales uno es del bushing del transformador, dos se emplean como unidades secundarias para medición de la tensión y el restante es un divisor de tensión. Las dos unidades secundarias deberán cortocircuitarse cuando se realicen pruebas de descargas parciales y conectarse para la medición de la tensión, por lo que en el tablero de medición y control deberá haber un interruptor que realice estas funciones. Como las capacitancias para medición quedarán fuera cuando se realicen mediciones de descargas parciales, las capacitancias del bushing y del divisor tiene la función de capacitor de acoplamiento, el valor del capacitor de acoplamiento es entonces el paralelo de la capacitancia del bushing y del divisor de tensión, los valores de éstos se dan en la figura 1. El valor del capacitor de acoplamiento es entonces:

$$C_k = C_{\text{bushing}} + C_{\text{divisor}} = 640 \text{ pF} + 1000 \text{ pF} = 1640 \text{ pF}$$

con este valor de capacitancia, los valores del circuito de alta tensión y la ecuación (1) se obtiene la capacitancia máxima de aparatos en que se puede realizar pruebas de descargas parciales, indicada en la ecuación como C_t .

Despejando C_t de la ecuación (1) se tiene:

$$C_t = \frac{P_{te}}{\omega V^2} - C_k \quad (2)$$

de donde se tienen los siguientes valores:

- Pte = 350 kVA
- ω = 2 π f. frecuencia industrial de la red
- V = 400 kV
- C_k = 1640 pF

sustituyendo estos valores en la ecuación (2):

$$C_t = \frac{350}{2 \sqrt{(60)(400)} \cdot 10^{-6}} - 1640$$

$$C_t = 4162.5 \text{ pF}$$

que es la máxima capacitancia de aparatos en que se podrán medir las descargas parciales, sin embargo, para tener una buena sensibilidad en la medición de las descargas, se debe considerar que la capacitancia de los objetos a probar sea inferior a la capacitancia del capacitor de acoplamiento, es decir:

$$C_k > C_t$$

En el caso ideal, se tiene $C_k \gg C_t$ para máxima sensibilidad, sin embargo, en la práctica un capacitor de acoplamiento muy grande resulta muy costoso, además de cargarse muy lentamente.

Las interferencias que pueda presentar el circuito de prueba pueden confundirse con las descargas parciales, dado que la forma de los pulsos son muy similares, puesto que ocurren dentro del mismo ancho de banda en que se presentan éstas, por ello, para poder hacer consideraciones para proteger al circuito de prueba de las interferencias es necesario establecer el ancho de banda en que se medirán las descargas parciales, éste será de 40 a 220 kHz, que corresponde al ancho de banda de detección de detectores de descargas parciales comerciales.

El nivel permitido de interferencia o ruido de fondo en el circuito de prueba deberá ser el mínimo posible, dado que es sumamente difícil obtener un nivel cero, como el laboratorio es de investigación el nivel permitido se recomienda que sea de una fracción de pC como máximo.

2.3 Sistema de medición de descargas parciales.

El equipo de medición de descargas parciales consta básicamente de:

- Impedancia de medición.
- Detector de descargas parciales.

IMPEDANCIA DE MEDICION.

Con la impedancia de medición se detectan los pulsos que producen las descargas parciales provenientes del objeto bajo prueba, al crear en ella una diferencia de potencial. Con dicha impedancia se bloquea la corriente de frecuencia industrial y el pulsos de descarga (corriente transitoria) tiene una trayectoria preferente.

En el mercado, a la impedancia de medición se le conoce como unidad de entrada. Unidades de entrada las hay en diversos rangos de capacitancia, según las capacitancia de los objetos de prueba. En la figura 3 se muestra una unidad de entrada para objetos de prueba que abarcan capacitancias de 6 pF a 250 μ F.

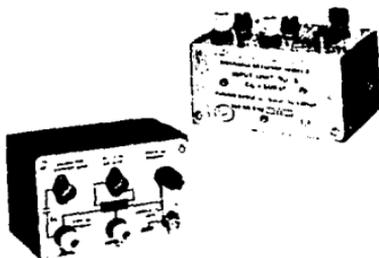


FIGURA 3 Unidad de entrada.

Se vid en el capítulo II que existen dos tipos de impedancias de medición: resistiva e inductiva. Por cuestiones de sensibilidad

en la medición de las descargas parciales, se recomienda el empleo de la impedancia de medición tipo inductiva, dado que se obtiene mejor sensibilidad que con una impedancia resistiva. La figura anterior muestra una impedancia tipo inductiva.

DETECTOR DE DESCARGAS PARCIALES.

El detector de descargas parciales debe contener lo siguiente:

- Unidad amplificadora.
- Generador de pulsos.
- Osciloscopio.

Ello debido por las razones que a continuación se dan.

La descarga parcial que se produce en el objeto de prueba se propaga a través de sus aislamientos, produciendo una señal en sus terminales proporcional a dicha descarga, la señal se recoge en la impedancia de medición y se envía mediante cable coaxial al instrumento medidor de descargas parciales. Debido a que las señales son transitorios muy pequeños, que al viajar por el cable coaxial pueden distorsionarse, por lo que se hace necesario amplificarlos, de ahí la unidad amplificadora. Una vez amplificados los pulsos, éstos se visualizan en la pantalla del osciloscopio. Para poder medir esos pulsos, es necesario contar con un generador de pulsos, que al inyectarlos en el circuito de prueba se tenga en la pantalla del osciloscopio un pulso de calibración patrón de magnitud conocida, con el que se puedan comparar y medir los pulsos de descarga. La calibración debe darse en pC, así como las mediciones.

Se recomienda que el osciloscopio tenga un barrido elíptico sincronizado con la tensión de prueba, para tener ventajas en la medición y diagnóstico de las descargas parciales.

La unidad amplificadora debe ser de banda ancha, para que puedan detectarse en el osciloscopio descargas individuales que tienen aproximadamente la misma estructura que las descargas provenientes del aparato bajo prueba.

En el mercado existen diversos modelos de detectores de descargas parciales con las características anteriores, incluso los hay que dan la lectura directamente en pC, es decir, digitales y con sistema discriminador de pulsos que separa el ruido de los pulsos generados por el objeto bajo prueba.

Algunos detectores de descargas parciales comerciales contienen además un voltmetro.

En la figura 4 se muestran dos modelos de detectores de descargas

parciales.



FIGURA 4 Modelos de detectores descargas parciales.

En lo que se refiere al cable coaxial o medio de transmisión de los pulsos de descarga al detector, se trató en el subtema 2.5.2 del capítulo II.

2.4 Transformador de aislamiento.

Se utilizará para eliminar las sobretensiones y las interferencias que pueda contener la alimentación principal un transformador de aislamiento. Dicho transformador debe ser de la misma capacidad que el transformador elevador (350 kVA) y estar libre de descargas parciales, al menos hasta la máxima tensión de prueba.

El transformador de aislamiento estará conectado en el lado secundario del transformador regulador de tensión, por lo que la tensión a que estará sometido será de 1 200 V, que corresponde a la tensión nominal del secundario del transformador regulador.

Deberá poseer dos pantallas electrostáticas, las cuales se aterrizan. Se recomienda, para obtener un buen supresor de las interferencias, que los valores de capacitancia entre las pantallas y los devanados tengan los siguientes valores:

1. Devanado primario y pantalla primaria a tierra ≤ 2000 pF
2. Pantalla primaria y pantalla secundaria a tierra ≤ 1000 pF
3. Devanado secundario y pantalla secundaria a tierra ≤ 500 pF

Además de eliminar las interferencias de la alimentación principal, con el transformador de aislamiento, se consigue también eliminar las interferencias que produce el transformador regulador, dado que es un regulador de pasos (escobillas), originándose las interferencias entre los contactos cuando se varía la tensión.

Debido a que la instrumentación control y alumbrado requiere energía de la alimentación principal, también se colocará un transformador de aislamiento entre el equipo descrito y la alimentación, para eliminar así las interferencias que pudieran afectar al equipo. El transformador de aislamiento puede ser de una pantalla, la cual se conecta a tierra.

En lo que se refiere a la iluminación, se recomienda usar lámparas incandescentes, dado que las lámparas fluorescentes provocan interferencias que pueden influir en la sensibilidad de la medición de las descargas parciales.

2.5 Filtro paso-bajas.

Las interferencias de la alimentación principal también posee una componente de alta frecuencia, ésta se elimina con un filtro paso-bajas colocado entre el transformador de aislamiento y el transformador elevador.

El filtro, como el transformador de aislamiento, debe estar libre de descargas parciales hasta la máxima tensión de prueba, que son 1 100 V que corresponde a la máxima tensión del lado primario del transformador elevador, por lo que el filtro debe soportar las condiciones nominales de éste transformador.

El filtro deberá rechazar todas las frecuencias dentro del ancho de banda del detector de descargas parciales y permitir el paso de la frecuencia industrial de prueba (60 Hz), su frecuencia de corte ser baja, del orden de los 300 Hz a 3 db de atenuación.

La atenuación, en el rango de las frecuencias de medición, debe ser ≥ 60 db.

Con los requisitos anteriores, se tienen datos necesarios para el

diseño del filtro, éstos se listan a continuación:

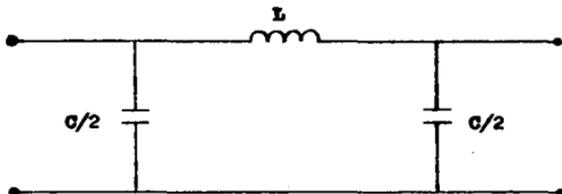
Datos:

- Tensión nominal 1 100 V.
- Corriente nominal 350 kVA/1 100 V = 318.18 A.
- En el rango de frecuencias de 40-220 kHz (ancho de banda de detección) atenuación \geq 60 db.
- Frecuencia de corte 300 Hz a 3 db de atenuación.
- Frecuencia industrial de prueba 60 Hz.

DISEÑO DEL FILTRO.

Se elige un filtro K-cte. sección π , dado que la impedancia que presenta a la entrada es la misma que presenta a la salida, además, aumenta al aumentar la frecuencia.

El filtro paso-bajas sección π tiene la siguiente forma:



sus ecuaciones de corte y diseño son las siguientes:

$$f_c = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \quad C = \frac{1}{f_c R_o}, \quad L = \frac{R_o}{f_c}$$

donde R_o es la impedancia de carga del filtro, que deberá soportar las condiciones nominales del primario del transformador elevador. R_o tiene el valor de:

$$R_o = \frac{V}{I} = \frac{1100}{318.18} = 3.4572 \Omega$$

a la frecuencia industrial (60 Hz).

Los valores de L y C serán entonces:

$$L = \frac{R_o}{\omega_c} = \frac{3.4572}{\omega(300)} = 3.668 \text{ mH}$$

$$C = \frac{1}{\omega_c R_o} = \frac{1}{\omega(300)(3.4572)} = 306.9 \text{ uF}$$

Para probar si con estos valores de L y C se cumple la frecuencia de corte a 3 db de atenuación, se obtiene la función de transferencia del filtro:

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{\frac{1}{2} \left[\frac{j\omega}{\omega_n} \right]^2 + 1}$$

de la que se obtiene la ecuación de atenuación:

$$\frac{V_i}{V_o} = \frac{1}{\frac{1}{2} \left[\frac{j\omega}{\omega_n} \right]^2 + 1}$$

$$\text{donde: } \omega_n = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{1}{\sqrt{(3.668 \times 10^{-3})(306.9 \times 10^{-6})}} = 942.512$$

en Hz da $f_n = 150 \text{ Hz}$

Se obtiene la gráfica de la ecuación de atenuación:

$$\left| \frac{V_i}{V_o} \right| = 1 - \frac{1}{2} \left[\frac{\omega}{\omega_n} \right]^2$$

| ω | $\left \frac{V_i}{V_o} \right $ |
|------------------|----------------------------------|
| 0.001 ω_n | 0.999999~1 |
| 0.01 ω_n | 0.999995~1 |
| 0.1 ω_n | 0.995 |
| 1 ω_n | 0.5 |
| 1.1 ω_n | 0.395 |

| | | |
|-----|-------|----------------------------------|
| | w | $\left \frac{V_i}{V_o} \right $ |
| 1.2 | w_n | 0.28 |
| 1.3 | w_n | 0.155 |

La ecuación de atenuación da cero cuando:

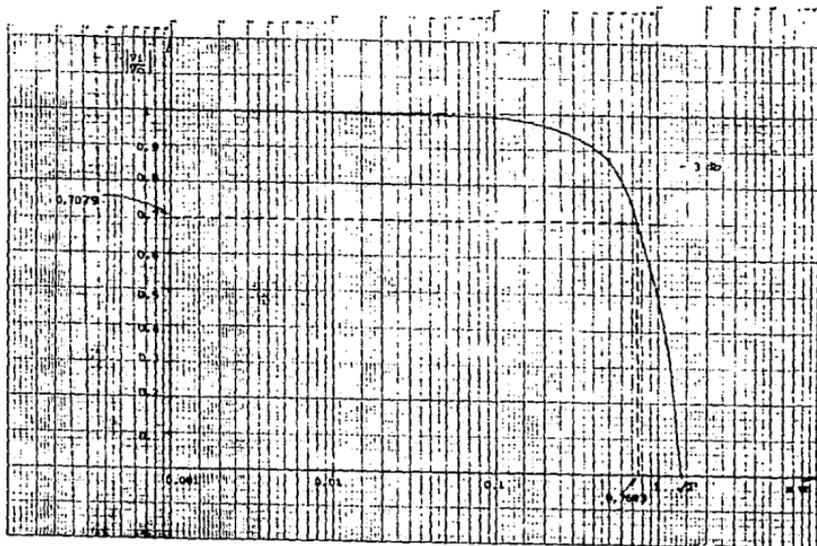
$$w = \sqrt{2} w_n$$

en decir:

$$1 - \frac{1}{2} \left[\frac{w}{w_n} \right]^2 = 0$$

de donde $w = \sqrt{2} w_n$

La gráfica de la ecuación de atenuación se muestra en la gráfica 1.



GRAFICA 1 Gráfica de la ecuación de atenuación del filtro paso-bajas.

Se comprueba ahora si la ecuación de atenuación cumple en la frecuencia de corte con los 3 db:

$$20 \log x = -3 \text{ db} ; x = 0.7079$$

la ecuación de atenuación debe tener un valor de 0.7079 en la frecuencia de corte:

$$1 - \frac{1}{2} \left[\frac{w}{w_n} \right]^2 = 0.7079 ; w = 0.7643 w_n$$

esto se muestra en la gráfica 1.

Substituyendo el valor de ωn en la ecuación anterior:

$$\omega = 0.7643 (942.512) = 720.36$$

en Hz da $f = 114.65$ Hz

Se observa que el corte a 3 db de atenuación ocurre en 114.65 Hz y no en 300 Hz, por lo que se debe recalcular el filtro.

Se busca que el corte ocurra en

$$\omega c = 2 \pi f c = 2 \pi (300) = 1884.96$$

por lo que ωc debe igualarse con la ecuación que relaciona los 3 db:

$$1884.96 = 0.7643 \omega n$$

de donde se obtiene:

$$\omega n = 2466.25$$

Si se mantiene la inductancia con el mismo valor, se obtiene con la ecuación de ωn el nuevo valor de C:

$$\omega n = \frac{1}{\sqrt{LC}} = 2466.25$$

como $L = 3.668$ mH, se obtiene de la ecuación anterior:

$$C = 44.82 \mu F$$

Entonces, los valores de L y C para el filtro serán:

$$L = 3.668 \text{ mH} \quad \text{y} \quad C = 44.82 \mu F$$

con lo que se garantiza que el corte ocurrirá en $f_c = 300$ Hz.

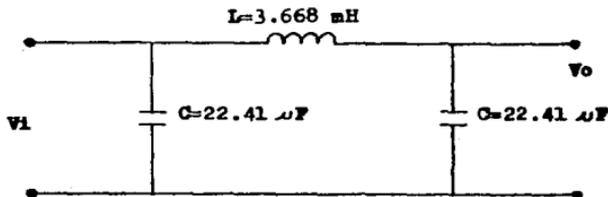
De la gráfica 1 se observa que a frecuencias mayores de

$$f = \frac{\sqrt{2} \omega n}{2\pi} = \frac{\sqrt{2} (2466.25)}{2\pi} = 555.1 \text{ Hz}$$

las señales son completamente atenuadas, por lo que cumple la condición de que en el rango de frecuencias de medición de las descargas parciales (40-220 kHz) las señales son suprimidas por el filtro.

El filtro quedará de la siguiente manera:

$$C/2 = 44.82 \mu\text{F}/2 = 22.41 \mu\text{F}$$



2.6 Electrodo y conectores de alta tensión.

Se deben usar electrodos y conectores de alta tensión adecuados en el transformador elevador, capacitor de acoplamiento y objeto bajo prueba, ya que están expuestos a la alta tensión, ello con el fin de minimizar el efecto corona.

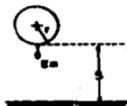
Los electrodos y conectores son respectivamente esferas o toroides y tubos cilindricos. Para tensiones elevadas se usan como electrodos estructuras toroidales.

Actualmente en el circuito de alta tensión del Laboratorio de Salazar, se cuenta en el transformador elevador y capacitor de acoplamiento con electrodos doble toroide, faltando diseñar el electrodo para el objeto bajo prueba y los conectores.

Con los electrodos y conectores adecuados se evitan puntas agudas o filosas, en las que ocurre el fenómeno del efecto corona.

Los electrodos y conectores deberán ser completamente lisos y de dimensiones adecuadas a la tensión de prueba. A continuación se dan las expresiones para el cálculo de electrodos y conectores de alta tensión.

ELECTRODO TIPO ESFERA.



$$E_m = \frac{U}{n S}$$

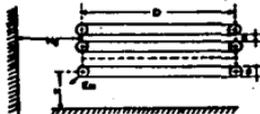
donde:

- E_m = Gradiente máximo en kV/cm
- U = Tensión de cresta aplicada en kV
- S = Altura en cm
- r = Radio de la esfera en cm

$$n = \exp - \left[\frac{P-1}{P} \right]^{0.25} \ln P$$

$$P = \frac{s+r}{r}, \text{ válida solo para } s+r > 4r$$

ELECTRODOS TIPO TOROIDE (ANILLO).



a) Gradiente máximo.

$$E_m = \infty K m \frac{U}{d}$$

donde:

E_m = Gradiente máximo en kV/cm
 U = Tensión de cresta aplicada en kV
 d = Diámetro en cm

$$\alpha = \left[1 - (0.23 + 0.011 \frac{D}{d}) (1 - \exp(1-N)) \right] \left[\frac{3.17}{2.39 + \ln \left[\frac{D}{d} \right]^{1.35}} \right]$$

$$K = \left[\frac{12}{(D/d)^{1.2}} + \frac{H}{D} \right]^2 + \frac{27}{(D/d)^{0.9}} \left[\frac{H}{D} \right] \right] N + 1$$

D = Diámetro del eje del anillo en cm
 N = Número de anillos

La expresión de K es válida sólo para:

$$\frac{a}{d} = 1 \text{ a } 2 \quad \text{y} \quad \frac{D}{d} = 1 \text{ a } 20$$

a = Distancia entre anillos en cm

$$\alpha = 1 + 0.1 \exp \left(1 - \frac{H_g}{H} \right), \quad H_g \geq H$$

H_g, H = Distancia a los planos de referencia y de influencia en cm

α = Es el factor debido a la influencia de un plano además del de referencia. Si hay dos planos que influyan, además del plano de referencia, el valor de α en forma conservativa está dado por el producto de dos valores de α relativos a cada uno de los planos.

b) Gradiente límite.

Es el valor del gradiente al cual aparece el efecto corona sobre un electrodo liso al nivel del mar, estando limpio y seco. Se obtiene considerando la forma geométrica, expresado por su radio medio de curvatura \bar{R} .

$$E_i = 23 \left(1 + \frac{0.92}{\bar{R} \cdot 0.36} \right) \quad \text{kV/cm}$$

donde: $\frac{1}{\bar{R}} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$ cm σ $\bar{R} = \frac{2 R_1 R_2}{R_1 + R_2}$

Con la expresión de E_i , afectada por los factores de corrección por densidad del aire (incluyendo esta un factor de seguridad), desuniformidad de los electrodos e histéresis de posible corona se obtiene el gradiente de inicio de corona para un electrodo dado, es decir:

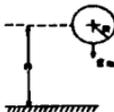
$E_{\text{límite}} = E_i \times \text{Densidad del aire} \times \text{Desuniformidad de electrodos}$

\times Histéresis de posible corona

Para que el dimensionamiento sea adecuado, se debe cumplir la siguiente condición:

Gradiente máximo \leq Gradiente límite

CONECTORES.



$$E_m = \frac{U}{R} \frac{2H}{2H-R} \frac{1}{\ln \left(\frac{2H-R}{R} \right)}$$

Donde:

E_m = Gradiente máximo en kV/cm
U = Tensión de cresta aplicada en kV
H = Altura del eje del cilindro en cm
R = Radio del cilindro en cm

2.7 Jaula de Faraday.

La realización de pruebas de descargas parciales en el Laboratorio de Salazar requiere de una alta sensibilidad, por lo que el ruido de fondo debe ser tan bajo como sea posible, del orden de fracciones de 1 pC, por ello debe blindarse el circuito de prueba para evitar las perturbaciones externas y así obtener en las mediciones una alta sensibilidad.

Las consideraciones de la jaula de Faraday contra las interferencias externas, se vieron en el subtema 2.5.1.2 del capítulo II

2.8 Circuito de descargas parciales del Laboratorio de Salazar.

Con las consideraciones hechas al circuito de alta tensión, el circuito de prueba de descargas parciales del Laboratorio quedaría como el mostrado en la figura 5.

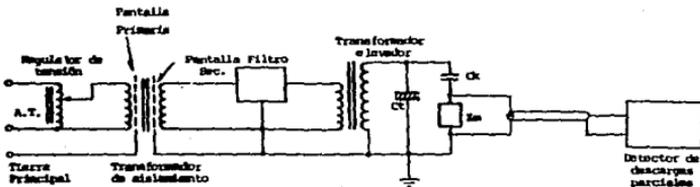


FIGURA 5 Modificación del circuito de alta tensión del Laboratorio de Salazar para la prueba de descargas parciales.

Para garantizar que las interferencias sean mínimas cuando se realicen pruebas, es necesario seguir ciertas precauciones, las más importantes se listan a continuación:

- **Conexión correcta del circuito.** La correcta conexión del circuito proporciona una respuesta más apreciable en el detector, ya que evita alguna falla que provoque algún daño en el equipo, además, proporciona una mayor sensibilidad en la respuesta de la descarga que ocurre en el objeto bajo prueba que la propia interferencia a que tenga lugar.
- **Apretar los espalms (juntas) y tornillos.** En todo el circuito existen juntas de ajuste o tornillos que deben apretarse perfectamente, ya que de lo contrario crean interferencias.
- **Evitar espacios inadecuados.** En el circuito de prueba pueden presentarse arcos y chisporroteos por pequeñas distancias a tierra (dependiendo de la tensión de prueba), originando interferencias en la medición, por ello, se deben verificar los espacios adecuados a la tensión de prueba.
- **Evitar partes flotantes.** El circuito de prueba está expuesto a chisporroteos que se manifiestan por objetos conductores flotantes, principalmente en el piso, por lo que se deben aterrizar todos los objetos conductores cercanos. Lo más conveniente es evitar cualquier objeto flotante en el área de pruebas.

3 Pruebas realizables en el Laboratorio de Salazar.

3.1 Tensión aplicada.

Actualmente, la prueba de tensión aplicada es la única prueba dieléctrica que se practica en el Laboratorio a aparatos de alta tensión, para la verificación de los aislamientos.

Para realizar dicha prueba, se deben seguir una serie de maniobras y tomar precauciones, dado que las tensiones que se manejan son muy altas (hasta 400 kV).

La secuencia de maniobras que se realizan durante una prueba se describirán a continuación.

MANIOBRAS ANTES DE LA PRUEBA.

Cubículo de contactores.

Cerrar el mecanismo 'LIVE TERMINALS' (posición 'ON' de los contactos principales 1-3 y 2-4, ver diagrama 1). Esto trae como consecuencia que la primera lámpara roja 'ISOLATOR CLOSED' de la consola de control se encienda.

En la subestación de 23 kV.

Cerrar manualmente las cuchillas 89-3, para energizar al transformador regulador (23 kV).

En la entrada del Laboratorio.

Verificar que nadie permanezca en el área de prueba.

Cerrar las puertas de acceso al área de prueba.

En la sala de control.

Accionar el interruptor termomagnético 'ISOLATOR' a la posición 'ON' para energizar el circuito de control. La maniobra provoca que se encienda la lámpara ámbar 'INTERLOCKS COMPLETE', indicando que los permisos del circuito permiten el inicio de la prueba.

Accionar el botón pulsador verde 'H.V. ON', que acciona al contactor (7 y 8), para energizar, a partir de cero, al transformador regulador y poder regular la tensión primaria del transformador elevador. La segunda lámpara roja 'CONTACTOR CLOSED' de la consola, se encenderá.

INICIO DE LA PRUEBA.

Colocar la perilla de regulación de voltaje (VOLTAGE REGULATOR) en la posición 'RAISE', hasta alcanzar el 75 % de la tensión de prueba aplicada, o el porcentaje especificado en la norma o en la especificación de prueba. Después de haber alcanzado este valor, se da una pausa de 30 segundos, al cabo de los cuales se incrementa el valor de tensión de prueba al 100 %. Se espera 1 minuto, que es el tiempo especificado de prueba, observando que no ocurra alguna falla. En caso de falla en el objeto de prueba, se deberá interrumpir la energía accionando el botón pulsador rojo 'H.V. OFF', y cambiando el interruptor termomagnético 'ISOLATOR' a la posición 'OFF'.

DESPUES DE LA PRUEBA.

Colocar la perilla de regulaci3n de voltaje (VOLTAGE REGULATOR) en la posici3n 'LOWER', hasta disminuir la tensi3n aplicada a cero. La indicaci3n se ver3 en los voltímetros y en la lámpara ámbar (INTERLOCKS COMPLETE). En seguida se regresa la perilla a la posici3n neutra.

Accionar el bot3n pulsador rojo 'H.V. OFF', para interrumpir la energía al transformador elevador.

Accionar el interruptor termomagnético 'ISOLATOR' a la posici3n 'OFF'.

En el área de prueba.

Abrir la puerta de acceso al área de prueba.

Por medio de una pértiga descargar el objeto bajo prueba.

Inspeccionar el objeto probado.

Una vez terminada la prueba, se debe desenergizar el circuito de alta tensi3n, las maniobras que se realizan para este efecto son las que se dan a continuaci3n.

DESENERGIZACION DEL CIRCUITO DE ALTA TENSION.

En la subestaci3n de 23 kV, abrir las cuchillas 89-3.

En el cubículo de contactores, abrir el mecanismo 'LIVE TERMINALS', posici3n 'OFF'.

Desconectar el elemento probado.

3.2 Descargas parciales.

Actualmente no se realizan pruebas de descargas parciales en el Laboratorio de Salazar, debido a que en el circuito de alta tensi3n que se tiene no cuenta con los elementos y arreglos necesarios para evitar las interferencias de las diversas fuentes que las producen, adem3s de carecer también del equipo de medici3n de descargas parciales. Para habilitar el circuito de alta tensi3n para realizar dicha prueba, es necesario hacer estudios y mediciones de las interferencias que afectan el

circuito y eliminarlas con elementos, arreglos y sistemas adecuados. En el subtema 2 del presente capítulo, se dan algunas consideraciones útiles para la eliminación de las interferencias en el circuito de alta tensión.

Así, sin interferencias en el circuito, se podrán realizar pruebas de descargas parciales en objetos de prueba de hasta 400 kV.

CAPITULO VII

RESULTADOS DE PRUEBAS EXPERIMENTALES

1 Objetivo de las pruebas.

Las pruebas se practicaron a transformadores de instrumento para verificar la calidad de sus aislamientos. Las pruebas que se realizaron son:

- Tensión aplicada.
- Descargas parciales.

Es necesario mencionar que las pruebas no se hicieron en el laboratorio de Salazar, debido a que no se tiene un circuito de descargas parciales, si no que se realizaron en una empresa fabricante de transformadores de instrumento.

Con la prueba de tensión aplicada, se verifica el aislamiento de los embobinados del aparato y con la prueba de descargas parciales se detectan efectos incipientes en él. Ambas pruebas son importantes, igualmente que otras, para garantizar que el aparato resistirá las diversas exigencias a que se verá sometido durante su vida de servicio.

2 Equipo utilizado.

El equipo utilizado es el mostrado en la figura 1, el cual cumple con los requerimientos de bajo nivel de ruido, alta sensibilidad y resolución necesarios para una buena medición de las descargas parciales en el objeto bajo prueba.

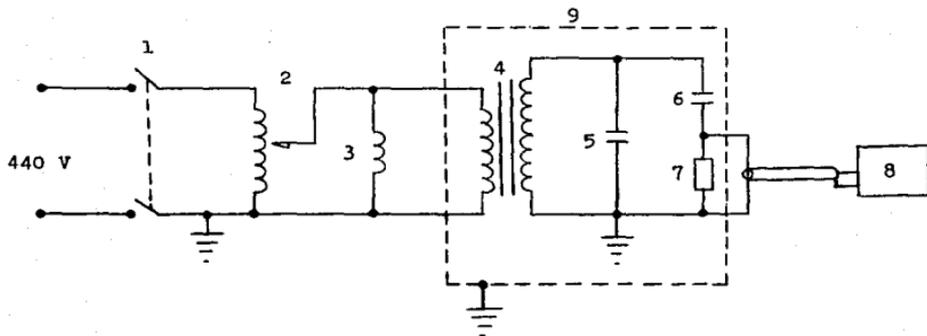


FIGURA 1 Circuito de prueba de descargas parciales utilizado.

- 1) Contactor.
Capacidad: 630 A a 500 V.
Fase: 1 Ø.
- 2) Transformador regulador.
Tensión primaria: 220 V.
Tensión secundaria: 0-500 V.
Potencia: 200 KVA.
- 3) Reactor.
Dos bancos de 80 KVA cada uno, total 160 KVA.
Impedancia del reactor: 1.56 ohms.
El reactor es de alta frecuencia, su función es evitar que las corrientes de alta frecuencia producidas por las descargas parciales circulen hacia el generador de tensión (alimentación).
- 4) Transformador elevador.
Tensión primaria: 440 V.
Tensión secundaria: 500 KV.
Potencia: 60 KVA.
- 5) Capacitor de acoplamiento.
Capacitancia: 1500 pF.

Se utiliza como capacitor de acoplamiento la capacitancia que presenta el transformador elevador. Su función consiste en permitir un camino facil a la corriente de descarga parcial.

6) Objeto bajo prueba.

Los objetos probados son los que se listan a continuación.

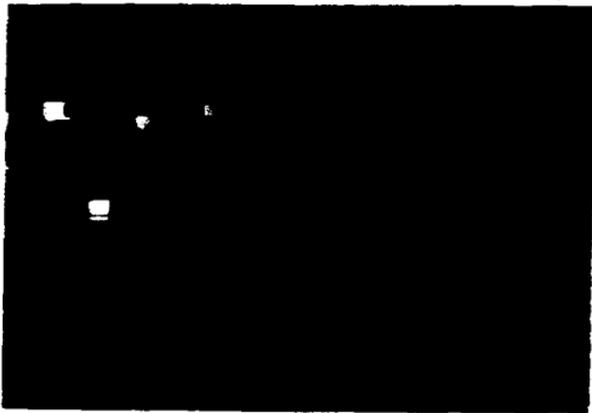
- Transformadores de corriente: QDR-245, SFD-123.
- Transformador de potencial: UEX-110.

El número en cada aparato indica clase de aislamiento.

Otros objetos de prueba o aparatos se muestran en la fotografía 1. Los aparatos en el orden en que aparecen son:

| | | | |
|---------|---------|---------|---------|
| QDR-145 | QDR-145 | SCD-123 | SCD-123 |
| SEX-110 | | SCD-72 | |

los cuales son transformadores de corriente.



FOTOGRAFIA 1 Objetos de prueba (TC's).

7) Unidad de entrada (impedancia de medición).

Es un circuito RCL, tiene una gama de capacitancias para objetos a probar de 100 pF a 1500 pF y una capacitancia C_q de calibración de 50 pF. Corresponde a la unidad de entrada No. 3 del detector de descargas parciales ERA (Electrical Research Association).

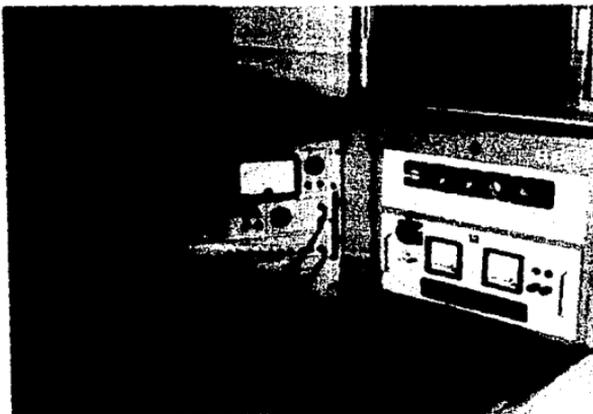
8) Detector de descargas parciales.

Modelo 3 del detector ERA.

El equipo es un instrumento de banda ancha (40 a 220 KHz) con límite de capacitancia del objeto bajo prueba de 6 pF a 250 uF. Posee alta sensibilidad: 0.02 pC para objetos de prueba de 400 pF y resolución de 20 us (250 descargas por cuarto de ciclo).

El detector tiene incorporado un generador de pulsos patrón para llevar a cabo la calibración, la cual es directa.

El equipo detector de descargas parciales, además del equipo para la prueba de tensión aplicada se muestra en la fotografía 2.



FOTOGRAFIA 2 Equipo de medición de descargas parciales y equipo para la prueba de tensión aplicada.

9) Jaula de Faraday.

Cámara blindada con hojas de cobre de 0.39 mm. Se tiene doble blindaje (doble hoja de cobre).

3 Circuitos de prueba empleados.

Los circuitos de prueba fueron básicamente dos, los cuales corresponden a IC's y IP's. En el circuito para IC's vale igualmente para ambas pruebas: descargas parciales y tensión aplicada. En el caso de IP's, la prueba de descargas parciales se hace junto con la prueba de potencial inducido y en las conexiones hay un cambio al pasar de una prueba a otra.

Los circuitos se muestran en las figuras 2 y 3 siguientes:

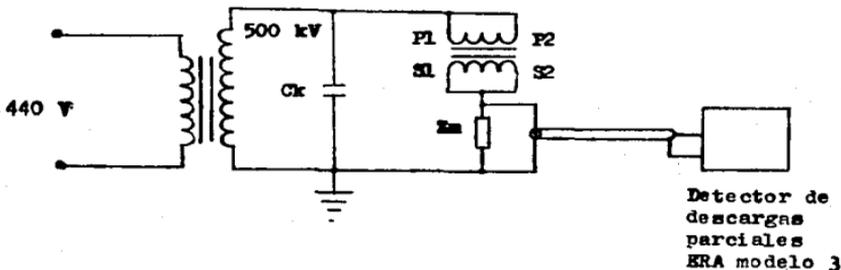


FIGURA 2 Circuito eléctrico para las prueba de descargas parciales y tensión aplicada en IC's.

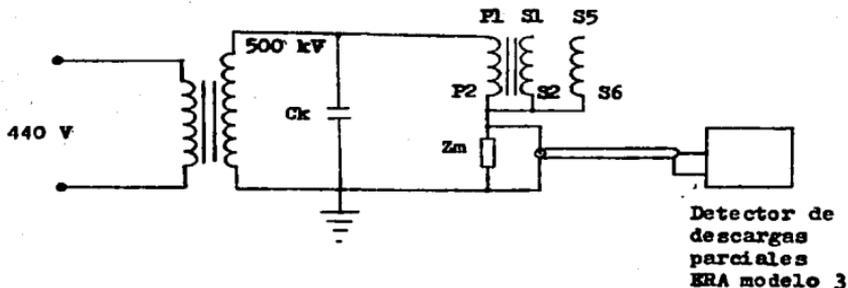


FIGURA 3 Circuito eléctrico para la prueba de descargas parciales en TP's.

El circuito de la figura 2 resulta práctico, pues no se necesitan realizar cambios en las conexiones del aparato bajo prueba al pasar de la prueba de descargas parciales a la de tensión aplicada y viceversa, no así en el circuito de la figura 3 en el que si hay cambios, aunque éstos son mínimos.

4 Conexiones y recomendaciones.

4.1 Conexiones.

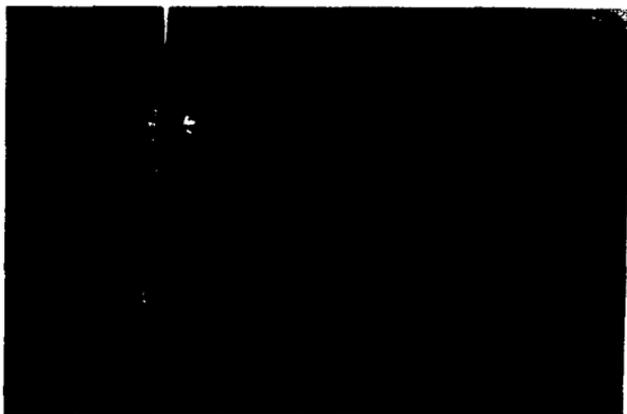
Transformadores de corriente.

La prueba de descargas parciales en transformadores de corriente se realiza junto con la prueba de potencial aplicado, las conexiones son las siguientes:

Se cortocircuitan los devanados primarios y secundarios, éstos ditimos, además, se conectan a la mesa o tierra del aparato, la unidad de entrada se conecta en serie con el objeto bajo prueba.

Se energiza por el bobinado primario.

En la fotografía 3 siguiente, se indican las conexiones anteriores.



FOTOGRAFIA 3 Conexiones para las pruebas de descargas parciales y potencial aplicado en un TC.

Para la prueba de potencial aplicado, sólo en los bobinados secundarios, éstos se cortocircuitan sin conectarlos a la masa del aparato y se aplican en ellos 2.5 KV, después se van probando cada devanado entre si.

Transformadores de potencial.

Para la prueba de descargas parciales: un borne del devanado primario (P-2) se aterriza y conecta a la masa del aparato, además, se conectan a la base los finales de los devanados secundarios y la unidad de entrada en éstos. Se energiza por el otro borne (P-1) del devanado primario del aparato.

Para la prueba de potencial inducido que es junto con la que se hace la prueba anterior, solo se desconecta la unidad de entrada y en su lugar se conecta una tierra.

Para la prueba de potencial aplicado: se aterriza P-2, los devanados secundarios se cortocircuitan y conectan a la base del aparato. Se energiza por P-1. La prueba para los devanados secundarios es: se mantiene una tierra en P-1, los devanados secundarios en corto y se energizan éstos con 2.5 KV. Después se elimina el corto que interconecta dos o más devanados, pero manteniendo en corto cada devanado y nuevamente se aplica, ahora en un devanado, 2.5 KV.

4.2 Recomendaciones antes de la prueba.

Antes de energizar el circuito, es necesario verificar que se han hecho adecuadamente las conexiones. Cuando el elemento a probar posee orillas o puntas agudas y filosas, éstas se deben cubrir con esferas metálicas para minimizar el efecto corona o descargas corona.

5. Método de prueba.

El método de prueba a materiales aislantes y equipos eléctricos, como el caso de los transformadores de medición, están establecidos en normas.

Se mencionó anteriormente que para los transformadores de corriente, las pruebas de descargas parciales y tensión aplicada se hacen simultáneamente, la secuencia de prueba en tiempo y voltaje aplicado de prueba se muestra en la figura 4.

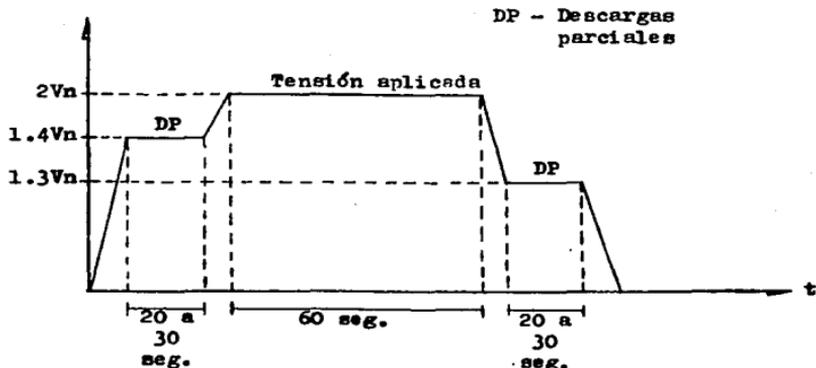


FIGURA 4 Secuencia de prueba para las pruebas de descargas parciales y tensión aplicada en transformadores de corriente.

El método de prueba fue el siguiente:

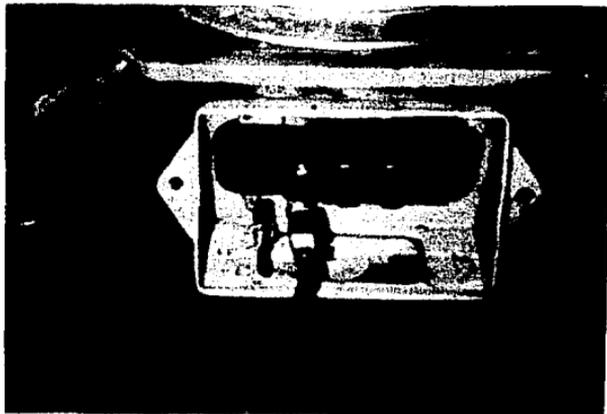
Se aplica al objeto bajo prueba una tensión suficientemente baja y se incrementa lentamente hasta el 1.4 del voltaje de la clase de aislamiento (V_n), si se detectan descargas parciales antes de este nivel, se anota la tensión a la que aparecieron y se mide el nivel de las descargas y se anotan, en seguida se incrementa el nivel de tensión al 1.4 V_n y se espera de 20 a 30 segundos, se mide el nivel de descargas y se anotan, si no hay ninguna variación en el nivel, se procede a disminuir la tensión al 1.1 V_n y se mide nuevamente el nivel de las descargas y se anotan, en seguida se vuelve a disminuir la tensión hasta que desaparezcan las descargas parciales y se anota el nivel de voltaje. Se disminuye la tensión a cero.

En caso de que no se hayan presentado descargas parciales al 1.4 V_n y después de haber esperado el tiempo especificado de prueba (20 a 30 segundos), se procede a relizar la prueba dieléctrica: tensión aplicada para IC's y tensión inducida para IP's, en el

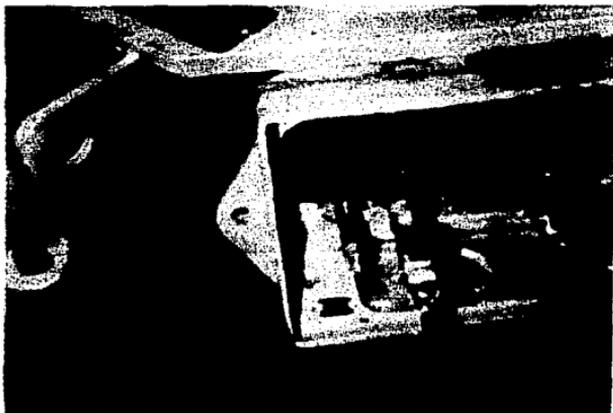
segundo caso se hacen los cambios a las conexiones del aparato bajo prueba. Para TC's a partir de 1.4Vn se eleva la tensión al voltaje de prueba de tensión aplicada y se espera el tiempo especificado (1 minuto). en seguida se varia el nivel de tensión al 1.3Vn para nuevamente la prueba de descargas parciales, en el que se mide el nivel y se anota, si no aparecen descargas. el aparato pasa ambas pruebas. se disminuye la tensión a cero y se desenergiza el circuito, en caso de aparecer descargas se sigue el mismo procedimiento que el caso de aparición de las mismas antes de 1.4Vn. pero en este caso hasta 1.3Vn.

Para la prueba de tensión aplicada en los devanados secundarios de los transformadores de corriente. se aplican 2.5 KV y se espera el tiempo especificado.

Las fotografias 4 y 5 muestran las conexiones en los devanados secundarios de un aparato para realizar la prueba en ellos.



FOTOGRAFIA 4.



FOTOGRAFIA 5.

Si durante la prueba de potencial aplicado, hubiera alguna falla en los aislamientos del aparato, se visualizaría en los instrumentos medidores: disminución de la tensión en el voltmetro y aumento de la corriente en el ampermetro.

Para los transformadores de potencial, se sigue el mismo procedimiento que los transformadores de corriente, sólo que ahora con las pruebas de descargas parciales y potencial inducido, al pasar de una a otra prueba se deben realizar los cambios pertinente en las conexiones del aparato bajo prueba.

La prueba de potencial inducido se realiza a una frecuencia de 153 Hz con una duración de 47 segundos. La secuencia de las pruebas se muestra en la figura 5. La prueba de descargas parciales en estos aparatos se realiza a una sola tensión (1.1Vn) como se muestra en la figura.

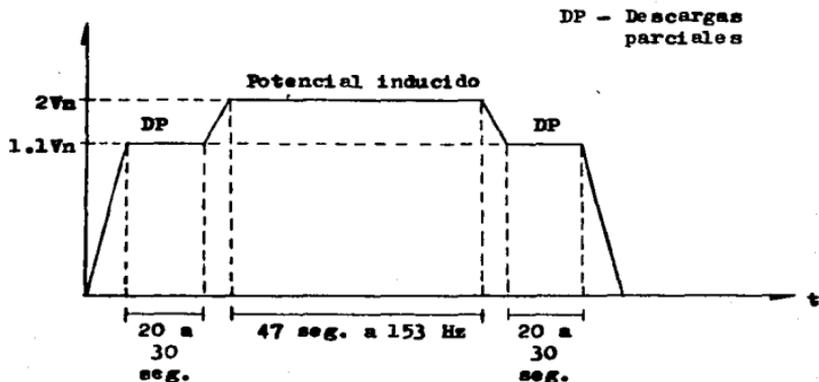


FIGURA 5 Secuencia de prueba para transformadores de potencial para las pruebas de descargas parciales y potencial inducido.

Para la prueba de tensión aplicada, se aplican 19 KV (por norma), si los transformadores son de aislamiento reducido (ya que se da a lo largo del aparato) y 2Vn si no lo son.

Para la prueba en los devanados secundarios, se aplican 2.5 KV.

La medición de las descargas parciales, se hace realizando la calibración (indirecta) y comparando las descargas con el pulso de calibración. La medición se da en db y mediante una tabla en que ya se tiene la conversión de db a pC, la medición se da finalmente en pC.

Para las dos pruebas que se tratan, el criterio que se sigue en forma rutinaria para ver si los aparatos pasan o no la prueba es el siguiente:

Descargas parciales: aparatos con un nivel de descargas parciales < 10 pC está en buenas condiciones. en caso contrario está fallando en sus aislamientos, por lo que se envía al aparato a que lo retraten, según el nivel de las descargas parciales. El criterio en el nivel permitido de descargas parciales (< 10 pC)

es más riguroso que el permitido en las normas CEI.

Potencial aplicado: si el aparato soporta la tensión especificada de prueba, está en buenas condiciones, en caso contrario (arqueo por fuera) el aislamiento interno falló, en estas condiciones se recupera lo que se pueda del aparato.

6 Resultados de las pruebas.

Los aparatos bajo prueba son transformadores de instrumento, de los cuales de los tipos probados, dos corresponden a transformadores de corriente y sólo uno a transformadores de potencial. En número de unidades probadas así como los tipos se indica a continuación:

Transformadores de corriente.

SFM-123 ----- 16 Unidades
QDR-245 ----- 11 Unidades

Transformadores de potencial.

UEX-110 ----- 4 Unidades

Número total de unidades probadas ----- 31

En las siguientes hojas de medición (hojas 1, 2, 3 y 4), se presentan los resultados de las pruebas de descargas parciales y tensión aplicada, así como el tipo de transformador probado.

En las hojas de medición 1 a 3, la prueba de tensión aplicada se refiere como prueba dieléctrica y va implícita, ya que de no haber pasado la prueba un aparato, no se hubiera registrado el nivel de las descargas después de ella. En la parte (b) de dichas hojas se indica que al aparato se le practicó y pasó la prueba de potencial aplicado.

En el caso de la hoja de medición 4 (transformadores de potencial), la prueba dieléctrica se refiere a la prueba de potencial inducido (como ya se dijo antes) y también es implícita. La indicación de la prueba de potencial aplicado (como en la parte (b) de la hoja de medición de transformadores de corriente) está contenida en una etiqueta que lleva el aparato.

PRUEBAS DIELECTRICAS

TPO DRR-245

| TENSION DE PRUEBA DIELECTRICA ENTRE BAJA TENSION Y TIERRA ...KV. | TENSION DE PRUEBA DIELECTRICA ENTRE ALTA Y BAJA TIERRA ...KV. | NUMERO DE FABRICACION |
|---|--|-----------------------|
| / | / | 9 ✓ |
| / | / | 11 ✓ |
| / | / | 7 ✓ |
| / | / | 1 ✓ |
| / | / | 5 ✓ |
| / | / | 6 ✓ |
| / | / | 8 ✓ |
| / | / | 3 ✓ |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |

(b)

Hoja de medición 1 (continuación).

PRUEBAS DIELECTRICAS

TPO 009-245

| TENSION DE PRUEBA DIELECTRICA ENTRE BAJA Y TIERRA ...KV. | TENSION DE PRUEBA DIELECTRICA ENTRE ALTA Y BAJA TIERRA ...KV. | NUMERO DE FABRICACION |
|---|--|-----------------------|
| / | / | 11 ✓ |
| / | / | 2 ✓ |
| / | / | 5 ✓ |
| / | / | 3 ✓ |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |

(b)

Hoja de medición 2 (continuación).

PRUEBAS DIELECTRICAS

TPO SEB-123

| TENSION DE PRUEBA DIELECTRICA ENTRE BAJA TENSION Y TIERRA ..2.5..KV. | TENSION DE PRUEBA DIELECTRICA ENTRE ALTA Y BAJA A TIERRA ..2.30..KV. | NUMERO DE FABRICACION |
|--|--|-----------------------|
| / | / | 3 ✓ |
| / | / | 7 ✓ |
| / | / | 8 ✓ |
| / | / | 1 ✓ |
| / | / | 15 ✓ |
| / | / | 4 ✓ |
| / | / | 9 ✓ |
| / | / | 5 ✓ |
| / | / | 2 ✓ |
| / | / | 6 ✓ |
| / | / | 18 ✓ |
| / | / | 14 ✓ |

(b)

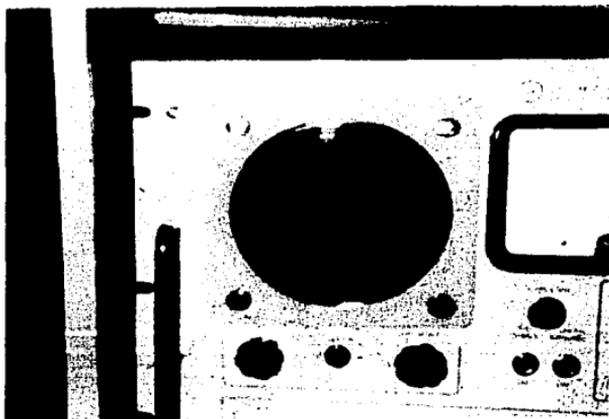
Hoja de medición 3 (continuación).

7 Interpretación de resultados.

Para una interpretación objetiva de los resultados, se tiene una serie de configuraciones de los patrones típicos de descargas parciales (vistas en el capítulo II), establecidos en una base de tiempo elíptica (60 Hz), en la que se manifiestan las descargas que pueden ocurrir en el objeto bajo prueba.

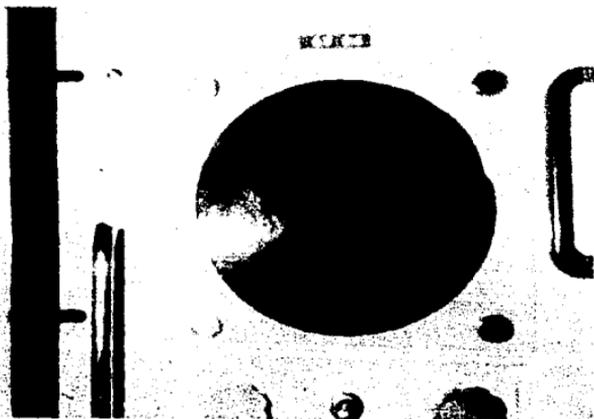
Con dichas configuraciones, se ayuda a distinguir cada una de los fenómenos que tienen lugar mediante la pantalla del osciloscopio al realizar la prueba de descargas parciales (capítulo II). Para tener una idea más clara sobre las descargas parciales sobre aparatos, manifestadas mediante la pantalla del osciloscopio (base de tiempo elíptica), durante la prueba de descargas parciales, se dan a continuación varias fotografías.

Fotografía 6: Descargas parciales en un TC con un nivel de 63 pC. El aparato pasó la prueba de potencial aplicado, pero no la de descargas parciales.



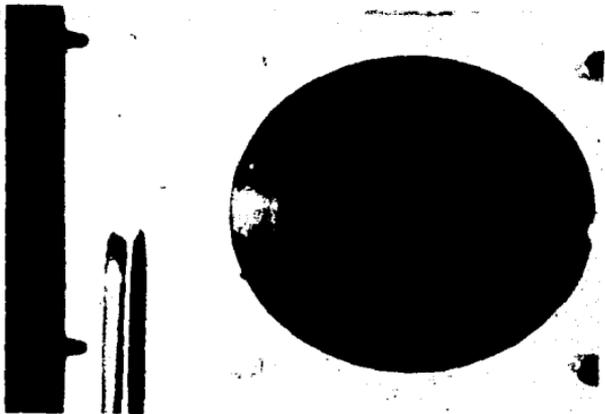
FOTOGRAFIA 6.

Fotografía 7: IC que no presenta descargas parciales internas, las descargas observadas son externas que no representan daño para el aparato. El aparato pasó las pruebas tanto de descargas parciales como de potencial aplicado.



FOTOGRAFIA 7.

Fotografía 8: IC con un nivel de descargas parciales de 12 pC; sin embargo al aumentar la tensión a 1.4Vn el nivel de descargas aumenta a 25 pC, por lo que el aparato no pasa la prueba de descargas parciales, no obstante el aparato sí pasó la prueba de potencial aplicado.



FOTOGRAFIA 8.

CONCLUSIONES

Y

RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES.

Todo aparato o equipo eléctrico presenta en sus aislamientos pequeñas fallas, que provoca una disminución de sus propiedades dieléctricas, aumentadas con las sobretensiones que puedan ocurrir en el sistema eléctrico del que forman parte, provocando un envejecimiento más rápido y debilitando los aislamientos del aparato o equipo, creando con ello que éstos estén propensos a fallar y crear problemas en el sistema eléctrico.

Los aislamientos son de suma importancia en todo aparato o equipo eléctrico. su vida depende en gran medida de ellos, así como de la elección y de su empleo correcto. Sus características tanto físicas, como química y eléctricas dependerán de las características del material aislante, así como del proceso de fabricación.

El grado de homogeneidad de los materiales aislantes de aparatos y equipos eléctricos, se verifican mediante las pruebas dieléctricas; en ellas se observan las buenas condiciones de los aparatos y equipos para que puedan trabajar en su lugar de utilización, tanto en condiciones normales como transitorias de operación. Con dichas pruebas se detectan defectos en los aislamientos, así como defectos en la mano de obra. Pruebas dieléctricas como la de Potencial Aplicado, detecta fallas en los aislamientos que pueden ser graves, ya que pueden provocar la ruptura del dieléctrico y por ende la falla del aparato o equipo eléctrico; y la de factor de pérdidas (tan δ) y factor de potencia, que detectan contaminaciones, productos de deterioro o humedad, mediante una lectura proporcional a la energía disipada en forma de calor. Estas tres pruebas son solo algunas de las pruebas dieléctricas que se practican a los aparatos y equipos eléctricos antes de salir de la fábrica, para garantizar que el aparato tendrá una seguridad de funcionamiento para trabajar con

en condiciones adversas.

Las descargas parciales son pulsos eléctricos pequeños, que involucran cantidades pequeñas de energía que no son apreciables, sin embargo, provocan debilitamiento progresivo de los aislamientos y como consecuencia disminuye la vida útil. Ocurren en las fallas de los aislamientos al estar sometidos a una diferencia de potencial, provocando una ruptura en forma parcial de los aislamientos y provocando diversos fenómenos de conversión de energía, los que se utilizan para detectarlos.

Las descargas parciales no siguen un principio teórico, tienen una fuerte variación; amplitudes y períodos diferentes, debido a la multiplicidad de cavidades, a la deformación del campo en ellas y a la interacción de sus diversos esfuerzos. Esto hace que las descargas parciales no puedan detectarse en el lugar en que se producen, sin embargo, la descarga se propaga a través de los aislamientos, produciendo una señal, proporcional al pulso producto de la descarga, en las terminales del aparato, la que se utiliza como medio de detección y medición de las descargas parciales.

El método que más se emplea por su alta sensibilidad para la detección y medición de las descargas parciales, es el de máxima carga aparente, el que utiliza los pulsos producto de las descargas. La señal que se forma en las terminales del aparato que se prueba, se recoge mediante la impedancia de medición y se transmite hasta el detector de descargas parciales para su cuantificación. Para la medición, se utiliza el osciloscopio, ya que presenta muchas ventajas para la cuantificación, observación, discriminación y diagnóstico de las descargas parciales. Debido a que las descargas son pequeños transitorios, las interferencias que existen en el ambiente, así como las que ocurren en el circuito de prueba, pueden afectar significativamente la medición, ya que se visualizan en el osciloscopio también, como descargas parciales, es decir, las perturbaciones afectan la sensibilidad de las mediciones.

En la actualidad, la prueba de descargas parciales representa una herramienta muy importante para la verificación de la calidad de los aislamientos, con ello se obtiene información importante sobre los defectos que puedan presentar los aislamientos, el estado en que se encuentran éstos y una información oportuna sobre las condiciones de operación del equipo. Las descargas parciales involucran pequeñas cantidades de energía, sin embargo, pueden conducir a un deterioro progresivo del aislamiento hasta llegar a su ruptura total, con la información que se obtiene con la técnica de las descargas parciales, pueden localizarse, y al

corregir dichas descargas, se disminuye la probabilidad de falla, con ello se garantiza continuidad de servicio y se evitan grandes pérdidas económicas. Con la información obtenida con esta técnica, se puede mejorar la calidad y la construcción de los materiales de los equipos eléctricos, muy importantes para el país, pues al tener aparatos más confiables y eficientes se ahorran pérdidas económicas por falla de aparatos.

Los trabajos para proteger contra las interferencias el circuito de alta tensión del Laboratorio de Salazar (con sistemas, dispositivos y medidas), para obtener un circuito de descargas parciales, desafortunadamente no pudieron llevarse a cabo, como se pretendía originamente, ello debido a cuestiones económicas y dado que por ahora no se tiene contemplado un proyecto así, no obstante, las recomendaciones dadas en el presente trabajo serán de utilidad cuando se tenga el proyecto y se trabaje en el circuito de alta tensión para eliminar dichos disturbios.

RECOMENDACIONES.

Todo sistema eléctrico debe poseer protecciones adecuadas, para limitar las magnitudes de las sobretensiones a niveles que puedan resistir, sin problemas, los equipos y aparatos componentes del sistema.

Todo aparato o equipo eléctrico, estando en servicio, estará sometido en determinadas ocasiones a trabajar en condiciones arriba de las nominales o en condiciones atmosféricas adversas, para ello se deben elegir los aislamientos adecuados con un coeficiente de seguridad alto, así como poner especial cuidado en los procesos de fabricación, para así, habiendo pasado las pruebas dieléctricas satisfactoriamente, garantizar que el aparato trabajará por un periodo de vida largo (10 o más años).

Las pruebas dieléctricas verifican el nivel de calidad de los aislamientos de los aparatos, obteniendo así, información de su estado, sin embargo, dicha información no es completa, dado que en los aislamientos existen cavidades, inclusiones, burbujas de gas, partículas conductoras, etc. en las que se producen pequeñas descargas, que aunque involucren pequeñas cantidades de energía, provocan el deterioro progresivo de los materiales aislantes, por ello, se recomienda realizar conjuntamente con las pruebas dieléctricas la prueba de descargas parciales, para así obtener una información más completa del estado de los aislamientos y poder mejorar los procesos para obtener mejores aislamientos.

Las interferencias afecta la medición de las descargas parciales, por lo que para medir las descargas verdaderas que ocurren en los aislamientos de los aparatos, el circuito de prueba debe poseer las protecciones adecuadas con elementos y arreglos en él, además, tomar las debidas precauciones, así como realizar la(s) prueba(s) dentro de una jaula de Faraday, además de esto, utilizar un detector de máxima carga aparente con osciloscopio de rayos catódicos de barrido elíptico, sincronizado con la tensión de prueba, para tener la máxima oportunidad en la medición, discriminación y diagnóstico de las descargas parciales.

BIBLIOGRAFIA.

Técnica de las Altas Tensiones.

G. Enríquez Harper.

Segunda preedición, 1980.

Editorial Limusa.

Técnica de la Alta Tensión.

Arnold Koth.

Editorial labor S.A., 1966.

Norma CCONNIE 2.1-1, 'Transformadores de Distribución', Julio de 1971.

Norma CCONNIE 2.1-2, 'Transformadores de Potencia', Octubre de 1975.

Norma CCONNIE 2.1-3, 'Transformadores de Distribución y Potencia', Julio de 1972.

Pruebas de Descargas Parciales a Transformadores de Distribución (Tesis profesional).

Tomas Ignacio Asiain Olivares.

E.S.I.M.E. - I.P.N., 1980.

Partial Discharge Measuring Techniques, IETIEXX. Information, 21.

Pruebas a Transformadores de Medición.

Pedro Maigler R.

Electrotécnica Balteau S.A.

Norma I.E.C. 270. 'Partial Discharge Measurements', 1968.

Análisis de las Técnicas de Medición de Descargas Parciales en Transformadores.

Raúl Méndez Albores.

Boletín I.I..E., Enero/Febrero de 1988.

Las Descargas Parciales.
Electrotécnica APTECHE HNOS. S.A.
Bilbao.

Estudio de la Importancia de las Descargas Parciales en Equipo de
Alta Tensión (Tesis profesional).
José Gasca Medina.
E.N.E.P. Aragón - U.N.A.M.

Partial Discharge Measurement and Interpretation.
David A. Nattrass.
I.E.E.E., Electrical Insulation Magazine, May/June 1988 - Vol. 4,
No. 3.

Recomendaciones para el Proyecto de un Laboratorio para la
Medición de Descargas Parciales.
Karl Méndez Albores.
México 80.

Recognition of Discharges.
Working Group 03 of Study Committee 21.
Electra No. 11, December 1969.

Curso de Medición de Descargas Parciales.
Edgar Robles Pimentel.
I.I.E. Palmira, Morelos, 1987.

Les Perturbations et les Parasites.
Lorenzo Thione.
Revue General de L'électricite, Mai 1978, pags. 55-67.

Elimination of Interference in Discharge Detection.
Working Group 03 of Study Committee 21.
Electra No. 21, March 1972.

Norma BS-358, 1960, 'Method for the Measurement of Voltage with
Sphere - Gaps.

Norma I.E.E.E. No. 4 - USAS CG8.1, 1968. 'Techniques for
Dielectric Test'.

Norma I.E.E.E. Std. 4, 1978, 'Standard Techniques for High-Voltage Testing'.

Pruebas de Alta Tensión para Elementos Capacitivos.
Ing. Sabas Lopez M. y M.I. Kuben D. Ochoa V.
Estudio Interno, Marzo de 1988, Instituto de Investigaciones Eléctricas.

Discussion of Practical Value of Internal Partial Discharge Measurements on High - Voltage Insulation Systems for Rotating Machines.

Tor Orbeck.
I.E.E.E. Transactions on Electrical Insulation, Vol. EI-8, No. 3, September 1973.

Dielectrics.
P.J. Harrop.
Butterworths.

Puesta en Servicio de los Transformadores de Potencia (Tesis profesional).
Pedro Lechuga Garrido.
E.N.E.P. Aragón - U.N.A.M., 1986.

Boletín I.I.E. Mayo/Junio 1987, Vol. 11, No. 3.

Manual de Procedimiento de Operación del Circuito de Alta Tensión (400 KV), del Laboratorio de Pruebas Eléctricas de Salazar.
Ing. Sabas Lopez M., Raymundo Flores D. e Ing. Jorge Amaya S.
Laboratorio de Pruebas Eléctricas de Salazar, Marzo de 1989, Instituto de Investigaciones Eléctricas.

Cálculo de la Instalación de Tierra para la Subestación Línea Experimental 400 KV.
Instituto de Investigaciones de la Industria Eléctrica, Noviembre de 1968, Comisión Federal de Electricidad.

The Detection and Measurement of Partial Discharge in High Voltage Insulation.

Victor M. Gray.
Instituto de Investigaciones Eléctricas.