

Estudio de Descargas Parciales y Ensayos en Transformadores de Medida de Alta Tensión



Proyecto Integrador Profesional

Candía Nicolás – Ríos Maximiliano

Director: Ing. Suárez Daniel

Co-Director: Ing. Escalona Marcela

Asesores: Ing. Rodríguez Gustavo

Ing. Maturano Alejandro

Carrera: Ingeniería Eléctrica

RESUMEN

El problema fundamental a la hora de comprobar la calidad del aislamiento eléctrico de los aparatos de alta tensión es la realización de pruebas sin dañar o incluso destruir el objeto de prueba. Las pruebas se supone que deben suministrar criterios suficientemente válidos para inferir o revelar puntos débiles del equipo en condiciones de servicio. Entre otras, la detección y el análisis de las descargas parciales ayudan a llevar un registro del estado de la aislación de los elementos que se están ensayando.

En el presente trabajo se expondrá el concepto de las descargas parciales. El por qué se producen, así como los diferentes tipos de descargas que pueden estar presentes en los dieléctricos.

Se presentan también los modelos que permiten entender su comportamiento y establecer parámetros para su análisis. Se hará uso de normativas internacionales que darán una base firme a los temas que se emprenderán durante el desarrollo del trabajo.

Se verán dos métodos diferentes utilizados para la detección de descargas parciales, el método eléctrico y el de gases disueltos. Con ellos se evaluarán y se obtendrán resultados que permitan estimar el estado de los aislantes.

Finalmente se dará una conclusión en la que se tratará de transmitir las experiencias adquiridas en el desarrollo de este trabajo.

SUMMARY

The fundamental problem of checking the quality of the electrical insulation of high voltage equipment is testing without damage or even destroy the test object. The tests are supposed to provide sufficient valid criteria to infer or reveal weak points in the in service team. Also, the detection and analysis of partial discharges help keep track of the status of the isolation of the elements being tested..

In the present work the concept of partial discharges will be discussed. Why they are produced as well as the different types of discharges that can be present in dielectrics.

Models for understanding their behavior and set parameters for analysis are also presented. The use of international standards which will give firm the issues that will be present in the development of work base.

Two different methods used for the detection of partial discharge, the electrical method and the method of dissolved gases will see. With them evaluate and get results to estimate the condition of the insulation.

Finally it gives a conclusion in which they were to convey the experiences gained in the development of this work.

RECONOCIMIENTOS Y DEDICATORIAS

Los autores expresan su agradecimiento a:

A modo personal, a nuestras familias que acompañaron nuestro crecimiento como profesionales y que estuvieron y están en cada momento de nuestras vidas.

Se agradece la colaboración de cada uno de los integrantes del Laboratorio de Alta Tensión. Un grupo excelente. Su interés y esmero han hecho de este trabajo nuestra mayor satisfacción.

Agradecimiento a nuestro tutor, el cual nos guio durante la realización de dicho trabajo y nos acompañó durante las prácticas que fueron necesarias para la fundamentación del mismo.

Agradecimiento a nuestra co-tutora por las contribuciones y recomendaciones dadas, aportando ideas, información y afinar este material en diversos contextos.

ACRÓNIMOS

IEE	Instituto de Energía Eléctrica
PD	Descarga Parcial
pC	picoCoulomb
mV	miliVoltios
kV	kiloVoltios
nF	nanoFaradio
pF	picoFaradio
ϵ	Permitividad
f	Frecuencia
q _a	Carga externa
DGA	Análisis de Gases Disueltos
C	Capacidad eléctrica
R	Resistencia
Z	Impedancia
U	Tensión

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	I
SUMMARY.....	II
RECONOCIMIENTOS Y DEDICATORIAS.....	III
ACRÓNIMOS	IV
ÍNDICE GENERAL.....	V
1 INTRODUCCIÓN.....	1
2 MARCO TEÓRICO	3
2.1 Tipos de descargas parciales.....	4
2.2 Modelo de descarga parcial capacitivo.....	7
2.3 Modelo Dipolo.....	11
3 MÉTODOS DE ENSAYO DE DESCARGAS PARCIALES	18
3.1 Introducción.....	18
3.2 Medición de descargas parciales	19
3.2.1 Medición de descargas parciales On Línea	19
3.2.2 Medición de descargas parciales fuera Off Línea	19
3.3 Métodos de detección de descargas parciales.....	20
3.3.1 Análisis de Gases Disueltos (DGA)	21
3.3.2 Detección de pulsos eléctricos.....	30
3.3.3 Detección eléctrica y medición de descargas parciales de acuerdo a la Norma IEC 60270.....	38

4	FORMAS DE ONDA QUE ENTREGAN LOS SISTEMAS DE MEDICIÓN	40
4.1	Descargas en electrodos.....	41
4.2	Objetos sueltos.....	42
4.3	Descargas parciales en aire y hexafloruro de azufre	43
4.4	Descarga corona en aceite	43
4.5	Algunas fuentes de interferencia	44
5	ENSAYO PRÁCTICO DE DESCARGA PARCIAL	45
5.1	Procedimiento.....	45
5.2	Esquema de medición.....	47
5.3	Procedimiento de Calibración	48
5.3.1	Proceso de calibración del DDX-9101	49
5.4	Ensayos realizados.....	51
5.4.1	Ensayo sobre Transformador de Corriente de 132 kV -T1	51
5.4.2	Ensayo sobre Transformador de Tensión de 13,2 kV -T2.....	55
5.4.3	Ensayo sobre Descargador de Sobretensiones de 132 kV	58
5.4.4	Verificación de sensibilidad del instrumento.	61
5.5	Ensayo por el método de gases disueltos.....	62
5.5.1	Transformador 13,2kV - T3.....	63
5.5.2	Transformador 33kV – T4.....	65
6	CONCLUSIONES.....	67
7	ANEXO I – TRIÁNGULOS DE DUVAL	71
7.1	Triángulo para cambiadores de tomas de carga de aceite	71
7.2	Triángulo para aceites no minerales	71

7.3	Triángulo para transformadores con fallas de baja temperatura en aceite mineral	72
7.4	Triángulo para transformadores con fallas de baja temperatura en aceite mineral	73
7.5	Triángulo para averías de baja temperatura en aceites FR3	73
8	ANEXO II – DATOS DE EQUIPOS UTILIZADOS	75
9	BIBLIOGRAFIA	77

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 Descargas Internas	5
Figura 2-2 Descargas en el Dieléctrico.....	5
Figura 2-3 Descarga Corona.....	5
Figura 2-4 Descarga Ramificada	5
Figura 2-5 Descargas Superficiales	5
Figura 2-6 Modelo Capacitivo.....	7
Figura 2-7 Modelo redes de capacitores. Modelo abc.....	8
Figura 2-8 Modelo Dipolo en las paredes de una cavidad. Circuito Elemental	12
Figura 2-9 Parámetros usados para la estimación de la energía transferida de un electrón y de su ion asociado.....	13
Figura 2-10 Densidad de campo dependiendo de la longitud de la cavidad	14
Figura 2-11 Parámetros usados para el análisis de descarga parcial en un cable de potencia.....	15
Figura 2-12 Descargas parciales vs diámetro de la cavidad. Datos experimentales de un cable en MV.....	16
Figura 2-13 (a) Tensión de inicio vs Carga, en la descarga parcial (b) Tensión de inicio vs diámetro de cavidad, en la descarga parcial en cables de media tensión.....	17
Figura 3-1 Proporción de Gases según el tipo de falla	25
Figura 3-2 Triángulo de Duval	29
Figura 3-3 Circuito equivalente de una descarga parcial	31
Figura 3-4 Patrón de descargas parciales	34
Figura 3-5 Patrón de descargas parciales en una elipse.....	34

Figura 3-6 Principio de medición del pulso de corriente.....	35
Figura 3-7 Registros de la señal de tensión capturados de una impedancia de medición RC conectada en serie con un arreglo de punto a plano del electrodo (trazo violeta) y tensión de prueba de CA asociado (trazo verde)	36
Figura 3-8 Circuito de medición de descargas parciales usando un condensador de acoplamiento en serie con una impedancia de medición.....	38
Figura 3-9 Circuito directo normalizado para la medida de Descargas Parciales	39
Figura 3-10 Circuito indirecto normalizado para la medida de Descargas Parciales	40
Figura 4-4-1 Descargas parciales en dieléctricos	41
Figura 4-4-2 Descarga parcial asimétrica.....	42
Figura 4-4-3 Ejemplo de descarga en electrodo	42
Figura 4-4-4 Descargas parciales por objetos flotantes.....	43
Figura 4-4-5 Descarga corona en los electrodos de alta tensión.	43
Figura 4-4-6 Descarga corona en aceite	44
Figura 4-4-7 Fuentes de interferencia: (a) Causada por tiristores; (b) por lámpara fluorescente; (c) máquina asincrónica	45
Figura 5-1 Circuito utilizado para medición de Descarga Parcial.....	47
Figura 5-2 Circuito utilizado para calibración del medidor de Descarga Parcial.....	49
Figura 5-3 Detalle de Descarga Parcial DDX-9101	50
Figura 5-4 Calibración de descarga parcial en DDX-9101	50
Figura 5-5 Calibración del instrumento.....	53
Figura 5-6 Medición de descargas parciales en transformador de corriente	54
Figura 5-7 Calibración del instrumento a 100pC	56

Figura 5-8 Medición de descargas parciales en transformador de tensión.....	57
Figura 5-9 Calibración del instrumento a 100pC	59
Figura 5-10 Medición de descargas parciales en descargador de sobretensiones	60
Figura 5-11 Medición de descargas parciales en conductor de aluminio.....	61
Figura 6-1 Porcentaje de diagnósticos incorrectos y correctos	69
Figura 8-1 Detector de descarga parcial DDX-9101	75

1 Introducción

Motivo del trabajo

Desde hace años ha habido un creciente interés en el estudio e investigación de descargas parciales, ya que ha demostrado ser un buen indicador del estado de degradación de los materiales aislantes.

Todos los materiales aislantes poseen, en general, una elevada rigidez dieléctrica que les permite soportar altos niveles de tensión mientras separan zonas activas en instalaciones y equipamiento eléctrico. Sin embargo, esta propiedad dieléctrica puede disminuir con el tiempo dependiendo de los esfuerzos térmicos, mecánicos, sobre sollicitaciones dieléctricas y factores ambientales o químicos a los que se encuentran sometidos, con los cual se acelera su envejecimiento y propicia la posibilidad de una falla posterior.

Entre los fenómenos que producen esta degradación se encuentran las descargas parciales. Es necesario un adecuado conocimiento del comportamiento y de la naturaleza de las mismas a la hora de determinar la vida útil de un material aislante.

Es debido a esto que se ha decidido abordar este apasionante tema, proponiéndolo como Proyecto final de grado.

Finalidad y objetivos

La finalidad de este trabajo es brindar a los participantes un conocimiento profundo de las descargas parciales y como ellas pueden influenciar en la toma de decisiones sobre un equipo dado que pronto podría fallar, provocando por ejemplo, la salida del mismo del sistema de energía y hasta dejando sin servicio a ciudades enteras.

Los participantes además adquirirán el conocimiento y experiencia de trabajar en un laboratorio de alta tensión en el cual se desarrollará la detección de descargas parciales, siendo un trabajo que les permitirá utilizar las herramientas adquiridas durante la carrera y proponer desafíos que permitirán acercarse a los hecho y problemas que cotidianamente ocurren en la ingeniería.

Este proyecto de grado tiene como uno de sus objetivos, establecer un protocolo de ensayo de un instrumento adquirido recientemente para la detección de descargas

parciales con el cual se pueda determinar la presencia de este fenómeno eléctrico en diferentes tipos de aislamientos. Para nuestro caso transformadores de medida de intensidad y de tensión. De esta forma se aporta a la Universidad Nacional de San Juan y al Instituto de Energía Eléctrica los antecedentes para la realización de nuevos trabajos referidos a este tema.

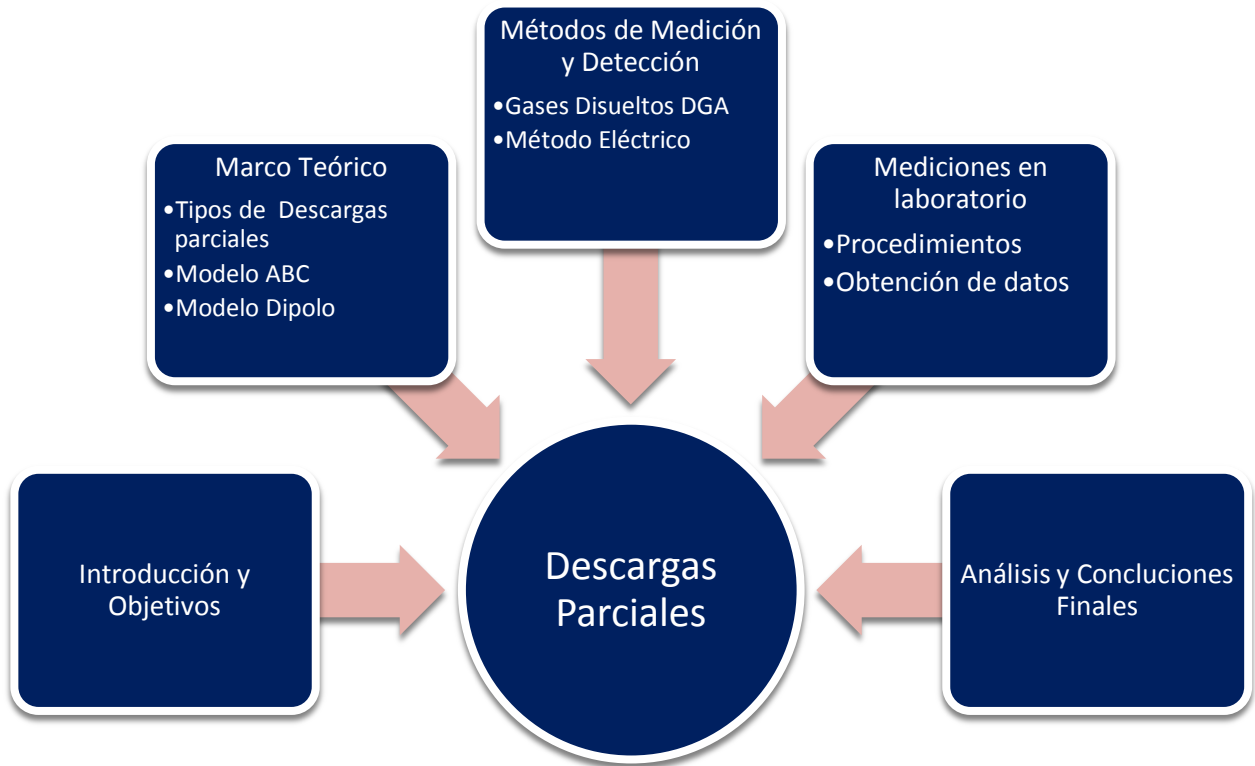
Para llevar a cabo el propósito de este proyecto se definen los siguientes objetivos específicos:

- i. Estudiar el fenómeno de Descargas Parciales, orígenes, evolución y sus consecuencias.
- ii. Análisis de gases disueltos en aceite y su relación con la energía de Descargas Parciales.
- iii. Estudiar el método eléctrico para realizar ensayos de Descargas Parciales.
- iv. Confeccionar un procedimiento de trabajo para utilizar el instrumental propuesto para realizar las mediciones.
- v. Realizar ensayos en laboratorio sobre transformadores de medida de alta tensión y redactar el correspondiente informe de laboratorio.

La base teórica fue tomada de diferentes fuentes de investigación como lo son la norma internacional IEC 60270, en la cual se hace un estudio científico y técnico para analizar los tipos de medición y detección de descargas parciales, además de esta norma encontramos otras fuentes de investigación.

Nuevamente es importante decir, como se mencionó en el resumen del trabajo, que el ensayo de descargas parciales no es un ensayo determinante en todos los casos. Es un ensayo, que combinado con otros, como el de gases disueltos en el caso de transformadores inmersos en aceite, ayuda a un acertado análisis sobre el estado actual del aislante.

Estructura del trabajo



2 Marco Teórico

Las descargas parciales pueden ser descritas como un pulso eléctrico que se produce por una descarga eléctrica en una cavidad con gas o con algún contaminante de naturaleza diferente del material dieléctrico. También puede ocurrir sobre una superficie dieléctrica de un sistema aislante sólido o líquido. Son consideradas como descargas internas, en una cavidad que puede estar llena de gas, donde el dieléctrico se encuentra expuesto a un campo eléctrico de corriente alterna. Siempre la cavidad tiene una permitividad más baja que el medio que la rodea, resultando en un incremento de la intensidad del campo eléctrico en dicho lugar.

Cuando el material aislante es sometido a una diferencia de potencial y debido a la presencia de un campo eléctrico el cual tiende a concentrarse en los espacios de aire o impurezas de los aislamientos, se produce la ionización del gas o el material presente en éstas, dando origen a una descarga eléctrica.

Las descargas parciales son en general una consecuencia de las concentraciones de tensiones eléctricas en aislaciones o en la superficie de la aislación. Generalmente, cada descarga aparece como un pulso de corriente que tiene una duración de mucho menos que 1 μ s.

Los pulsos de las descargas parciales ocurren a altas frecuencias y se atenúan rápidamente cuando pasan a tierra. Las descargas son efectivamente pequeñas trayectorias de ionización, que ocurren dentro del sistema aislante, deteriorándolo y eventualmente haciéndolo fallar completamente.

2.1 Tipos de descargas parciales

Como veremos a continuación, las descargas parciales pueden ser clasificadas dependiendo en qué lugares se produzcan. Algo a tener presente cuando se detalle cada tipo de descarga parcial es como el límite de ruptura de la rigidez dieléctrica en la cavidad depende mucho de sus dimensiones, así como el gas o impureza que se encuentre en ella y la presión al cual se encuentra sometido. Muchos investigadores han indagado en el tema experimentando con electrodos separados equidistante a la misma tensión que son sometidas las aislaciones, dando muy buenos resultados aproximados y permitiendo producir la llamada curva de Paschen.

Siguiendo con la clasificación, podemos distinguir cuatro tipos ¹de descargas parciales.

- ❖ Descargas Internas
- ❖ Descargas Superficiales
- ❖ Descarga Corona
- ❖ Descargas Ramificada

¹ Ilustraciones tomadas del libro del Dr. F. H. Kreuger, Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment [1]

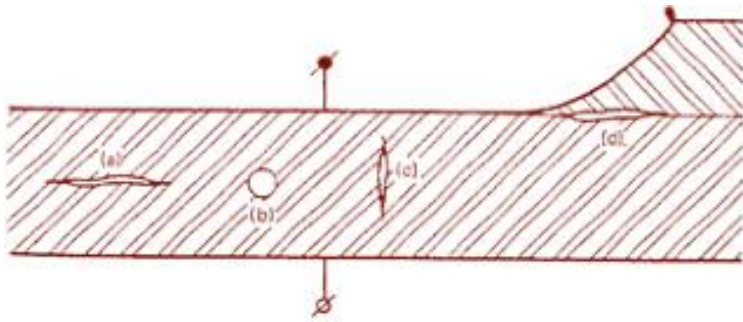


Figura 2-1 Descargas Internas

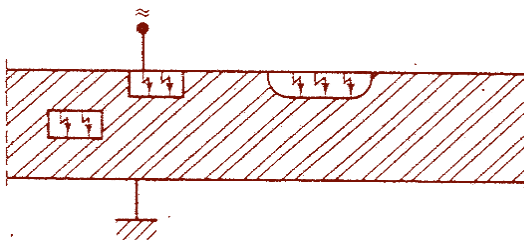


Figura 2-2 Descargas en el Dieléctrico



Figura 2-3 Descarga Corona

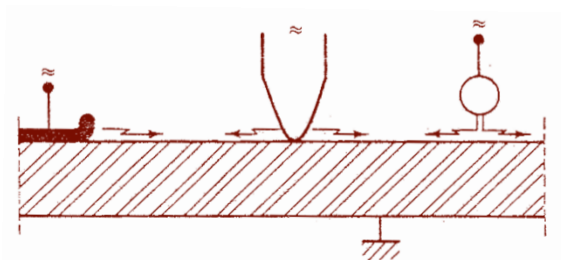


Figura 2-5 Descargas Superficiales

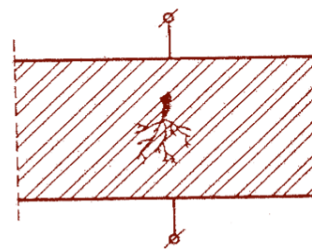


Figura 2-4 Descarga Ramificada

Descargas internas

Las descargas internas suelen ocurrir en lugares donde la rigidez dieléctrica es baja. Usualmente se producen en cavidades con contenido de gases aunque también en cavidades llenas de aceites que rompen su propiedad dieléctrica y causan descargas parciales instantáneas o pasado un tiempo.

La tensión a la cual la descarga comienza a surgir depende de la tensión inducida en la cavidad y de su rigidez dieléctrica. La tensión en la cavidad puede ser calculada en algunos casos.

Si la cavidad plana se encuentra situada perpendicular al campo eléctrico de los electrodos (**¡Error! La autoreferencia al marcador no es válida.**, punto a), la tensión en la cavidad es ϵ veces la tensión en el dieléctrico, donde el ϵ es la constante dieléctrica del material aislante.

En el caso cavidad esférica (**¡Error! La autoreferencia al marcador no es válida.**, punto b) la tensión es $3\epsilon/(1+2\epsilon)$ veces en el dieléctrico, tendiendo a 1.5 veces si ϵ es grande.

La tensión en la cavidad, en el caso de que su forma sea a lo largo y paralelo al campo eléctrico tiende a ser igual que la aplicada en el dieléctrico.

Descargas Superficiales

Las descargas superficiales ocurren en gas, ocasionalmente en líquido, en la superficie de un dieléctrico o interface entre dos dieléctricos. La descarga afecta al campo eléctrico y en general se extiende más allá de la región donde la componente original superficial del campo eléctrico produjo la descarga.

Descarga Corona

Las descargas corona, son bastante diferentes de las ya mencionadas. Ocurren en las superficies metálicas agudizadas o que tienen un pequeño radio de curvatura, en las cuales el campo eléctrico supera la rigidez dieléctrica del gas (en general aire).

El efecto corona es causado por la ionización del aire circundante, demos el ejemplo de un conductor sometido a los altos niveles de tensión de la línea. Al momento que las moléculas que componen el aire se ionizan, éstas son capaces de conducir la corriente eléctrica y parte de los electrones que circulan por la línea pasan a circular por el aire. Tal circulación producirá un incremento de temperatura en el gas, que se tornará de un color rojizo para niveles bajos de temperatura, o azulado para niveles altos. La

intensidad del efecto corona, por lo tanto, se puede cuantificar según el color del halo, que será rojizo en aquellos casos leves y azulado para los más severos.

Descargas Ramificadas

Las descargas ramificadas o en árbol comienzan por defectos de la aislación. Se inicia y se propaga gradualmente cuando un material dieléctrico sólido se somete al estrés de un campo eléctrico elevado y divergente durante un tiempo prolongado.

Las características de la arborescencia dependerán de la tensión eléctrica empleada, del material dieléctrico, y aún de variaciones en la morfología producidas por proporciones de mezcla distintas o variaciones de temperatura.

Luego a haberse producido la ramificación, a veces el tallo y el largo de la rama producen un hueco en la aislación. Descargas considerables ocurren en estos espacios huecos y producen un caso especial de descarga interna; en contraste con las ya explicadas, estas son muy inestables llegando a producir que la ramificación crezca rápidamente.

2.2 Modelo de descarga parcial capacitivo²

Para evaluar las pérdidas debidas a las descargas en sólidos dieléctricos laminados, sujetos a tensión alterna, Byrstlyn investigó en 1928 la secuencia de rotura de la rigidez dieléctrica del aire en un espinterómetro conectado en serie con capacitores. Este simple enfoque ha sido investigado por Gemant and Philippoff (1932) para estimar la energía perdida en cables causada por descargas parciales. Para este propósito, se ha modelado la descarga en medio ciclo de tensión aplicada en la Figura 2-6.

² Ilustraciones tomadas de Wolfgang Hauschild, Eberhard Lemke, High-Voltage Test and Measuring

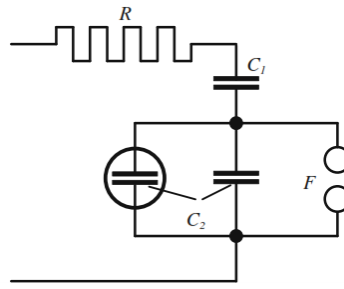


Figura 2-6 Modelo Capacitivo

Donde F representa la descarga parcial una vez iniciada y donde C_2 corresponde a la capacidad que posee la cavidad. El capacitor C_1 y la resistencia R servirán para limitar la corriente a través de F. Esto permitía que los osciloscopios obtuvieran dos niveles de tensión diferentes, donde el número de tensiones colapsadas dependía de la tensión aplicada en el ensayo, mostrando asombrosamente bien la correspondencia de la práctica en el laboratorio de acuerdo con los cálculos teóricos.

En 1950, Kreuger modificó el modelo propuesto por Gemant - Philippoff y propuso el siguiente esquema.

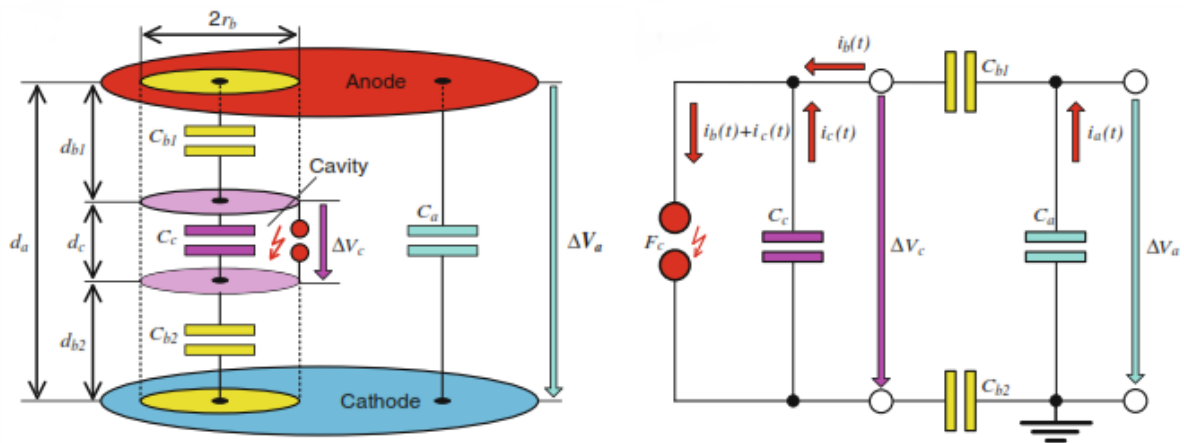


Figura 2-7 Modelo redes de capacitores. Modelo abc

En donde C_a es la capacidad asociada al dieléctrico entre los electrodos del objeto de ensayo, C_b es la capacidad perteneciente a la columna del dieléctrico sano entre la cavidad y los electrodos y C_c es la capacidad de la cavidad que se encuentra en paralelo con el modelo de espinterómetro F_c originalmente introducido por Gemant and

Philippoff. Debido a estas tres características, el circuito equivalente conforme se ve en la Figura 2-7, es tradicionalmente referido como modelo a-b-c.

Al analizar la carga transferida de la cavidad a los terminales de la muestra en el instante que se produce la descarga parcial, se considera comúnmente al lugar donde se produce el fenómeno, una columna cilíndrica dieléctrica de diámetro constante $2r_b$, como se puede apreciar en la Figura 2-7. Generalmente se satisface en los aislantes que

$$d_c \ll d_{b_1} + d_{b_2}$$

Luego la capacidad resultante de la columna sólida dieléctrica puede ser simplificada por la expresión:

$$C_b = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \pi \cdot r_b^2 / d_c$$

Para simplificar el cálculo se asume que ambas columnas dieléctricas y la cavidad cilíndrica son equivalentes, es decir:

$$r_c = r_b$$

Por lo tanto, la capacidad de la cavidad se estima por:

$$C_c = \varepsilon_0 \cdot \pi \cdot r_b^2 / d_c$$

Suponiendo que la descarga en F, que se muestra en la Figura 2-7, se produce a una tensión E_i , la tensión a través de la cavidad puede ser aproximada a:

$$\Delta V_c \approx E_i \cdot d_c$$

Basado en esto, la descarga parcial interna q_c que viaja a través de la cavidad ($\varepsilon_r = 1$) puede ser expresado como:

$$q_c \approx \Delta V \cdot C_c$$

$$q_c \approx \varepsilon_0 \cdot E_i \cdot \pi \cdot r_b^2$$

Ec. 2-1

Podemos observar que la corriente transitoria $i_b(t)$ asociada al movimiento de carga q_b sigue a través de las capacidades C_{b1} y C_{b2} . Estas a su vez se encuentran conectadas a C_a representando el dieléctrico del ensayo, por lo que podemos deducir que

$$q_a = q_b$$

Esto nos ayudará a obtener simplificaciones en el modelo.

La siguiente aproximación puede ser usada para estimar la *carga externa* q_a medible en los terminales del objeto ensayado.

$$dq_a = dq_b \approx \Delta V_c \cdot C_b \approx E_i \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \pi \cdot r_b^2 \cdot \frac{d_c}{d_a}$$

Ec. 2-2

Para aislantes técnicos, la inecuación:

$$d_c \ll d_{b1} + d_{b2}$$

Es siempre satisfecha y la permitividad relativa ϵ_r aplicada a sólidos dieléctricos es comúnmente bajo. Partiendo de estas condiciones, la razón entre la carga externa detectable y la carga interna a través de la cavidad se convierte en:

$$\frac{q_a}{q_c} \approx \epsilon_r \cdot \frac{d_c}{d_a}$$

Ec. 2-3

Debido a esta relación, es importante detenerse a analizar la ecuación y ver que la carga externa detectable que refiere comúnmente como *carga aparente* y que se observa en la norma IEC 60270 no es igual a la cantidad de carga involucrada en el sitio de la descarga parcial. La cual es muy difícil de medir directamente debido a las dimensiones microscópicas que pueden tener las cavidades.

El concepto de carga aparente había sido introducido (Kreuger 1964) sin embargo desafortunadamente el modelo ha pasado por alto la correcta forma de tratar la capacidad de la columna del sólido dieléctrico que se muestra en la Figura 2-7. Esto es así ya que el radio efectivo r_b se incrementa drásticamente si el canal de descarga (radio r_a) es formado (Boggs 2004). Sin embargo la capacidad efectiva C_c no es muy grande

debido a que es regido por el radio efectivo r_b de la columna del dieléctrico sólido mostrado en la Figura 2-7, pero por el radio r_d del canal de descarga desarrollado fuera de la cavidad donde la condición:

$$r_d \ll r_b$$

Es siempre satisfecha. Luego en lugar de la Ec. 2-3 se obtiene:

$$\frac{q_a}{q_c} \approx \epsilon_r \cdot \frac{d_c}{d_a} \cdot \left(\frac{r_b}{r_d}\right)^2$$

Ec. 2-4

Encontrando así la relación que existe entre la carga aparente y la carga producida durante el fenómeno de descarga parcial. Pero debido a las inecuaciones:

$$d_c \ll d_b$$

$$r_b \gg r_d$$

Esto no puede limitarse a afirmar que la descarga parcial externa es sólo una pequeña fracción de la descarga parcial interna.

2.3 Modelo Dipolo³

El concepto de carga aparente presentado anteriormente tuvo sus primeros inicios gracias a Pedersen y sus colaboradores desde mediados de 1980, deducido a partir del modelo capacitivo. Pero este modelo presentaba fallas al no ser capaz de reflejar la física de descarga en gases.

Es decir, el modelo no podía brindar un análisis que fuera sostenible debido a la creación de carriles de cargas como consecuencia del proceso de ionización del gas dentro de la cavidad. Como este camino de cargas de ambas polaridades se depositan en el ánodo y cátodo del contorno de la cavidad, un momento dipolo se produce quedado ilustrado en la Figura 2-8. Pasaremos a desarrollar la explicación del modelo dipolo.

³ Ilustraciones tomadas de Wolfgang Hauschild, Eberhard Lemke, High-Voltage Test and Measuring [19]

El campo comúnmente llamando campo de Poisson se opone al campo eléctrico causado por la tensión aplicada (campo Laplaciano). Como consecuencia, la ionización de las moléculas de gas desaparece inmediatamente luego del evento de descarga parcial que ha sido iniciado, donde el intervalo de tiempo es usualmente del orden de los nanosegundo.

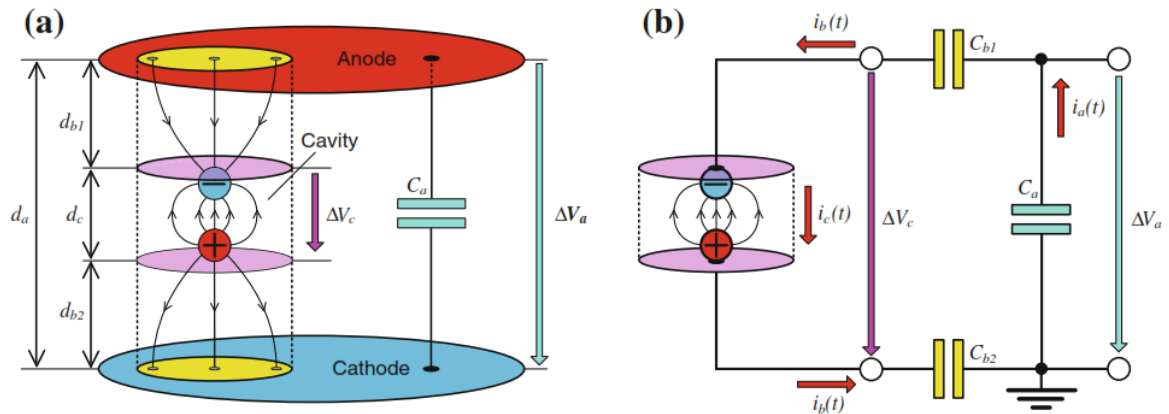


Figura 2-8 Modelo Dipolo en las paredes de una cavidad. Circuito Elemental

En la Figura 2-8 se ha reemplazado C_c de la Figura 2-7 por dos capacitores, C_{b1} y C_{b2} dando de esta forma el modelo planteado con dipolos.

Ahora con estas modificaciones la carga q_a externa detectable en los terminales del objeto ensayado deberá ser igual a la carga interna q_c producida durante la descarga parcial.

No está mal recordar que para estimar cuantitativamente la carga transferida, Petersen propuso un campo teórico apropiado, sin embargo este no es sostenible con las teorías de campo electromagnético basados en las ecuaciones de Maxwell.

Para un mejor entendimiento del nuevo modelo se considera el primer momento de un solo electrón y su correspondiente asociado ion positivo. Donde la propagación a los electrodos es obstaculizado por dos capas dieléctricas de espacio d_c como se ilustra en la Figura 2-9.

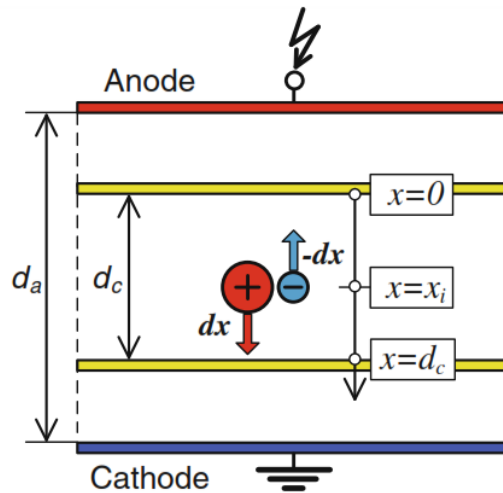


Figura 2-9 Parámetros usados para la estimación de la energía transferida de un electrón y de su ion asociado.

Asumiendo que la intensidad de campo inicial es E_i , solo un electrón de carga $-e$ es liberado de una molécula neutra en la posición $x=x_i$. El electrón es atraído por el ánodo debido a la fuerza de Coulomb $F = -e \cdot E_i \cdot x_i$. Luego el trabajo eléctrico será

$$W_e = F \int_{x_i}^0 dx = -e \cdot E_i \cdot (0 - x_i) = e \cdot E_i \cdot x_i$$

Ec. 2-5

En una manera análoga, la energía transferida del campo al ion positivo asociado con carga e será

$$W_p = F \int_{x_i}^0 dx = e \cdot E_i \cdot (d_c - x_i)$$

Ec. 2-6

Combinando estas dos ecuaciones, la energía del campo total transferido a ambas cargas (electrón e ion) después de acercarse a las capas dieléctricas será:

$$W_t = W_e + W_p = e \cdot E_i \cdot d_c$$

Ec. 2-7

Aquí se observa que la ecuación sigue dependiendo de la ubicación x_i donde las cargas fueron liberadas de una molécula neutra. Luego, la energía del campo transferido a un electrón de avalancha creado por la ionización de n_i moléculas será

$$W_a = e \cdot n_i \cdot E_i \cdot d_c$$

Ec. 2-8

Si se imagina que el objeto ensayado es desconectado de la fuente de tensión justo antes que inicie la descarga parcial a la tensión inicial V_i , la energía para el movimiento de cargas es liberada de la capacitancia C_a mostrado en la Figura 2-8. Si el movimiento de carga ocurre dentro de un intervalo de tiempo t_d , el teorema de balance de energía puede ser expresado como:

$$W_a = V_i \int_0^{t_d} i_a(t) \cdot dt = V_i \cdot q_a = e \cdot n_i \cdot d_c \cdot E_i = P_m \cdot E_i$$

Ec. 2-9

Donde el término P_m representa el momento dipolo y E_i el campo inicial. La separación de la carga q_a liberada de los electrodos, se tiene:

$$q_a = e \cdot n_i \cdot d_c \cdot \frac{E_i}{V_i} = P_m \cdot \frac{E_i}{V_i}$$

Ec. 2-10

Observando estas dos ecuaciones se puede decir que la carga externa q_a detectable en los terminales puede ser de uso para evaluar la gravedad de la descarga parcial, lo cual está en contraste con el concepto de carga aparente.

En este concepto parece ser notable que la detección de la carga q_a se incrementa con la longitud de la cavidad d_c y también con el riesgo de una ruptura en la aislación. Esto se muestra en la Figura 2-10.

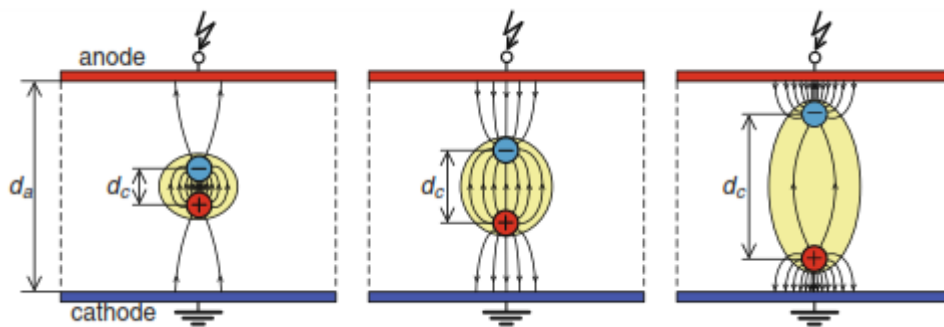


Figura 2-10 Densidad de campo dependiendo de la longitud de la cavidad

Como ejemplo considere la Figura 2-11 la cual se refiere a una cavidad existente en el dieléctrico entre los electrodos cilíndricos que representan a un cable de potencia. Este ejemplo logrará simplificar y explicitar el modelo dipolo.

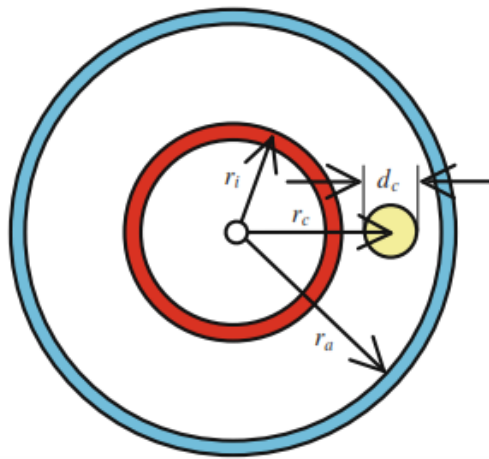


Figura 2-11 Parámetros usados para el análisis de descarga parcial en un cable de potencia.

Para simplificar el siguiente tratamiento, una cavidad virgen (libre de cargas) puede ser considerada, ya que la carga transita afectando el campo de distribución creado justo después del instante donde inicia la tensión E_i al excederla. Bajo estas condiciones el campo aumenta un factor k_ϵ y puede ser aproximado por:

$$k_\epsilon = \frac{3\epsilon_r}{1 + 2\epsilon_r}$$

Ec. 2-11

Para un cable de aislación de polietileno teniendo la permitividad relativa dieléctrica $\epsilon_r = 2.3$, se obtiene un $k_\epsilon \approx 1.2$. Insertando esto en la Ec. 2-10 el pulso de carga a detectar se expresa como:

$$q_a \approx P_m \cdot \frac{1.2}{r_c \left[\ln \left(\frac{r_a}{r_i} \right) \right]}$$

Ec. 2-12

Puede ser un desafío determinar el momento dipolo P_m , debido al número n_i de moléculas ionizadas que puede variar extremadamente. Pensemos en el caso más desfavorable donde la descarga parcial es ramificada. Bajo estas condiciones, el momento dipolo puede ser expresado por la siguiente aproximación (Lemke 2013)

$$P_m \approx (270 \text{ pC/mm}) \cdot d_c^2 \quad \text{para } 0.1 \text{ mm} < d_c < 2 \text{ mm}$$

Ec. 2-13

Introduciendo esta ecuación en Ec. 2-12 con los parámetros

$r_i = 8.5 \text{ mm}$,

$r_a = 14 \text{ mm}$,

$r_c = 10 \text{ mm}$

Los cuales son usuales para un cable con aislación de polietileno, se obtiene:

$$q_a \approx (67 \text{ pC}) \cdot \left(\frac{d_c}{d_0}\right)^2$$

Ec. 2-14

Con un diámetro de la cavidad de $d_0 = 1 \text{ mm}$, la curva q_a versus d_c se obtiene la curva que presenta la Figura 2-12.

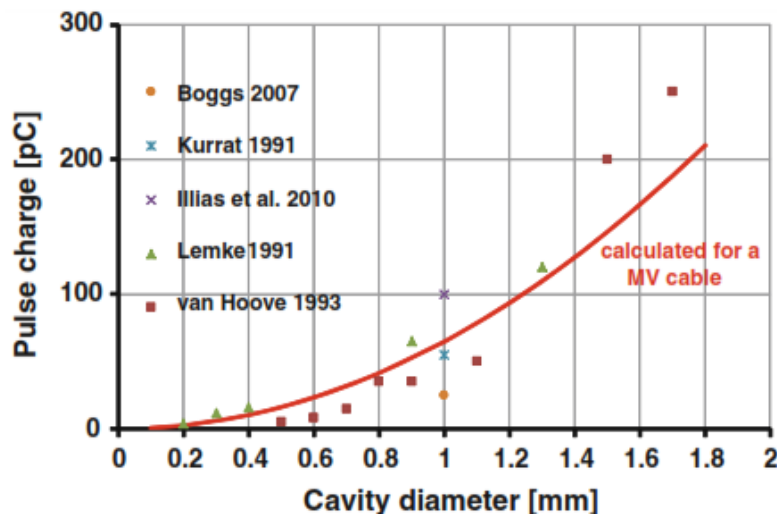


Figura 2-12 Descargas parciales vs diámetro de la cavidad. Datos experimentales de un cable en MV

No solo se presenta en la figura anterior la curva expresada por la ecuación, también se han colocado datos obtenidos por diferentes investigadores a modo de comparación. Se puede apreciar que el modelo matemático antes deducido cumple bastante bien con los datos de ensayos obtenidos.

Un dato más que interesante para el control de calidad de los cables de potencia, es ver la carga q_a versus la tensión de inicio V_i de la descarga parcial. Para resolver la Ec. 2-10, la razón E_i/V_i debe ser conocida. Una aproximación apropiada puede ser deducida de las curvas de Schumann. Basado en esto, la dependencia de E_i en la cavidad de diámetro d_c se convierte en:

$$E_i \approx E_0 \left(1 + \sqrt{\frac{d_r}{d_c}} \right) \quad \text{para } 0.1 \text{ mm} < d_c < 2 \text{ mm}$$

Ec. 2-15

Con valores de referencia $E_0 = 2.47 \text{ kV/mm}$ y $d_r = 0.82 \text{ mm}$. Insertando estos valores en la Ec. 2-10, la tensión de inicio V_i de la Figura 2-11 puede ser calculada como

$$V_i = \frac{E_0}{k_\epsilon} \cdot r_c \cdot \left[\ln \left(\frac{r_a}{r_i} \right) \right] \cdot \left(1 + \sqrt{\frac{d_r}{d_c}} \right) \approx V_i \approx (10.5 \text{ kV}) \cdot \left(1 + \sqrt{\frac{0.82 \text{ mm}}{d_c}} \right)$$

Ec. 2-16

Combinando las Ec. 2-14 y Ec. 2-16 la carga q_a versus V_i puede ser calculada y su resultado se puede mostrar en la Figura 2.13 mediante un punto.

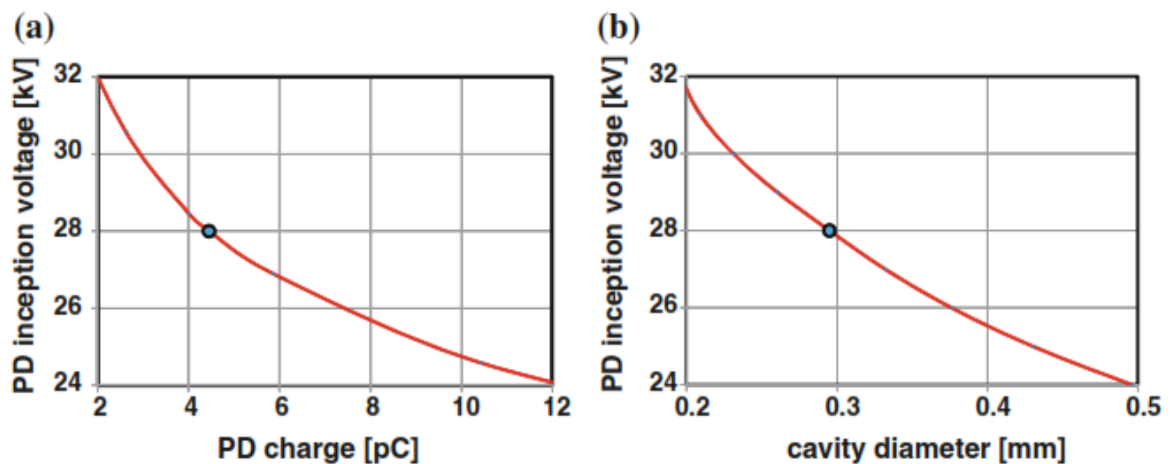


Figura 2-13 (a) Tensión de inicio vs Carga, en la descarga parcial (b) Tensión de inicio vs diámetro de cavidad, en la descarga parcial en cables de media tensión.

En este contexto parece ser notable que en la norma IEC 60502:1997 el nivel de tensión máxima recomendable de ensayo es $1.73V_0$ para cables de media tensión con aislación extruido, donde V_0 es el valor rms de la tensión, el cual es equivalente a 28 kV. Este valor indicado en la Figura 2-13 muestra que el nivel de descarga parcial es debajo de 5 pC. Este es un buen argumento por la que la norma IEC 60502:1997 recomienda que la magnitud de la descarga a $1.73V_0$ no deberá exceder los 10pC.

Es decir, el modelo dipolo permite comprender el origen de los valores que la norma recomienda para ensayos sobre objetos.

3 Métodos de ensayo de descargas parciales

Saber que existen las descargas parciales en los aparatos eléctricos es una cosa, pero ¿Cómo podemos detectarlas? Más importante aún ¿Cómo utilizar la información que se obtiene a través de los ensayos para comprobar la condición de la máquina y por lo tanto poder realizar los mantenimientos y reparaciones que sean necesarias?

3.1 Introducción

La detección y medición de las descargas parciales se ha convertido en una de las formas más utilizadas para el monitoreo de la condición del sistema aislante de las máquinas eléctricas debido a su alta sensibilidad para detectar problemas en estos. Las descargas parciales son un síntoma de la mayoría de los mecanismos de deterioro de la aislación de los transformadores de medida así como de los distintos aparatos eléctricos.

Cada descarga parcial, genera un pequeño pulso de corriente que se propaga a través del transformador. Aun cuando la duración de estos pulsos es de 1 a 3 nseg, las mismas generan ondas. Si estas se analizarán a través de la transformada de Fourier, se puede observar que cada pulso estará compuesto por componentes cuyas frecuencias varían desde las de corriente continua hasta cerca de 1GHz. Estos pulsos eléctricos, son detectados y procesados de diversas maneras por los diferentes sistemas de monitoreo de descargas parciales.

El monitoreo de descargas parciales, se empleó a finales de la década del 40, pero su aplicación fue restringida a pocas máquinas, hasta mediados de los 70's. Esto se debió a la gran cantidad de experiencia que se requería para separar en los resultados de las mediciones los efectos de las descargas parciales de los correspondientes a los de la interferencia electromagnética causados por otras fuentes. En varias ocasiones, esta interferencia dio origen a diagnósticos equivocados de sistemas aislantes en buenas condiciones, dado que esta interferencia tiene varias de las características de una descarga parcial.

El desarrollo de mejores sensores, junto con equipos y dispositivos electrónicos de bajo costo, así como el software de reconocimiento de patrones, los cuales permitieron iniciar la separación de las descargas parciales de la interferencia, dieron un gran impulso a la aplicación de esta técnica.

Con base en las normas IEC 60270, IEC60599 y a la guía IEEE P1434, se presenta una descripción general de las técnicas que actualmente se emplean para la detección de descargas parciales en equipos eléctricos de corriente alterna.

3.2 Medición de descargas parciales

La detección y medición de descargas parciales en máquinas, es posible de realizar mientras el equipo se encuentra en operación. Este método es conocido como pruebas en línea, así como también, estas mediciones pueden realizarse con el equipo fuera de operación, este se denomina pruebas fuera de línea. Dependiendo del objetivo del ensayo, cualquiera de estos dos métodos puede utilizarse y aprovechar sus ventajas.

Se describen a continuación de manera general las características de los dos métodos para la detección y medición de descargas parciales.

3.2.1 Medición de descargas parciales On Línea

En la actualidad, existen técnicas que proporcionan la capacidad de realizar pruebas, ya sea de manera continua o periódica, mientras se encuentran operando normalmente. Esto presenta la ventaja de obtener la información para poder realizar un análisis de tendencia del nivel de descargas parciales en la máquina durante su tiempo de servicio.

Desde el punto de vista del mantenimiento, tener una herramienta que permita prevenir problemas de forma preliminar, proporciona medios para planear las actividades necesarias y con ello minimizar los costos.

La información obtenida puede proporcionar una medida de la condición, pero no debe considerarse concluyente por sí misma. Esta debe ser complementada con otras observaciones, inspecciones y pruebas adicionales, antes de realizar un trabajo de mantenimiento con base en esta información.

3.2.2 Medición de descargas parciales fuera Off Línea

Aunque la medición de descargas parciales fuera de línea requiere más tiempo y costo para su aplicación, es un buen complemento para la prueba en línea, en caso de existir dudas acerca de los datos medidos en línea. Es conveniente realizar un ensayo fuera de línea inicial cuando el equipo eléctrico es nuevo. Una medición adicional debe

considerarse para un año de servicio normal posterior. Estas mediciones proporcionan un punto de referencia para comparaciones futuras.

Las principales desventajas de las pruebas o ensayos fuera de línea son:

- Se requiere de una fuente de potencia separada para energizar al equipo.
- El equipo debe ponerse fuera de servicio para poder realizar las mediciones, lo cual implica costos de diversas índoles.
- La presión y humedad del ambiente son diferentes a las que se tienen durante la operación normal del equipo.

Dentro de las ventajas de los ensayos fuera de línea tenemos las siguientes:

- Se pueden eliminar otras fuentes de ruido diferentes al posible ruido radiado. Esto es debido a que todo otro equipo eléctrico se encuentra aislado del equipo bajo prueba, y no existen fuentes internas al ruido. La tensión de ensayo puede ser elevada o reducida para determinar la tensión de inicio y tensión de extinción de descargas.
- Dependiendo de la frecuencia de las fuentes de descargas parciales puede ser posible, con ciertos equipos, localizar la fuente de las descargas parciales, tal que las reparaciones necesarias se realicen de un modo preciso.
- Durante la salida de operación de la máquina para la realización de las pruebas fuera de línea, se pueden realizar otras mediciones e inspecciones que pueden ser útiles para identificar las fuentes de las descargas parciales.

3.3 Métodos de detección de descargas parciales

Las descargas parciales son acompañadas de varias manifestaciones físicas, como son pulsos eléctricos y los restantes pulsos de radio frecuencia, pulsos acústicos, luz, así como reacciones químicas dentro de los gases de aislamiento, que pueden ser tanto aire como hidrógeno.

A continuación se presentan, los principales métodos de medir algunas de estas manifestaciones físicas, lo cual es un medio para cuantificar la actividad de descargas parciales.

3.3.1 Análisis de Gases Disueltos (DGA)

Los métodos químicos aprovechan la información entregada por los gases que aparecen en el aceite de los transformadores, no obstante, estas técnicas no permiten detectar la presencia de descargas iniciales en el aislamiento del transformador debido a que se produce un gran retardo entre el inicio de la fuente de descargas parciales y la evolución de gas suficiente que delate la presencia de estas. Otro gran defecto de este método es que no entregan la ubicación precisa de la falla, sino tan solo, la circunscriben a una zona la cual puede ser bastante grande.

Estos productos aumentan durante el funcionamiento prolongado, el análisis químico se utiliza para estimar la degradación que ha sido causada por descargas parciales.

La forma de analizar que se utiliza para la detección química es mediante el análisis cromatográfico, cuyo propósito es conocer exactamente las diferentes sustancias que componen los gases disueltos extraídos desde el aceite del transformador.

De acuerdo a la naturaleza de los gases disueltos en el aceite aislante, se puede determinar la causa de la anomalía para prevenirla y solucionarla antes de que se transforme en falla.

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

Detección Química

La medición de los gases disueltos en el aceite aislante es uno de los parámetros más importantes que se debe monitorear tanto en transformadores de potencia como en los de medición.

El aceite se considera uno de los mejores medios de refrigeración que tiene además buenas propiedades dieléctricas y que cumple con las siguientes funciones:

- ❖ Actúa como aislante eléctrico.
- ❖ Actúa como refrigerante.
- ❖ Protege a los aisladores sólidos contra la humedad y el aire.

El análisis de los gases disueltos en aceite sirve para evaluar las condiciones en las que se encuentra un transformador.

Debido al sobrecalentamiento, descargas parciales o roturas locales dentro del transformador en servicio, en el aceite se producen y disuelven una gran cantidad de gases. La naturaleza, la cantidad y las proporciones de estos gases, dependen del material aislante presente, de la naturaleza del fenómeno responsable de la descomposición y de los niveles de energía involucrados en el proceso. Si se excede de una cierta tasa de generación, comienzan a aparecer burbujas de gas. Estas burbujas de gas pueden causar una rotura local si provienen de regiones internas de los sistemas de aislamiento con grandes campos eléctricos. Los gases más importantes producidos en un transformador en caso de fallos son hidrógeno, monóxido de carbono, dióxido de carbono, metano, acetileno, etano y etileno. El contenido de los gases individualmente depende de la clase del fallo.

Mediante el DGA, es posible distinguir fallas tales como descargas parciales (corona), recalentamiento, y arco en los transformadores. Debe tomarse un cierto número de muestras durante un período de tiempo dado para discernir las tendencias y para determinar la severidad y desarrollo de fallas incipientes.

La estructura molecular de los gases desprendidos de un material aislante, al descomponerse, es propia de cada tipo de composición degradada, debido a esto, es útil conocer los tipos de gases presentes en el aceite a los efectos de determinar su material de origen. Los tipos de descomposiciones y gases son los siguientes:

- *Descomposición Celulósica* -La descomposición térmica de la aislación de celulosa impregnada en aceite produce óxidos de carbono (CO , CO_2) y algo de metano e hidrógeno (H_2 , CH_4) debido al aceite. La velocidad a la cual son producidos depende exponencialmente de la temperatura y directamente del volumen de material a esa temperatura.
- *Descomposición del Aceite*: los aceites minerales de transformadores son mezclas de muchas moléculas de hidrocarburos diferentes, y los procesos de descomposición de estos hidrocarburos en fallas térmicas o eléctricas son complejas. El aumento de temperatura en el aceite produce etileno (C_2H_4) como principal gas.

Los datos de DGA pueden proporcionar:

- Alerta avanzada de fallas en desarrollo
- Monitoreo de la evolución de la tasa de falla
- Confirmación de la presencia de fallas
- Un medio conveniente para la programación de las reparaciones
- Monitoreo del estado durante sobrecarga

Desde un punto de vista operacional, es importante establecer las siguientes prioridades:

Detección: Descubrir la generación de cualquier gas que excede cantidades "normales" y utilizar guías apropiadas para reconocer la anormalidad en el menor tiempo posible para reducir al mínimo el daño o evitar un fracaso.

Evaluación: Evaluar el impacto de la anormalidad sobre la utilidad del transformador, usando un juego de directrices o recomendaciones.

Acción: Tomar la acción recomendada, que comienza con la vigilancia aumentada y la confirmación o el análisis suplementario y la administración a una determinación de sensibilidad de carga, reduciendo la carga sobre el transformador, o quitando la unidad del servicio.

Los dos métodos más comúnmente utilizados para determinar el tipo de falla son el *método de los de gases claves* y el *método de la tasas de gases*.

El método del Gas Clave

Es un método para la determinación de los tipos de fallas a partir de gases que le son típicos a cada una, o predominantes, a diferentes temperaturas. El método se refiere a los principales tipos de fallas diferentes utilizando el porcentaje de los gases combustibles. Este método considera los siguientes tipos de fallas generales:

- **Falla térmica debido a aceite sobrecalentado:** Los productos de descomposición incluyen el etileno y el metano, juntos con más pequeñas cantidades de hidrógeno y etano. Los rastros de acetileno pueden ser formados si el defecto es severo o implica contactos eléctricos.

Gas principal: Etileno.

- Falla térmica debido a celulosa sobrecalentada: Las grandes cantidades de dióxido de carbono y el monóxido de carbono son desarrolladas de la celulosa recalentada. Los gases de hidrocarburo, como el metano y el etileno, serán formados si el defecto implica una estructura impregnada de aceite.

Gas principal: Monóxido de carbono.

- Falla eléctrica debido a corona: La baja energía de las descargas eléctricas produce hidrógeno y metano, con pequeñas cantidades de etano y etileno. La cantidad comparable de monóxido y dióxido de carbono puede ser resultado de descargas en la celulosa.

Gas principal: Hidrógeno

- Falla eléctrica debido a arco eléctrico: Son producidas grandes cantidades de hidrógeno y acetileno con cantidades menores de metano y etileno. El dióxido de carbono y el monóxido de carbono también pueden ser formados si el defecto implica celulosa. El aceite puede ser carbonizado.

Gas principal: Acetileno.

La

Figura 3-1 indica estos "gases claves" y dimensiones relativas para los cuatro tipos de defecto generales anteriormente mencionados.

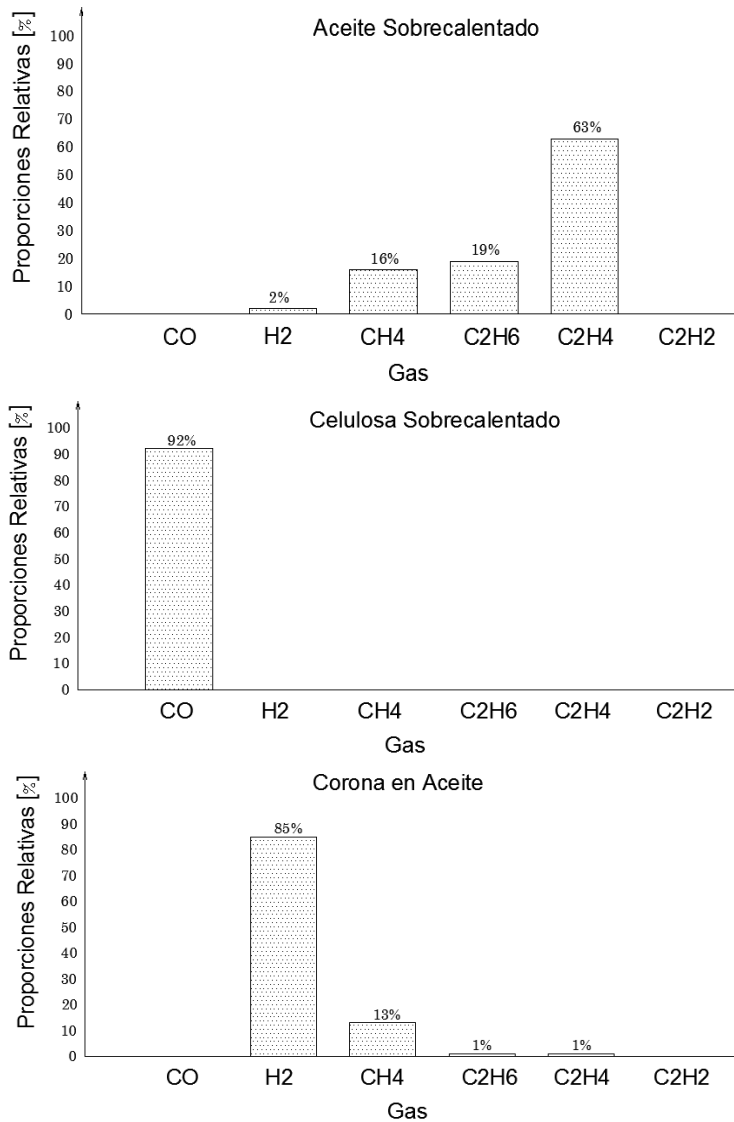


Figura 3-1 Proporción de Gases según el tipo de falla

El método de tasas

Requiere el cálculo de relaciones de gases entre sí, como por ejemplo la relación metano/hidrógeno. Se utilizan tres o cuatro de estas relaciones para el diagnóstico.

El uso de proporciones de gas para indicar un solo tipo de falla posible es un proceso empírico basado en la experiencia de cada investigador en la correlación de los análisis de gases de muchas unidades con el tipo de falla posteriormente asignada como motivo de la perturbación. Este proceso se atribuyó a Doernenburg y posteriormente confirmado por Rogers, de los cuales se obtiene la mayor parte de la correlación del diagnóstico.

Las teorías de diagnóstico basados en los principios de degradación térmica emplean una serie de proporciones de ciertos gases combustibles clave como los indicadores de tipo de falla. Estas cinco relaciones son:

$$\text{Relación 1 (R}_1\text{)} = \frac{CH_4}{H_2}$$

$$\text{Relación 2 (R}_2\text{)} = \frac{C_2H_2}{C_2H_4}$$

$$\text{Relación 3 (R}_3\text{)} = \frac{C_2H_2}{CH_4}$$

$$\text{Relación 4 (R}_4\text{)} = \frac{C_2H_6}{C_2H_2}$$

$$\text{Relación 5 (R}_5\text{)} = \frac{C_2H_4}{C_2H_6}$$

Evaluación del posible tipo de falla por el método de la relación Doernenburg

El método Doernenburg sugiere la existencia de tres tipos de fallas generales. Utiliza las concentraciones de gases de la cual se calcularon los cocientes de R₁, R₂, R₃, y R₄. En la Tabla 3-1 se muestra en método en forma resumida:

Diagnóstico sugerido de falla		R1		R2		R3		R4	
		CH ₄ / H ₂		C ₂ H ₂ / C ₂ H ₄		C ₂ H ₂ / CH ₄		C ₂ H ₆ / C ₂ H ₂	
1.-	Descomposición Térmica	>1.0	>0.1	<0.75	<1.0	<0.3	<0.1	>0.4	>0.2
2.-	Corona (Baja Intensidad de Descarga Parcial)	<0.1	<0.01	Insignificante		<0.3	<0.1	>0.4	>0.2
3.-	Arco (Alta Intensidad de Descarga Parcial)	>0.1	>0.01	>0.75	>1.0	>0.3	>0.1	<0.4	<0.2
		<1.0	<0.1						

Tabla 3-1 Relaciones según Doernenburg

Evaluación del posible tipo de falla por el método de la relación Rogers

El método de la relación de Rogers sigue el mismo procedimiento general que el método de Doernenburg, con la diferencia de que utiliza sólo tres relaciones (R_1 , R_2 y R_5). Este método se muestra en la Tabla 3-2.

Caso	R2 C_2H_2 / C_2H_4	R1 CH_4 / H_2	R5 C_2H_4 / C_2H_6	Diagnóstico sugerido de falla
0	<0.1	>0.1 <1.0	<1.0	Unidad Normal
1	<0.1	<0.1	<1.0	Descarga Parcial - Arco de Baja Densidad de Energía
2	0.1 - 3.0	0.1 - 1.0	>3.0	Arco - Descarga de Alta Energía
3	<0.1	>0.1 <1.0	1.0 3.0	Baja Temperatura Térmica
4	<0.1	>1.0	1.0 - 3.0	Térmica <700°C
5	<0.1	>1.0	>3.0	Térmica >700°C

Tabla 3-2 Relaciones según Rogers

Método del Triángulo de Duval

Uno de los diagnósticos más acertados para calificar la naturaleza y severidad de una falla interna en un transformador es el triángulo de Duval. Considera tres gases característicos de las fallas más críticas que se pueden presentar en un transformador inmerso en aceite mineral aislante fundamentado en bases de datos muy amplias, y últimamente se está utilizando mucho, y ha probado ser muy preciso con un alto reconocimiento por la comunidad científica.

Los gases que considera Duval son: Metano (CH_4) como gas clave indicativo de efecto corona o descargas parciales, Etileno (C_2H_4) indicativo de punto caliente, y Acetileno (C_2H_2) gas característico de la presencia de arco interno.

Tipos de fallas

La inspección interna de cientos de equipos defectuosos ha dado lugar a las siguientes clases generales de fallas visualmente detectables:

- Descargas parciales (PD)
- Descargas de baja energía (D₁)
- Descargas de alta energía (D₂)
- T₁: Fallas térmicas <300°C
- T₂: Fallas térmicas 300°C < t < 700°C
- T₃: Fallas térmicas >700°C.

Relaciones básicas de gas

Cada una de las seis clases de fallas conduce a un patrón característico de la composición de gases de hidrocarburo, que se puede traducir en una tabla de interpretación DGA, como el descrito en la Tabla 3-3 y basado en el uso de tres relaciones de gases básicos:

$$\frac{C_2H_2}{C_2H_4} \quad \frac{CH_4}{H_2} \quad \frac{C_2H_4}{C_2H_6}$$

La Tabla 3-3 se aplica a todos los tipos de equipos, con algunas diferencias en los límites de las relaciones de gases, dependiendo del tipo específico de equipo.

Clase	Falla Característica	$\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$	$\frac{CH_4}{H_2}$	$\frac{C_2H_4}{C_2H_6}$
PD	Descarga Parcial	NS ⁽¹⁾	< 0,1	< 0,2
D1	Descarga de baja energía	> 1	0,2 - 0,5	> 1
D2	Descarga de alta energía	0,6-2,5	0,1 - 1	> 2
T1	Fallas térmicas <300°C	NS ⁽¹⁾	NS ⁽¹⁾	> 1
T2	Fallas térmicas 300°C < t < 700°C	< 0,1	> 1	1 - 4
T3	Fallas térmicas >700°	< 0,2 ⁽²⁾	> 1	> 4

Tabla 3-3 Interpretación del Análisis de Gases Disueltos

Nota 1: En algunos países, se utiliza la relación C₂H₂ / C₂H₆, en lugar de la relación CH₄ / H₂. También en algunos países, se utilizan ligeramente diferentes límites de relación.

Nota 2: Las relaciones anteriores son importantes y deben ser calculadas sólo si al menos uno de los gases está en una concentración y una tasa de aumento de gas por encima de los valores típicos.

Nota 3: $CH_4 / H_2 < 0.2$ para descargas parciales en transformadores de medida y $CH_4 / H_2 < 0.07$ para descargas parciales en bushings.

Nota 4: Patrones de descomposición de gas, similares a descargas parciales han sido reportados como resultado de la descomposición de la fina película de aceite entre los laminados del núcleo sobrecalentado a temperaturas de $140^\circ C$ y por encima.

⁽¹⁾ NS: No importa cuál sea el valor.

⁽²⁾ Un aumento del valor de la cantidad de C_2H_2 puede indicar que la temperatura de punto caliente es superior a $1000^\circ C$.

Representación gráfica

Las relaciones se representan gráficamente mediante un punto en un sistema triangular de coordenadas en un gráfico triangular dividido en diferentes zonas de falla, según se muestra en la Figura 3-2.

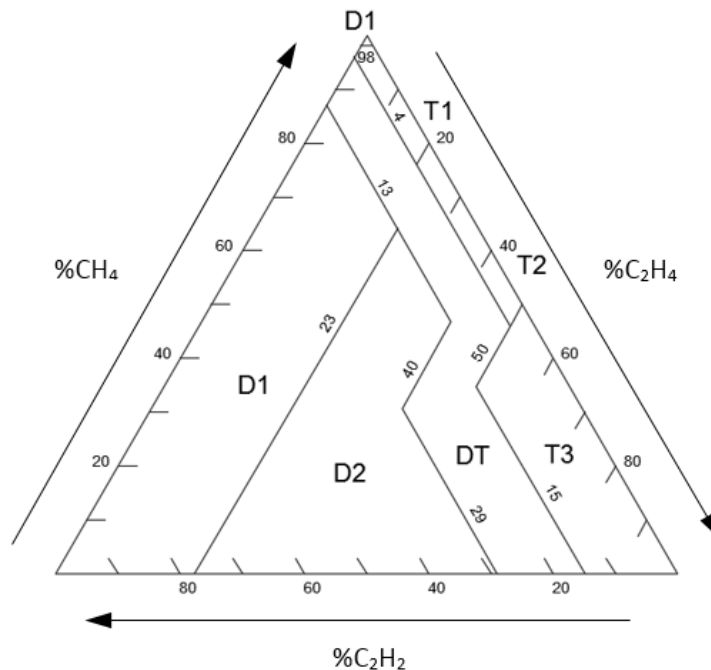


Figura 3-2 Triángulo de Duval

Referencias:

PD - Descarga Parcial.

T1 - Fallas térmicas $<300^{\circ}\text{C}$

T2 - Fallas térmicas $300^{\circ}\text{C} < t < 700^{\circ}\text{C}$

T3 - Fallas térmicas $>700^{\circ}\text{C}$.

D1 - Descargas de baja energía (Chispas)

D2 - Descargas de alta energía (Arcos)

DT - Mezcla de falla térmica y eléctrica.

3.3.2 Detección de pulsos eléctricos

Debido a que las descargas parciales involucran un flujo de iones y electrones a través de una pequeña distancia durante un periodo finito de tiempo, circula una corriente pequeña cada vez que ocurre una descarga parcial. La corriente total será regida por el transporte de un cierto número de Coulomb de carga. El flujo de corriente crea un pulso de voltaje a través de la impedancia del sistema aislante. Uno de los principales métodos para detectar las descargas parciales, es medir el pequeño pulso de voltaje que acompaña la descarga parcial, o el pulso de corriente resultante.

Este método de detección de descargas parciales es el que se utilizará para realizar los ensayos propuestos en este trabajo final. Una explicación más detallada se dará en la siguiente sección.

Carga aparente

La detección y medida de las descargas parciales está basada en la detección de las pequeñas corrientes que circulan por el circuito de medida. Estas corrientes son consecuencia del acoplamiento con el circuito de medida y de las avalanchas electrónicas que se producen en el interior de las cavidades (descarga parcial interna), en la superficie de los aislamientos (descarga parcial superficial) o en los propios aislamientos (descarga parcial corona).

Puesto que la magnitud de la carga que circula por el circuito de medida no es igual a la magnitud de la carga asociada a la avalancha electrónica que se ha producido en el seno del aislante, es necesario definir el concepto de carga aparente.

La carga aparente de un pulso de descarga parcial es la que, si se inyecta en un tiempo muy corto en los terminales del objeto bajo ensayo, dispuesto en un circuito de ensayo especificado, daría la misma lectura en el instrumento de medida que el propio pulso de corriente de la descarga parcial. Habitualmente la carga aparente se expresa en pico Coulomb.

La Figura 3-3 representa en forma muy simplificada un circuito equivalente que ilustra a modo macroscópico el concepto de carga aparente.

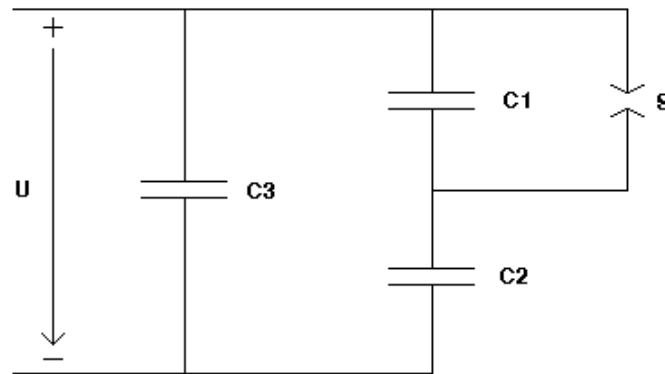


Figura 3-3 Circuito equivalente de una descarga parcial

Supongamos que U es la tensión aplicada, C₁ el condensador que representa la cavidad donde se produce la descarga parcial, C₂ el condensador que representa el material por encima y por debajo de la cavidad, C₃ el condensador que representa el condensador de inyección o de acoplamiento junto con la capacidad del material circundante a la cavidad, y S el arco de descarga del condensador C₁.

La tensión que aparece en bornes de C₁ puede expresarse de la forma:

$$U_1(t) = U(t) \cdot \frac{C_2}{C_1 + C_2}$$

Ec. 3-1

Cuando la tensión U₁ logra un nivel tal que el campo eléctrico alcanzado produce avalanchas electrónicas, entonces se produce una descarga parcial. Puesto que el

fenómeno de la descarga es, en general, mucho más rápido que la frecuencia de la fuente de tensión podemos considerar el proceso como instantáneo.

Debido al cortocircuito producido por el arco de descarga del condensador C_1 el condensador C_2 ahora tiene aplicada una tensión U .

La carga antes del arco de descarga en el condensador C_2 puede calcularse como:

$$Q_2 = C_2 \cdot U_2 = U \cdot \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2} \quad \text{Ec. 3-2}$$

La carga en el condensador C_2 en el cortocircuito puede calcularse como:

$$Q_2 = C_2 \cdot U \quad \text{Ec. 3-3}$$

Esta diferencia de carga debe de ser aportada por el condensador C_3 o por la fuente de alimentación. Debido a las constantes de tiempo, la variación de carga la aporta mayoritariamente el condensador C_3 en forma de un breve pulso de corriente. Este pulso de corriente crea una reducción del voltaje en los condensadores C_2 y C_3 . La fuente reacciona instantes después recargando ambos condensadores de forma que se restaure la tensión original U . Cuando el cortocircuito se extingue, el condensador C_1 varía su carga siguiendo la tensión impuesta por la fuente.

La variación de carga implicada en el proceso se calcula como:

$$\Delta Q = U \cdot \frac{C_2^2}{C_1 + C_2} \quad \text{Ec. 3-4}$$

Cabe destacar que la carga almacenada en el condensador C_1 , que representa la carga de la descarga parcial es:

$$Q_1 = U \cdot \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2} \quad \text{Ec. 3-5}$$

Estas ecuaciones, que simplifican el comportamiento de la descarga parcial en el circuito de medida de descargas parciales, muestran como el valor de la carga interna de la descarga parcial no coincide con el valor de la carga que circula por el circuito de medida, por ello la necesidad de definir el concepto de carga aparente.

Medición de descargas parciales mediante la detección de pulsos eléctricos⁴

La duración de la creación y extinción de la descarga parcial puede variar entre decenas de nanosegundos y microsegundos, dependiendo del valor de la tensión de ignición, el retardo en la aparición del electrón libre, las dimensiones, contenido, temperatura y presión de la cavidad, así como de las condiciones y características del aislamiento, lo que hace que el fenómeno tenga un carácter estocástico.

La actividad de la descarga parcial sigue un patrón ya que tiene una recurrencia en las zonas de mayor pendiente de la onda de tensión y esporádicamente en torno a los máximos o mínimos cuando el retardo en la aparición del primer electrón libre es más largo. En la Figura 3-4 se muestra el patrón para la señal de red de 50/60 Hz, que también suele ser representado utilizando una elipse, donde la parte superior de la elipse corresponde al semiciclo positivo y la inferior al negativo, siendo el cruce por cero los extremos del semieje mayor, como se ve en la Figura 3-5.

El número y amplitud de las descargas detectadas en cada semiciclo pueden ser diferentes para cada tipo de fuente o defecto del aislante, lo que permite identificar fenómenos individuales en el aislamiento. Por ello, la detección de descargas parciales se considera una técnica selectiva y sensible para evaluar el deterioro del aislante.

⁴ Ilustraciones tomadas de Wolfgang Hauschild, Eberhard Lemke, High-Voltage Test and Measuring [19]

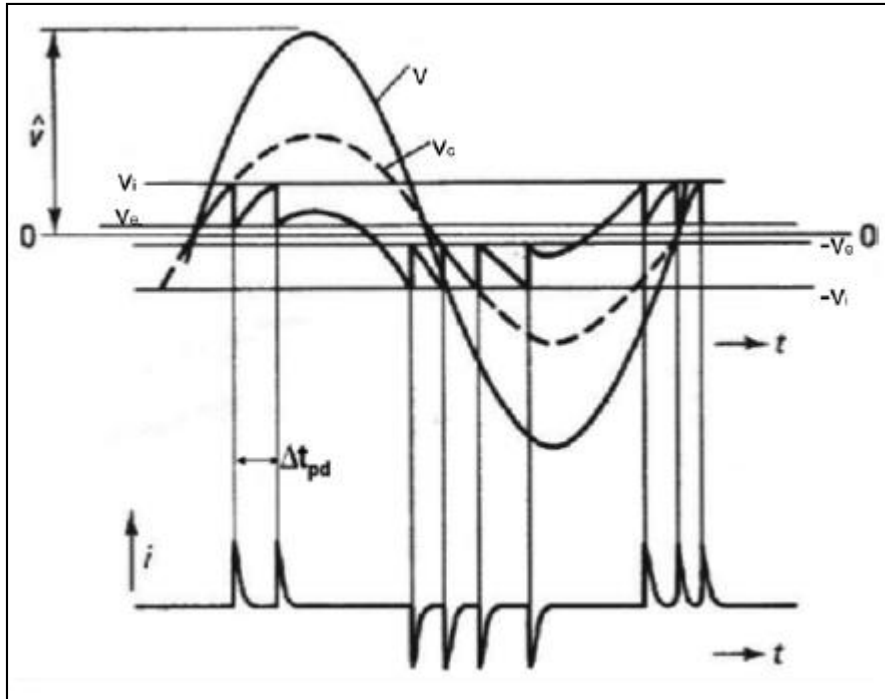


Figura 3-4 Patrón de descargas parciales

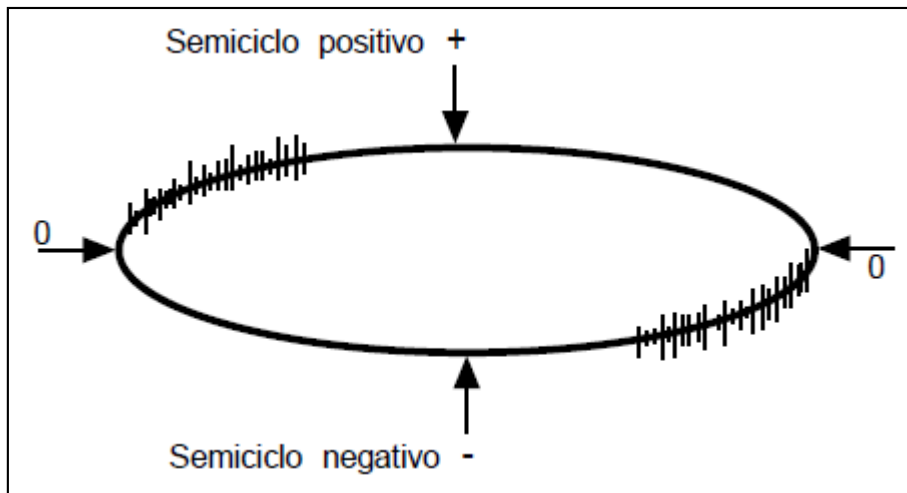


Figura 3-5 Patrón de descargas parciales en una elipse

Medición de los pulsos de carga de las descargas parciales

Los pulsos de corriente de descargas parciales de alta frecuencia son fuertemente distorsionados al viajar desde el origen del objeto de prueba a los electrodos objeto. A diferencia de esto, la integral de tiempo del transitorio de corriente y por lo tanto la carga de pulso es más o menos invariable. Para una mejor comprensión, considerar la

Figura 3.6, que hace referencia a una cavidad existente en la zona dieléctrica entre los electrodos planos.

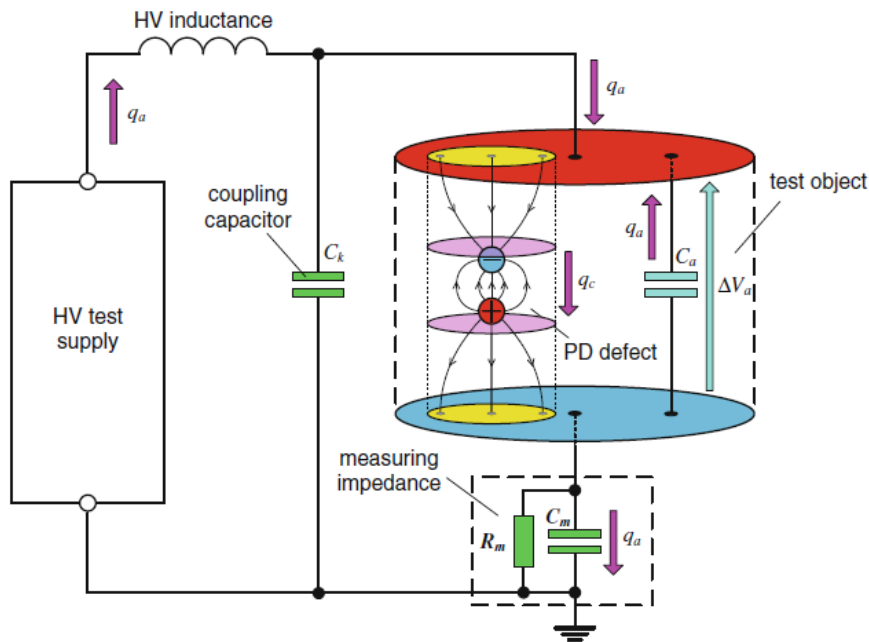


Figura 3-6 Principio de medición del pulso de corriente

Como los transitorios de descargas parciales se caracterizan por parámetros de tiempo en la gama de los nanosegundos, los conductores entre el objeto de prueba y la fuente de alta tensión pueden ser considerados como desconectados debido a su extremadamente alta impedancia inductiva. En consecuencia, la carga q_c que fluye a través del defecto está casi completamente liberada de la capacitancia C_a del objeto de prueba, que se asocia con un ΔV_a de voltaje a través los electrodos. En consecuencia, la carga del pulso q_c que se libró de los electrodos del objeto de prueba, puede ser expresada como sigue:

$$q_a = q_c = \Delta V_a \cdot C_a$$

Ec. 3-6

Luego en un breve periodo de tiempo, el proceso de descarga parcial se extingue y la corriente de descarga transitoria se aproxima a cero, de manera que la impedancia de los terminales de conexión se reduce drásticamente. La capacitancia del objeto de prueba C_a se recargará por la alta tensión suministrada.

También se puede aproximar por la Ec-3.6, incluso si la forma de esta corriente de carga es muy diferente de la corriente original de la descarga parcial. Este hecho ofrece la posibilidad de medir la carga del pulso que fluye a través del defecto por medio de una medición de la impedancia, si está conectado entre el electrodo de LV del objeto de prueba y la tierra, como se ilustra en la Figura 3-6. Además, el circuito de medición debe ser puentado por un condensador de acoplamiento C_k para asegurar una corta duración del proceso de recarga, y por lo tanto, obtener mediciones de descarga bien reproducibles. Por otra parte, un inductor HV diseñado apropiadamente debe ser conectado entre la fuente de alta tensión y el objeto de prueba para rechazar ruidos electromagnéticos.

Para una medición directa de la carga del pulso, la impedancia de medición podría estar equipado con una capacitancia de medición C_m . Bajo esta condición, la magnitud de la tensión que aparece a través C_m es directamente proporcional a la carga de pulso a medir. Sin embargo en tensiones alternas, la corriente de carga capacitiva a través del objeto de prueba podría llegar a ser sustancialmente más alta que la señal de la carga de pulso como se observa a partir del registro de osciloscopio que se muestra en la Figura 3-7a. Para superar este problema crucial, la capacitancia de medición C_m puede colocarse en paralelo con una resistencia de medición R_m . Esto tiene como efecto en una atenuación de la onda lo cual puede ser apreciado en los registros en la Figura 3-7 b y c.

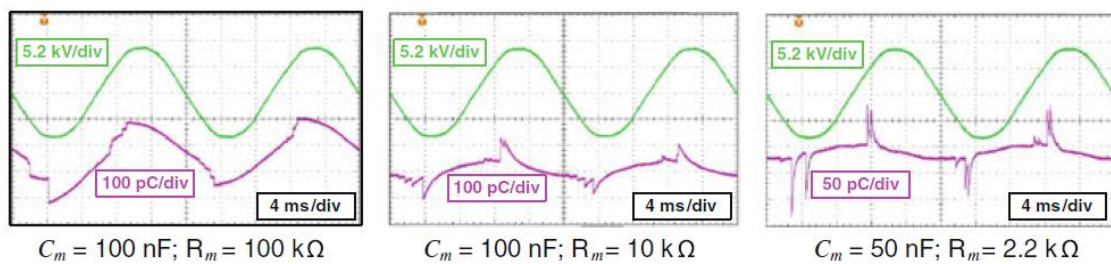


Figura 3-7 Registros de la señal de tensión capturados de una impedancia de medición RC conectada en serie con un arreglo de punto a plano del electrodo (trazo violeta) y tensión de prueba de CA asociado (trazo verde)

La corriente de carga capacitiva a través del objeto de prueba produce una señal perturbadora que deber tratar de ser suprimida. Una resistencia de medición R_m igual a

la impedancia característica del cable de medición resuelve este dilema y logra un diseño de inductancia apropiada. Bajo esta condición, sin embargo, la tensión transitoria que aparece a través de la impedancia de medición es proporcional a la corriente transitoria que fluye por los conductores del objeto de prueba. En consecuencia, esta señal debe ser integrada para medir la carga de los pulsos de las descargas parciales, cuyo trabajo realizará el Instrumento que capte las señales.

Incluso la mayor sensibilidad de medición se consigue si la impedancia de medición está conectado entre el lado de baja tensión del objeto de prueba y la tierra, cuyo enfoque en general no es aplicable. Como primer punto, la conexión a tierra del objeto de prueba hace que en muchos casos no pueda ser interrumpida. Como segundo punto, sobre la impedancia de medición pasa la corriente de carga total del objeto de prueba y en el caso que se produzca una avería inesperada la corriente transitoria podría superar los kA, poniendo en serios riesgo el equipamiento. Por lo tanto, la impedancia medida es comúnmente conectada en serie con el condensador de acoplamiento C_k , como se ilustra en la Figura 3-8. Aquí, la resistencia de medición R_m debe ser derivada por una inductancia de medición. La unidad de protección contra sobretensiones Op se requiere para suprimir rápidamente sobretensiones debidas a un defecto de aislamiento, que podría dañar no sólo la impedancia de medición, sino también al instrumento de medición.

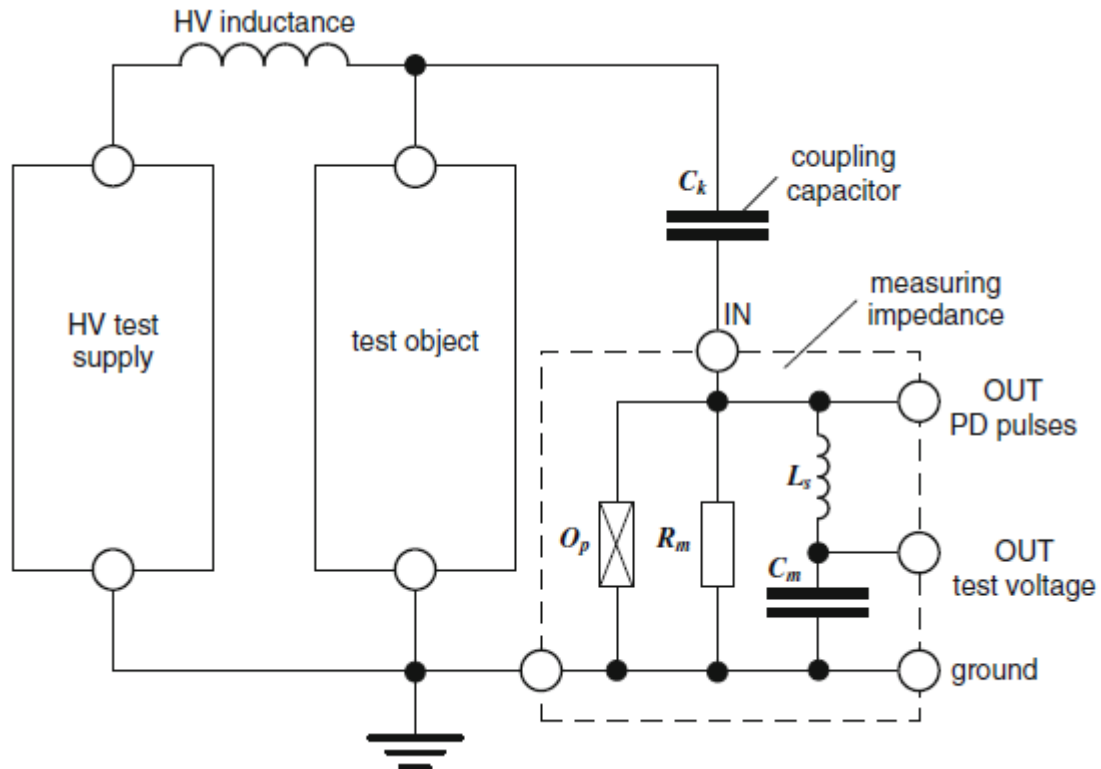


Figura 3-8 Circuito de medición de descargas parciales usando un condensador de acoplamiento en serie con una impedancia de medición.

3.3.3 Detección eléctrica y medición de descargas parciales de acuerdo a la Norma IEC 60270

Para detectar la actividad de descargas parciales en los aislamientos y registrar los patrones que permitan determinar el tipo de fuente se requiere un circuito donde se establezca un camino de baja impedancia para el pulso y en donde se ubiquen los transductores o el sistema de medida a usar. La norma IEC 60270 plantea dos configuraciones básicas para asegurar la reproducibilidad y medida de descargas parciales, que difieren en la disposición de la impedancia de medida (o de un transductor en general) con respecto al objeto de prueba.

En la Figura 3-9 se representa el circuito directo donde la impedancia de medida está en serie con el objeto de prueba y en la Figura 3-10, el indirecto, donde dicha impedancia está en serie con un condensador de acoplamiento.

Los principales elementos que componen las configuraciones son:

- Una fuente de alta tensión, preferiblemente libre de interferencias.
- Una impedancia filtro Z_n , que reduce las perturbaciones generadas en la fuente y asimismo impide que los pulsos de descargas parciales pasen a ésta.
- El objeto de prueba o espécimen, cuyo comportamiento se aproxima a una capacidad C_a .
- Un condensador de acoplamiento C_k , que facilita el paso de los pulsos de corriente de alta frecuencia.
- Una impedancia de medida Z_m (cuadripolo), a través de la que va a fluir el pulso de la descarga parcial.
- Un instrumento de medida de descargas parciales.

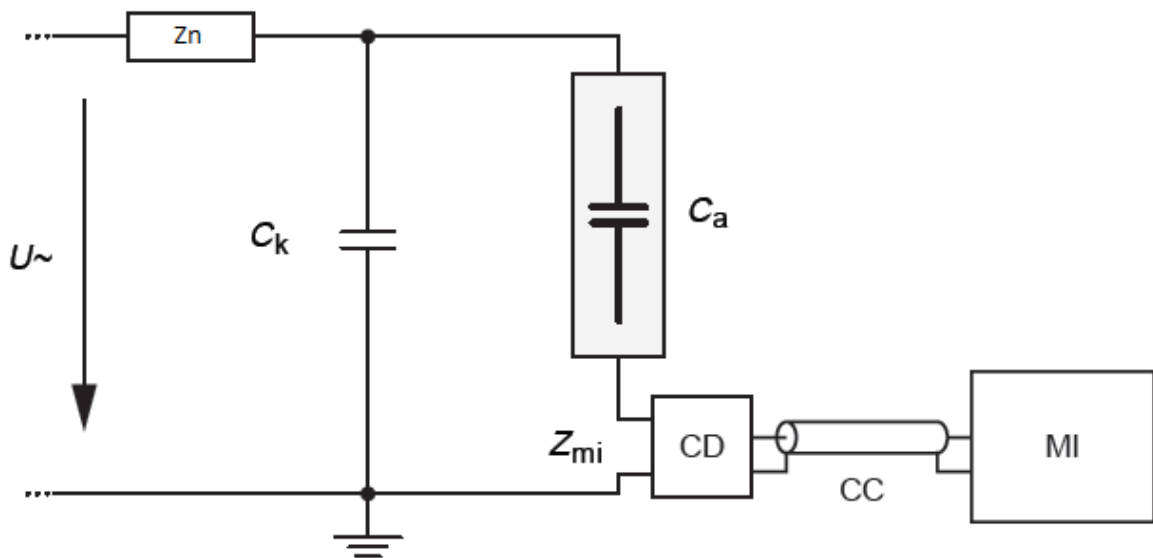


Figura 3-9 Circuito directo normalizado para la medida de Descargas Parciales

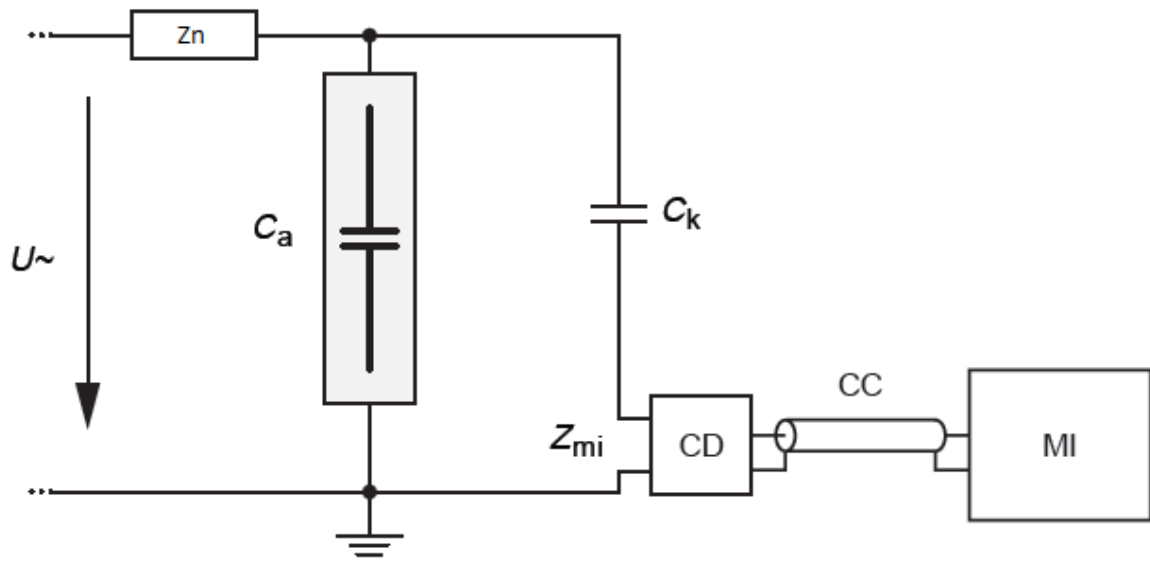


Figura 3-10 Circuito indirecto normalizado para la medida de Descargas Parciales

La normativa permite el uso de los dos circuitos indistintamente, sin embargo, en el circuito directo la impedancia de medida está en serie con el objeto de prueba por lo que en el caso de un fallo en el aislante, queda expuesta a la tensión aplicada y pone en riesgo a los equipos de medida y al personal. Por ello, el circuito más utilizado y recomendable para garantizar la seguridad es el indirecto.

4 Formas de onda que entregan los sistemas de medición⁵

En las siguientes líneas se tratara de mostrar figuras típicas que aparecen en los instrumentos de medición resultados de los ensayos de descargas parciales. Los mismos deben ser analizados e interpretados para poder tener una primera aproximación del estado de aislaciones críticas de los elementos.

Los análisis llevados a cabo en los diagramas requieren de mucha experiencia del ámbito del laboratorio y es el encargado del laboratorio quien debe tener los

⁵ Ilustraciones tomadas del libro del Dr. F. H. Kreuger, Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment [1]

conocimientos y experiencias necesarios para poder obtener resultados que sirvan a la caracterización dieléctrica del aparato ensayado.

Algunos ejemplos de los diagramas obtenidos, se presentan aquí.

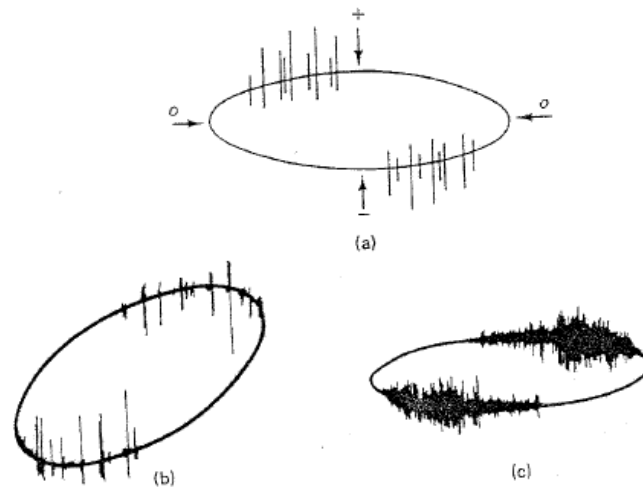


Figura 4-4-1 Descargas parciales en dieléctricos

Como se observa, existen patrones en los diagramas que podemos tener presente para hacer un diagnóstico de nuestro equipamiento ensayado. Observa los lugares y magnitudes donde se desarrollan las descargas parciales que serán importante en dicho diagnóstico. También será de referencia importante observar en que semi ciclo se producen, así como también si el patrón se repite en algún recorrido de la curva.

4.1 Descargas en electrodos

Si una descarga parcial toma lugar entre un electrodo y el dieléctrico, el patrón de onda será asimétrico como se muestra en la Figura 4-4-2. La diferencia de magnitudes de las descargas en el ciclo positivo con el negativo se debe a la presencia del dieléctrico actuando eléctricamente diferente para el caso de la onda negativa. Esto se puede ver mejor modelando un circuito básico del dieléctrico al que está sometido el potencial.

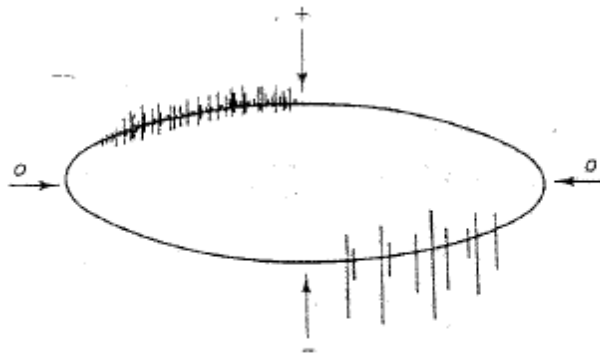


Figura 4-4-2 Descarga parcial asimétrica

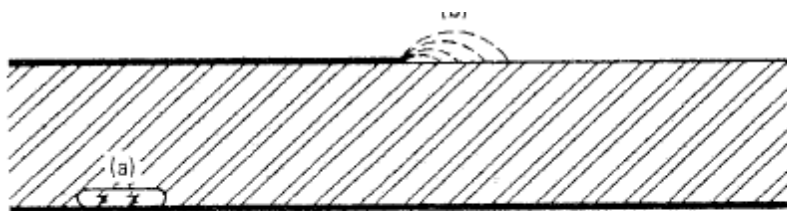


Figura 4-4-3 Ejemplo de descarga en electrodo

4.2 Objetos sueltos

Puede ocurrir que nos encontremos ante una situación en la cual partes metálicas pueden estar “flotando” en un campo eléctrico. Esto puede producir descargas que presentan una forma particular en la onda, las cuales se pueden apreciar en la Figura 4-4-4.

Como se pueden observar los pulsos tanto de la onda positiva, como negativa poseen las mismas amplitudes con patrones de separación igual entre ellos.

Estos patrones suelen aparecer también cuando no se tiene ciertos cuidados en el momento de realizar el ensayo. Objetos metálicos pequeños o grandes, cercanos a la unidad de ensayo son responsables muchas veces de estos patrones, dando en sí un falso testeo.

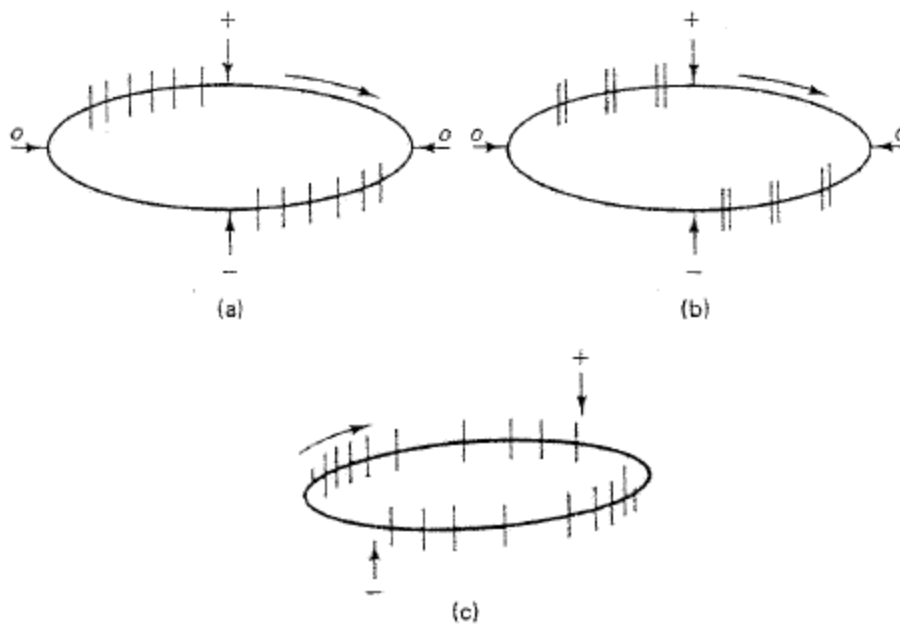


Figura 4-4-4 Descargas parciales por objetos flotantes

4.3 Descargas parciales en aire y hexafloruro de azufre

Es un típico patrón que se encuentra en presencia de descarga corona. Si la descarga ocurre en el medio ciclo negativo, aparece un pico de alta tensión. Si la descarga se da en el ciclo positivo, esta se va a tierra y no la podemos identificar en el diagrama.

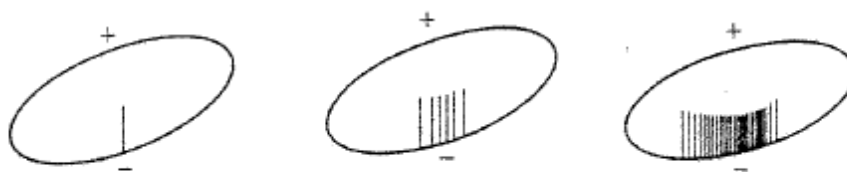


Figura 4-4-5 Descarga corona en los electrodos de alta tensión.

4.4 Descarga corona en aceite

Este patrón mostrado en la Figura 4-4-6 revela descargas coronas en los dieléctricos. La descarga ocurre en ambos ciclos y son simétricas alrededor de los picos de tensión. Generalmente las descargas de baja magnitud son todas iguales mientras que las de grandes magnitudes pueden ser iguales o puede tener variaciones en su patrón

apareciendo descargas aisladas que pueden confundir al laboratorista sobre el fenómeno que se está presentando.

Algo a tener en cuenta es que el número de descargas se incrementa rápidamente con la tensión aplicada.

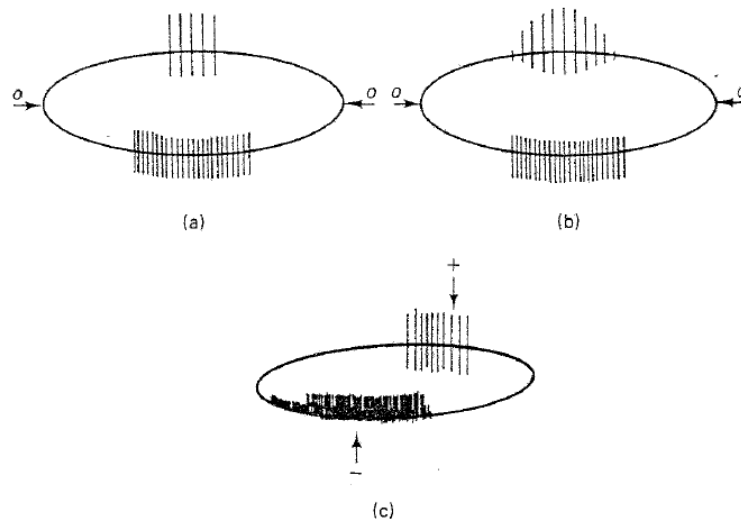


Figura 4-4-6 Descarga corona en aceite

4.5 Algunas fuentes de interferencia

A modo de referencia se muestran ejemplos de cómo algunas fuentes de interferencia afectan el espectro de onda. En estas se podrá observar cómo estas fuentes afectan a la curva y como pueden llevar al laboratorista a tomar conclusiones erróneas. Es por esto que en el momento de realizarse el ensayo se debe tener suma precaución del ambiente y los objetos que rodean al ensayo.

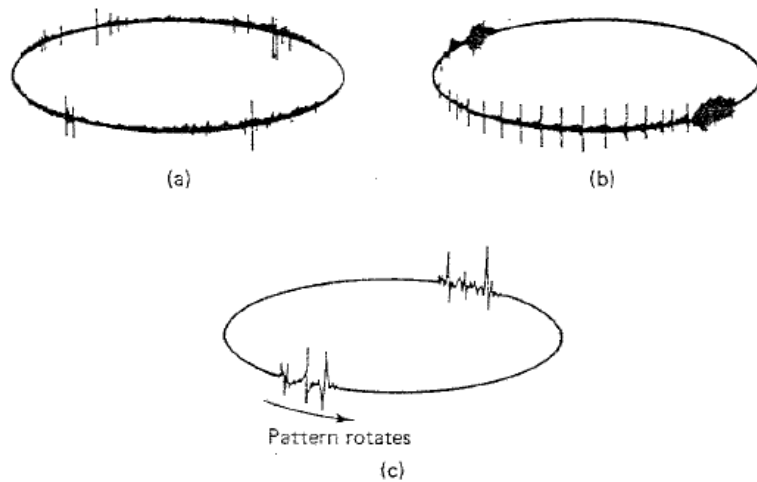


Figura 4-4-7 Fuentes de interferencia: (a) Causada por tiristores; (b) por lámpara fluorescente; (c) máquina asincrónica

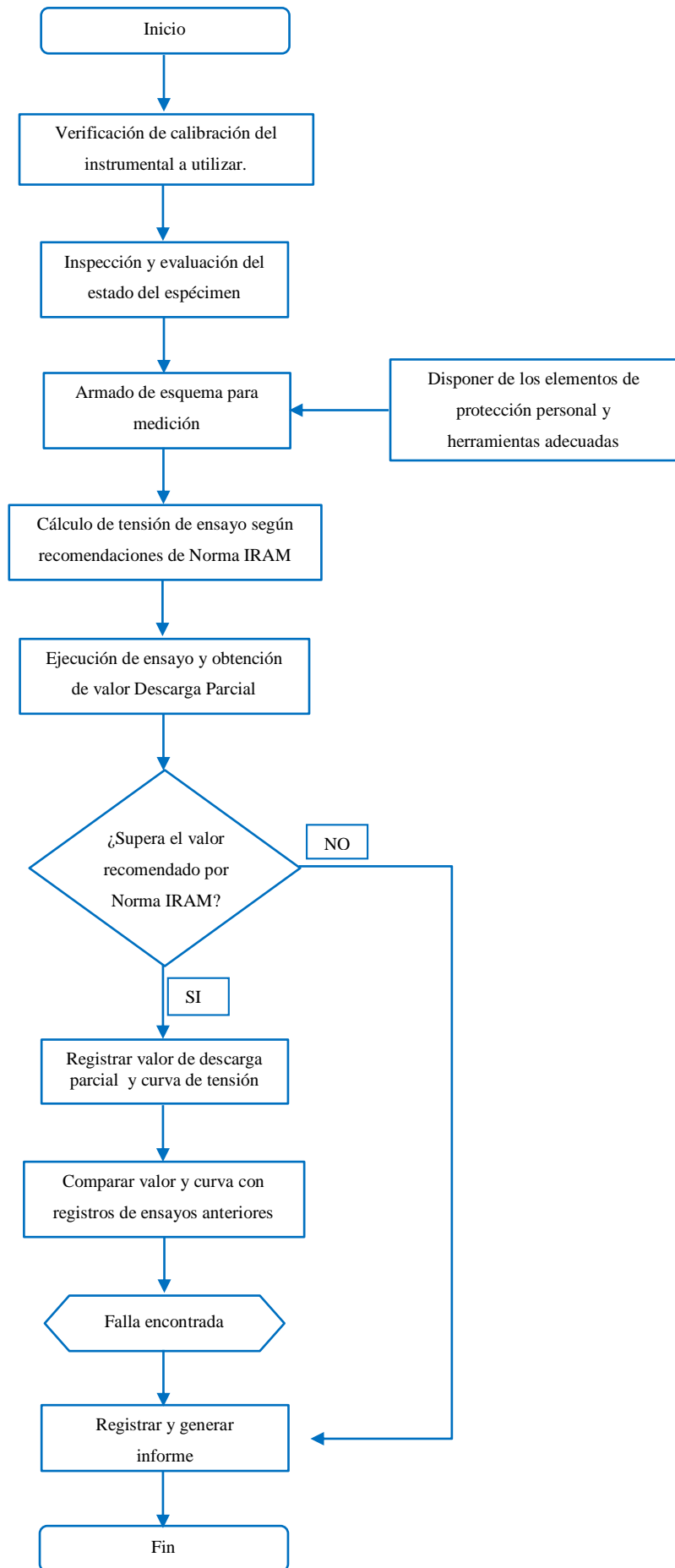
5 Ensayo práctico de Descarga Parcial

5.1 Procedimiento

Para obtener resultados reproducibles en los ensayos de descargas parciales, es necesario un control cuidadoso de todos los factores relevantes.

- La superficie de los aisladores debe estar limpia y seca. Evitando así, humedad o contaminación sobre las superficies que puedan causar descargas parciales.
- Utilizar para la interconexión del circuito de alta tensión, caños rígidos o corrugados, de sección circular, sin puntas, con el fin de minimizar la posibilidad de provocar efectos corona en los elementos.

En base a la IEC60270 se deben seguir una serie de pasos a fin de obtener resultados de los estados en lo que se encuentra el dieléctrico ensayado. Se dará una introducción mediante el siguiente diagrama y luego se desarrollara cada ítem.



5.2 Esquema de medición

Según lo establecido anteriormente, se utilizará el esquema indirecto propuesto por la norma IEC 60270. En este sistema el capacitor de acople, se encuentra conectado del lado de alta tensión, formando la entrada al sistema de medición. Con la excepción de que la impedancia filtro se coloca en el lado de baja tensión del transformador mejorando el filtrado.

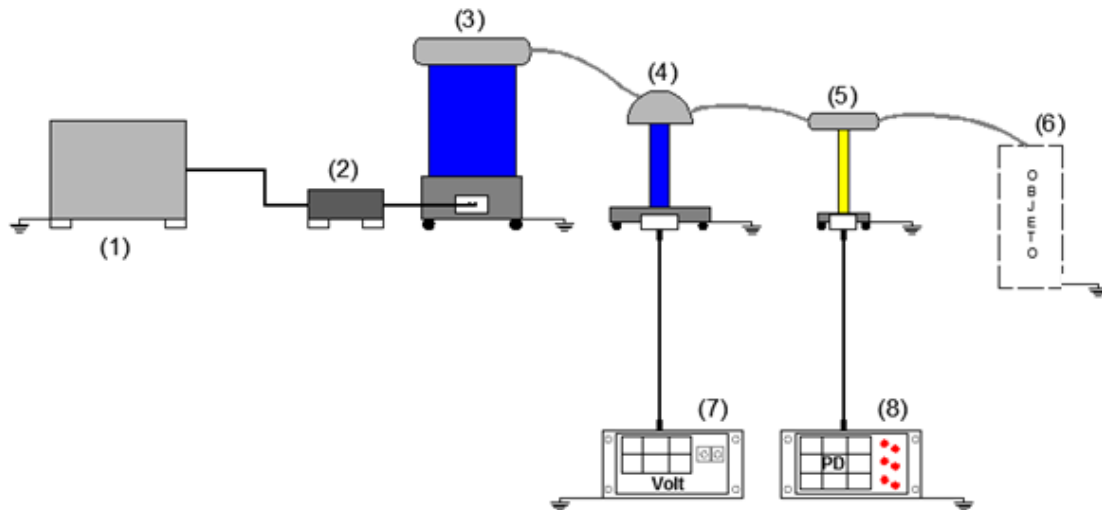


Figura 5-1 Circuito utilizado para medición de Descarga Parcial

Referencias:

- (1) Transformador variable
- (2) Impedancia filtro
- (3) Transformador elevador de tensión
- (4) Divisor de tensión
- (5) Capacitor de acoplamiento
- (6) Objeto bajo ensayo
- (7) Medidor de tensión
- (8) Medidor de Descargas Parciales

Nota: Para el ensayo de descargas parciales, se debe poner a tierra efectiva y eficiente, todos los elementos bajo prueba, con el objetivo de reducir los caminos de corrientes de dispersión que introduzcan perturbaciones en la medición.

Observación: Los datos de los equipos utilizados se muestran en el anexo II de este trabajo.

5.3 Procedimiento de Calibración

El objetivo de la calibración es el de verificar que el sistema de medición será capaz de cuantificar correctamente, en amplitud y en fase, la magnitud de la descarga parcial, de acuerdo a una cantidad considerada como patrón, expresada en pico coulombs (pC).

Esta magnitud patrón será provista por un instrumento específicamente contrastado según lineamientos de la norma IEC 60270, denominado Calibrador.

La etapa de calibración debe ser realizada siempre en forma previa al energizado del sistema, y luego de verificados y conectados todos los elementos que intervienen en el circuito de ensayo (muestra, fuente, accesorios, etc), debido a que cada elemento tendrá un impacto sobre la carga aparente a registrar.

Una nueva calibración deberá ser realizada cada vez que se efectúe una nueva medición bajo distintas condiciones.

El pulso de calibración debe ser inyectado ubicando el calibrador lo más cerca posible de la muestra a ensayar. La magnitud del pulso de calibración a inyectar, debe ser seleccionado en el orden más cercano posible al nivel de descarga parcial que se espera medir en la muestra bajo ensayo (50% a 200% de la magnitud especificada de descarga parcial, según Norma IEC 60270). Una magnitud patrón de 100pC en nuestros ensayos es correcto.

Conectar un borne del calibrador en el terminal de la muestra a ensayar y el otro borne a potencial de tierra. Visualizar el pulso de calibración en la pantalla del medidor y aceptar su magnitud en el seteo del equipo.

Una vez finalizada la calibración del sistema se debe desconectar y retirar el calibrador antes de proceder a la energización.

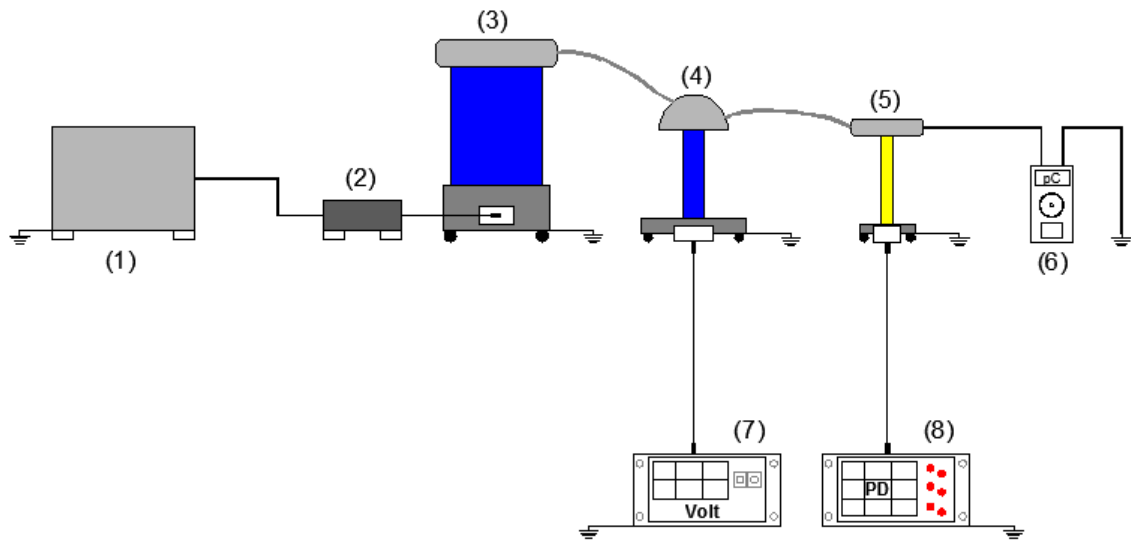


Figura 5-2 Circuito utilizado para calibración del medidor de Descarga Parcial

Referencias:

- (1) Transformador variable
- (2) Impedancia filtro
- (3) Transformador elevador de tensión
- (4) Divisor de tensión
- (5) Capacitor de acoplamiento
- (6) Calibrador
- (7) Medidor de tensión
- (8) Medidor de Descargas Parciales.

Nota: una vez finalizada la calibración del sistema, se debe desconectar y retirar el calibrador, antes de proceder a la energización.

5.3.1 Proceso de calibración del DDX-9101

El equipo tiene un switch “on/off” y seis botones etiquetados F1 a F6. Estos pueden ser accionados en cualquier momento durante el ensayo. Las funciones “F” corresponden a las etiquetas mostradas en la pantalla.

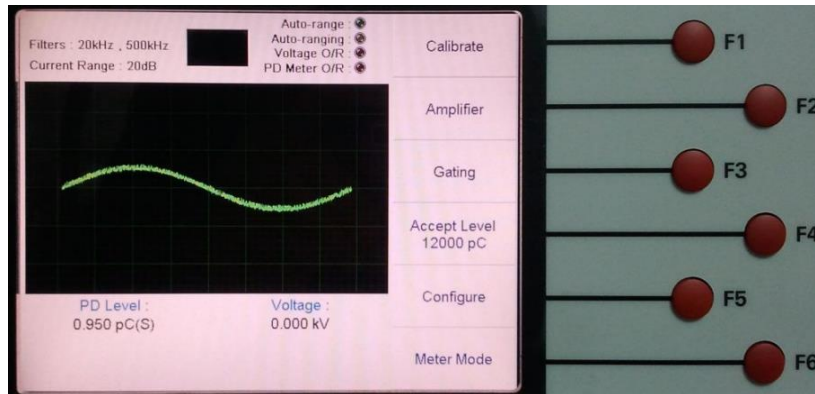


Figura 5-3 Detalle de Descarga Parcial DDX-9101

La calibración del instrumento para la ejecución del ensayo se realiza siguiendo los siguientes pasos:

1. Encender el medidor de descargas parciales DDX-9101.
2. Encender el calibrador y seleccionar la calibración deseada. Por ejemplo 100pC.
3. Comprobar que el DDX-9101 detecte el pulso de calibración.
4. Seleccionar “Calibrate” y establecer el nivel de descarga.
5. Retirar el calibrador, el sistema está calibrado y se puede conectar a Alta Tensión.

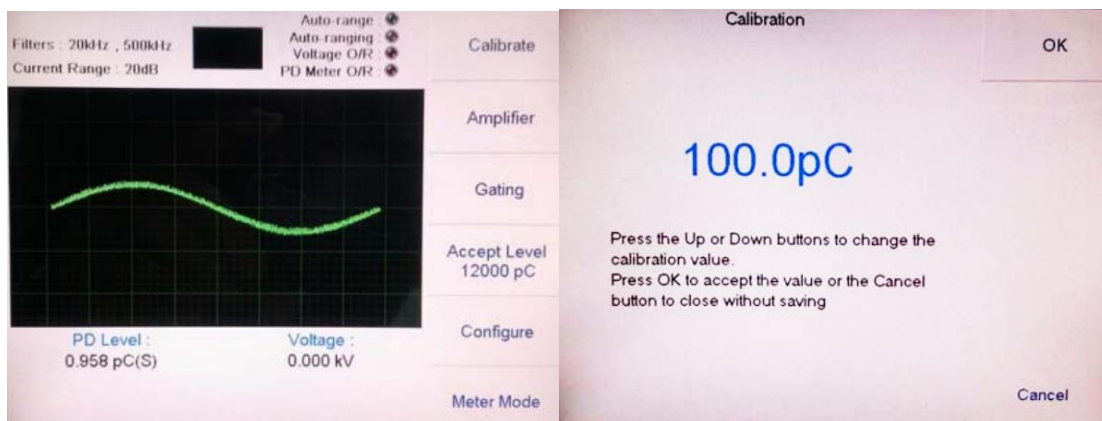


Figura 5-4 Calibración de descarga parcial en DDX-9101

5.4 Ensayos realizados

El objetivo que se persigue a continuación es comprobar experimentalmente el comportamiento y resultados del equipo de laboratorio utilizado para la medición de descargas parciales.

Se ensayarán tres objetos con el fin de poder sumar experiencia en el análisis de descargas parciales.

5.4.1 Ensayo sobre Transformador de Corriente de 132 kV -T1

El primer objeto ensayado es un transformador de corriente que posee las siguientes características:

Tipo	Exterior
Frecuencia	50 [Hz]
Clase de Aislación	145
Relación $k_n=I_p/I_s$	75 . 150 / 5 .5 [A]
Iter	293 x I_n
Idin	370 x I_n
Carga	30 VA, 1,2 clase
	0,5 60 VA, 2,4 clase 1
Peso Aceite	150 [kG]
Peso Total	550 [kG]

Nota: Por razones de confidencialidad se omitirá la marca del transformador

Verificación de aislación

Previo a comenzar con el ensayo, se realiza una medición de la aislación del transformador de corriente, utilizando el megóhmetro descrito en el anexo II, con el fin de comprobar el estado del espécimen.

Se entiende por resistencia de aislación a la resistencia óhmica que presenta la aislación eléctrica de un equipo al aplicarle una tensión continua de ensayo. En nuestro caso, se aplica una tensión de ensayo de 2000V durante 60 segundos. Esta medición da como resultado un valor de 50000 Mohm evidenciándose el buen estado de la aislación del transformador.

Ruido base

Entiéndase por ruido a las señales o disturbios externos detectados durante los ensayos de descargas parciales que se receptionan en el objeto bajo ensayo y se transmiten al equipo de medición.

En primera instancia se verifica el ruido base existente con el circuito desenergizado y con el transformador desconectado, arrojando un valor de 4,3pC. Luego se procedió a energizar gradualmente el circuito con el transformador desconectado, arrojando los siguientes valores:

Tensión [kV]	Descarga [pC]
0	3,85
30,34	3,93
65,01	4,25
108,35	5,45
130,02	4,7
138,25	5,45

Se obtiene de la tabla un valor de ruido base promedio de 4,605pC.

Calibración

Tal como se ha explicado en el apartado 5.3, la calibración se realizó con el fin de setear en el instrumento un valor de descarga de referencia, en este ensayo, el valor seteado es de 100pC, y es el calibrador el encargado de inyectar dicho pulso de descarga.

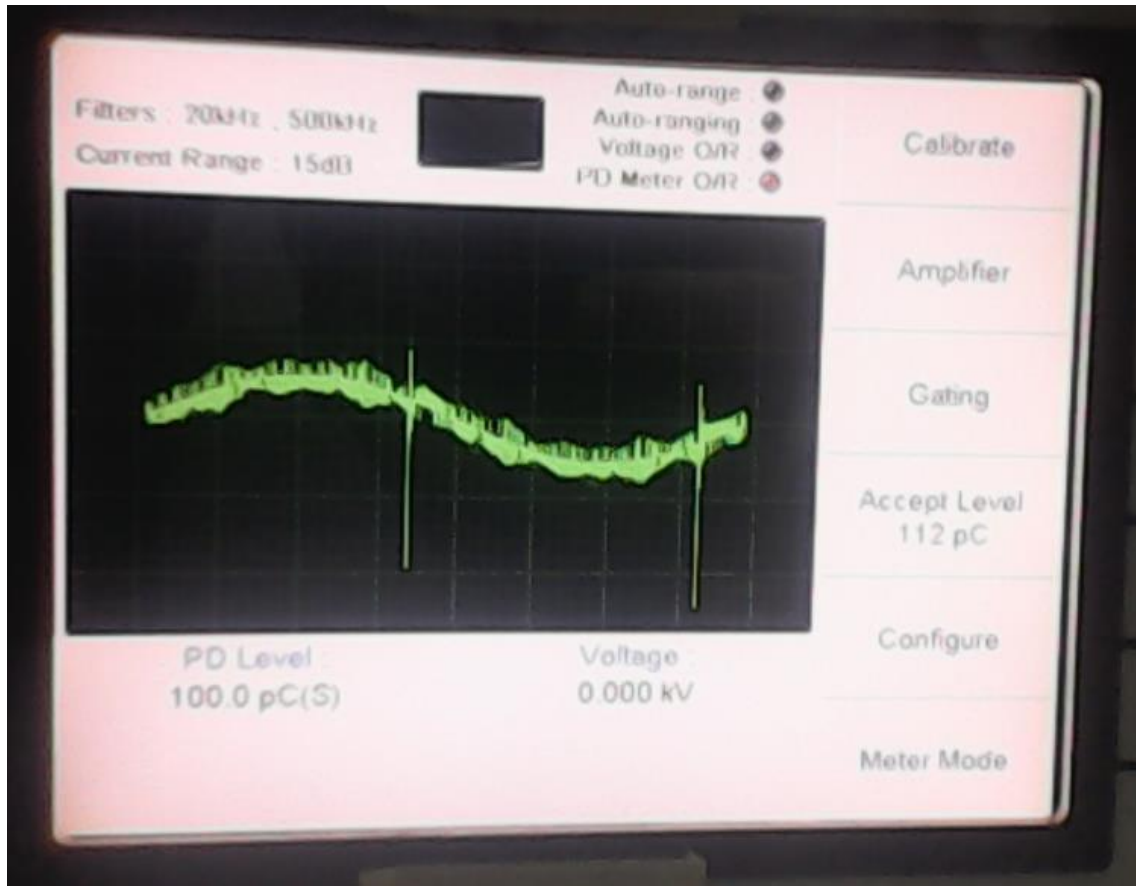


Figura 5-5 Calibración del instrumento

Medición

Luego de concluida la calibración del instrumento se procede a conectar el objeto bajo ensayo al circuito para poder determinar si éste presenta descargas.

El proceso de medición se llevó a cabo basándonos en la tabla N°6 de la Norma IRAM 2274/1980, la cual establece energizar al transformador a una tensión inicial de excitación aplicada durante 10 segundos (U_e) y luego disminuir a la tensión de medición de descargas parciales (U_o) aplicada por lo menos durante 60 segundos.

En nuestro caso tenemos:

$$U_e = 0,8 \cdot 1,3 \cdot U_m = 137,27 \text{ kV}$$

$$U_o = \frac{1,1 \cdot U_m}{\sqrt{3}} = 83,83 \text{ kV}$$

Donde U_m : tensión máxima del equipo.

Para este transformador bajo ensayo se ha adoptado un valor de U_m de 132kV.

El resultado de la medición del nivel de descargas parciales en el transformador de corriente fue de 4,17pC.

Comparando este resultado con el obtenido al verificar el nivel de ruido existente, podemos concluir que el transformador de corriente ensayado presenta un nivel despreciable de descargas parciales, prácticamente se lee solamente ruido.

Además, como la Norma IRAM 2274/80 establece que el nivel máximo de descargas parciales en transformadores de corriente es de 10pC, concluimos que el transformador presenta un nivel de descargas admisible por la norma.

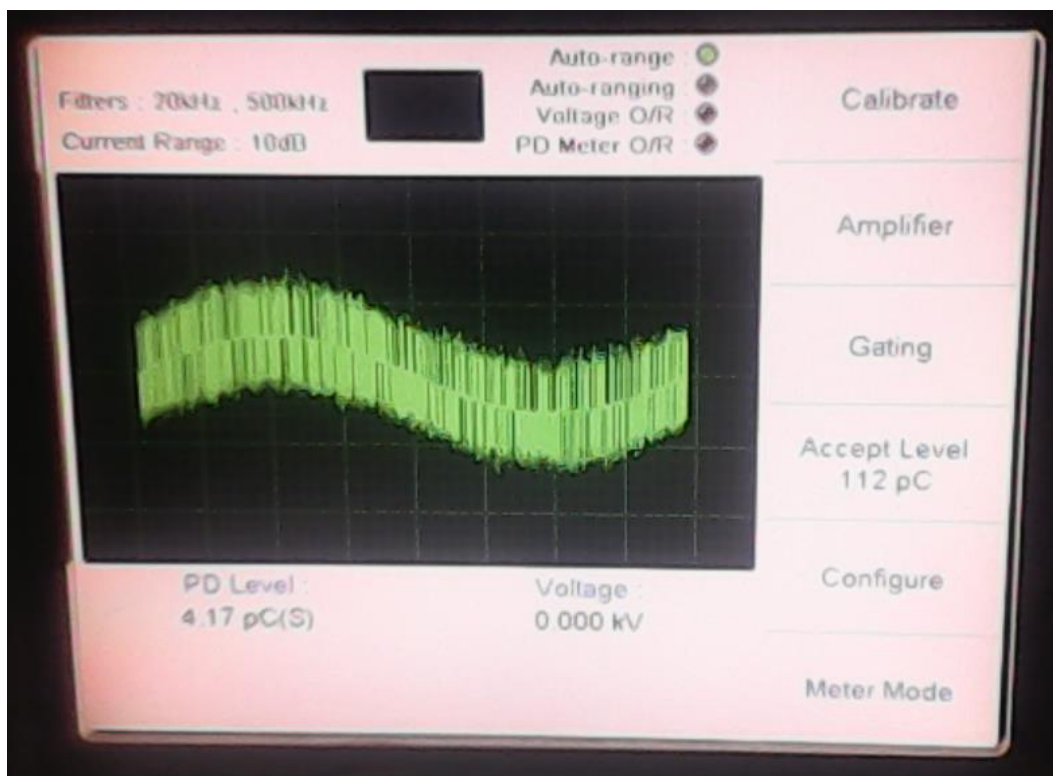


Figura 5-6 Medición de descargas parciales en transformador de corriente

5.4.2 Ensayo sobre Transformador de Tensión de 13,2 kV -T2

El transformador de tensión ensayado tiene las siguientes características:

Marca	AEG
N° Serie	2303
Tipo	Exterior
Frecuencia	50 [Hz]
Relación $k_n=U_p/U_s$	13200 / 110
Carga	30 VA, clase 0,5

Verificación de aislación

Previo a comenzar con el ensayo, se realiza una medición de la aislación del transformador de tensión, utilizando el megóhmetro descrito en el anexo II, con el fin de comprobar el estado del espécimen. En nuestro caso, se aplica una tensión de ensayo de 500V durante 60 segundos. Esta medición da como resultado un valor de 2000 Mohm evidenciándose el buen estado de la aislación del transformador.

Ruido base

Se verifica el ruido base existente con el circuito desenergizado y con el transformador desconectado, arrojando un valor de 3pC. Luego se procede a energizar gradualmente el circuito con el transformador desconectado, arrojando los siguientes valores:

Tensión [kV]	Descarga [pC]
0	4,96
8,7	3,47
12	3,43
14,7	3,42
19	3,42
26	3,48

Se obtiene de la tabla un valor de ruido base promedio de 3,69pC.

Calibración

Tal como se ha explicado en el apartado 5.3, la calibración se realizó con el fin de setear en el instrumento un valor de descarga de referencia, en este ensayo, el valor seteado es de 100pC, y es el calibrador el encargado de inyectar dicho pulso de descarga.

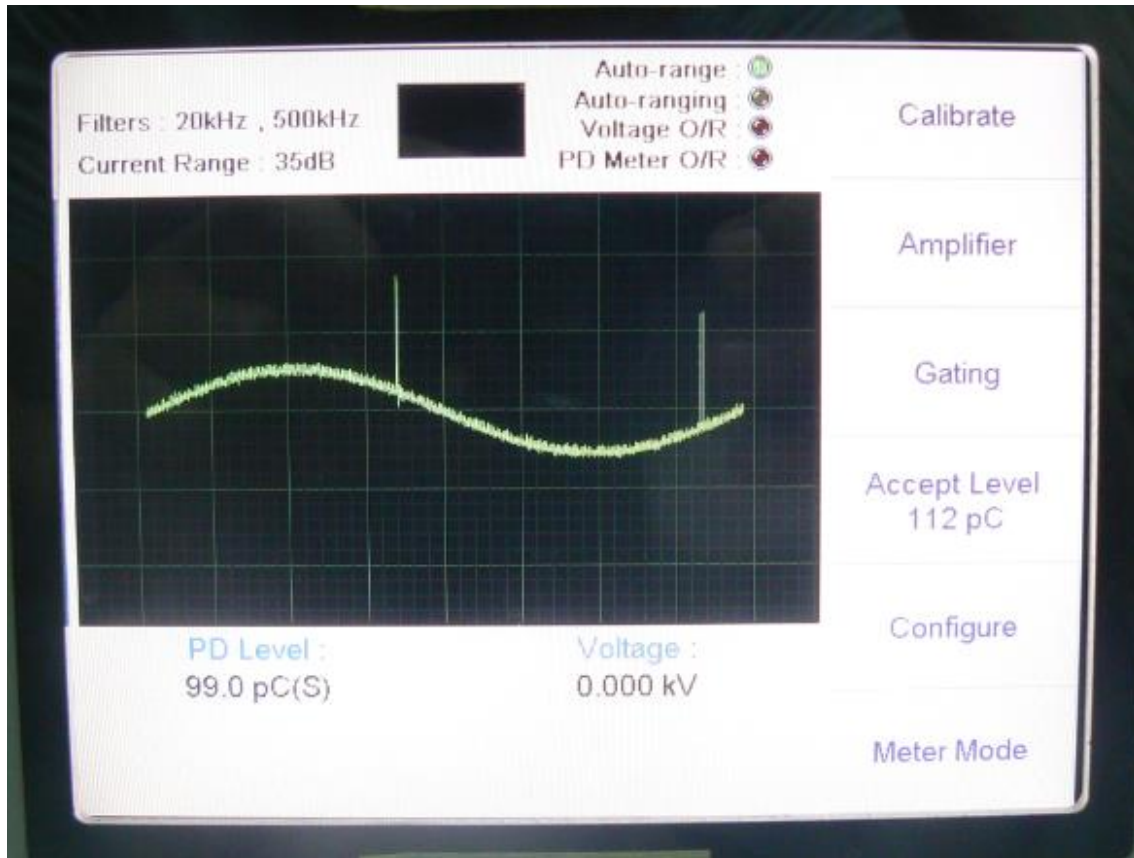


Figura 5-7 Calibración del instrumento a 100pC

Medición

Luego de concluida la calibración del instrumento se procede a conectar el transformador de tensión al circuito para poder determinar si éste presenta descargas.

El proceso de medición se llevó a cabo basándonos en la tabla N°6 de la Norma IRAM 2274/1980, la cual establece energizar al transformador a una tensión inicial de excitación aplicada durante 10 segundos (U_e) y luego disminuir a la tensión de medición de descargas parciales (U_o) aplicada por lo menos durante 60 segundos.

En nuestro caso tenemos:

$$U_e = 1,3 \cdot U_m = 18,85 \text{ kV}$$

$$U_o = 1,1 \cdot U_m = 15,95 \text{ kV}$$

Donde U_m : tensión máxima del equipo.

Para este transformador bajo ensayo se ha adoptado un valor de U_m de 14,5 kV.

El resultado de nuestra medición fue de 21,6nC a una tensión de 15,82kV.

Esto indica que el Transformador de Tensión se encuentra en condiciones inaceptables de operación, ya que el nivel de descargas parciales hallado supera considerablemente los valores adoptados por la Norma IRAM 2274/80. Se recomienda dejar fuera de servicio el transformador.

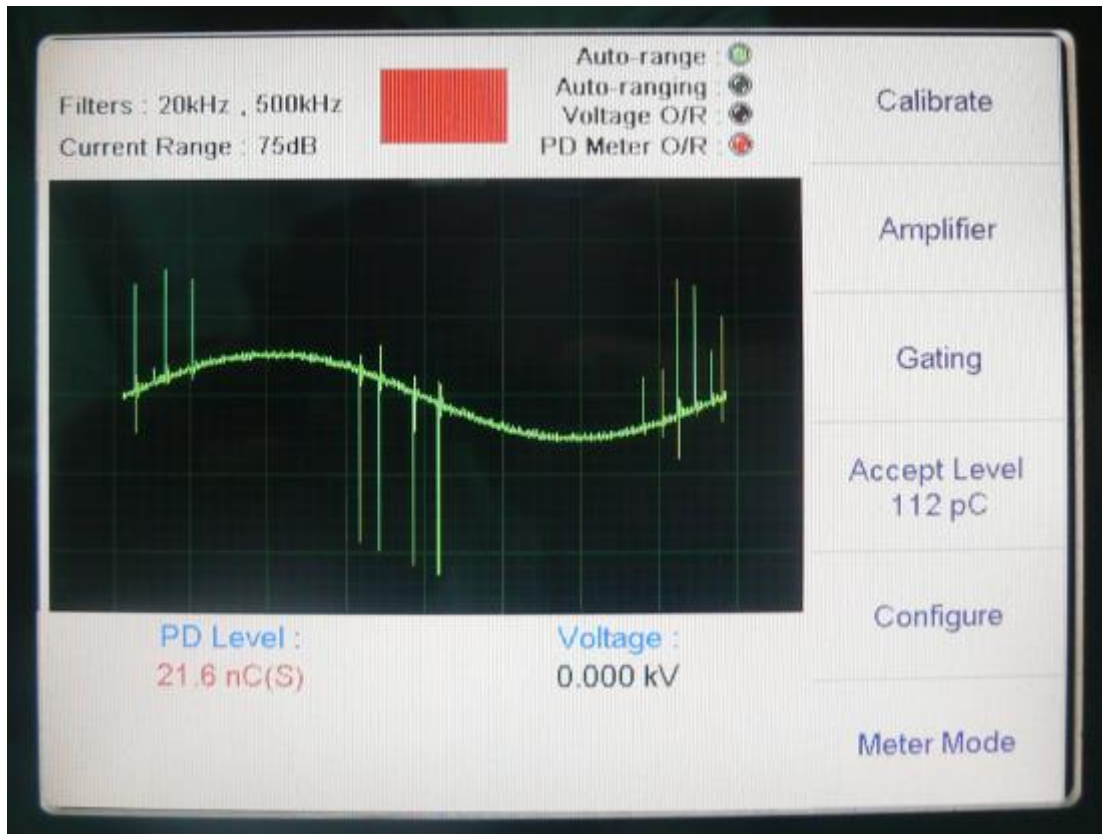


Figura 5-8 Medición de descargas parciales en transformador de tensión

5.4.3 Ensayo sobre Descargador de Sobretensiones de 132 kV

Verificación de aislación

Previo a comenzar con el ensayo, se realiza una medición de la aislación del transformador de corriente, utilizando el megóhmetro descrito en el anexo II, con el fin de comprobar el estado del espécimen. En nuestro caso, se aplica una tensión de ensayo de 500V durante 60 segundos. Esta medición da como resultado un valor de 300Mohm evidenciándose el buen estado de la aislación del transformador.

Ruido base

Verificamos el ruido base que tenemos con el circuito desenergizado y con el descargador de sobretensiones desconectado, arrojando un valor de 3,35pC. Luego se procedió a energizar gradualmente el circuito con el descargador desconectado, arrojando los siguientes valores:

Tensión [kV]	Descarga [pC]
0	3,35
15,8	3,83
26,4	3,8
38,8	4,14
51,3	3,7
65,5	4,33
76,2	3,91
83,4	3,72

Se obtiene de la tabla un valor de ruido base promedio de 3,85pC.

Calibración

Tal como se ha explicado en el apartado 5.3, la calibración se realizó con el fin de setear en el instrumento un valor de descarga de referencia, en este ensayo, el valor seteado es e 100pC, y es el calibrador el encargado de inyectar dicho pulso de descarga.

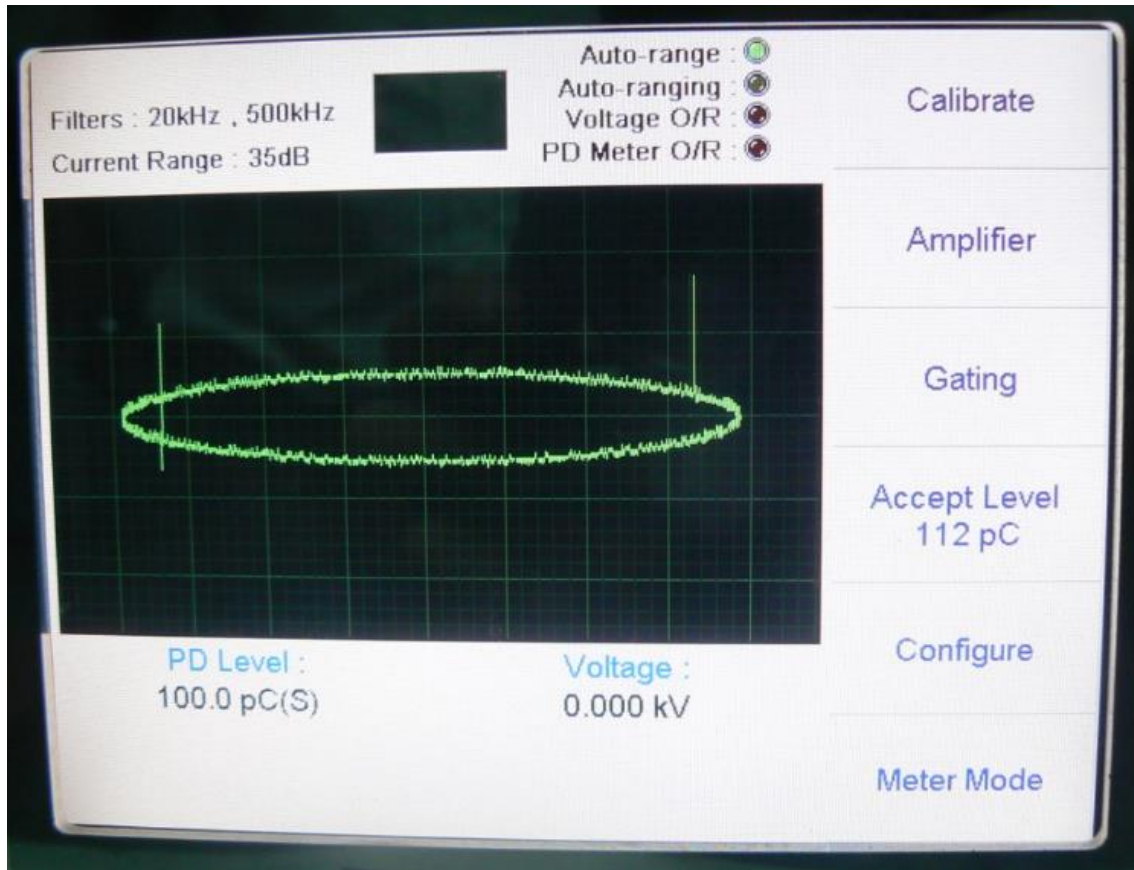


Figura 5-9 Calibración del instrumento a 100pC

Medición

Luego de concluida la calibración del instrumento se procede a conectar el descargador de sobretensiones al circuito para poder determinar si éste presenta descargas.

El proceso de medición se llevó a cabo basándonos el capítulo 8.2.1, ensayos de recepción normalizados, de la Norma IRAM 2472/1996.

Para el ensayo de descargas parciales se incrementa la tensión de frecuencia industrial aplicada al descargador completo hasta alcanzar su tensión nominal, la que se mantiene durante 10 segundos para luego disminuirla a un valor igual a 1,05 veces su tensión de operación permanente.

En nuestro caso tenemos:

$$U_p = \frac{U_n}{\sqrt{3}} = 76,21 \text{ kV}$$

$$U_o = 1,05 \cdot U_p = 80 \text{ kV}$$

Donde U_p : tensión nominal del equipo.

U_o : tensión de ensayo.

Se adopta una tensión de excitación (U_e) igual a 85kV.

El resultado de la medición del nivel de descargas parciales en el descargador de sobretensiones fue de 7,34pC.

Comparando este resultado con el obtenido al verificar el nivel de ruido existente, podemos concluir que el descargador de sobretensiones ensayado presenta un nivel despreciable de descargas parciales.

Además, como la Norma IRAM 2472/96 establece que el nivel máximo de descargas parciales en descargadores de sobretensiones es de 50pC, concluimos que el descargador ensayado presenta un nivel de descargas admisible por la norma.

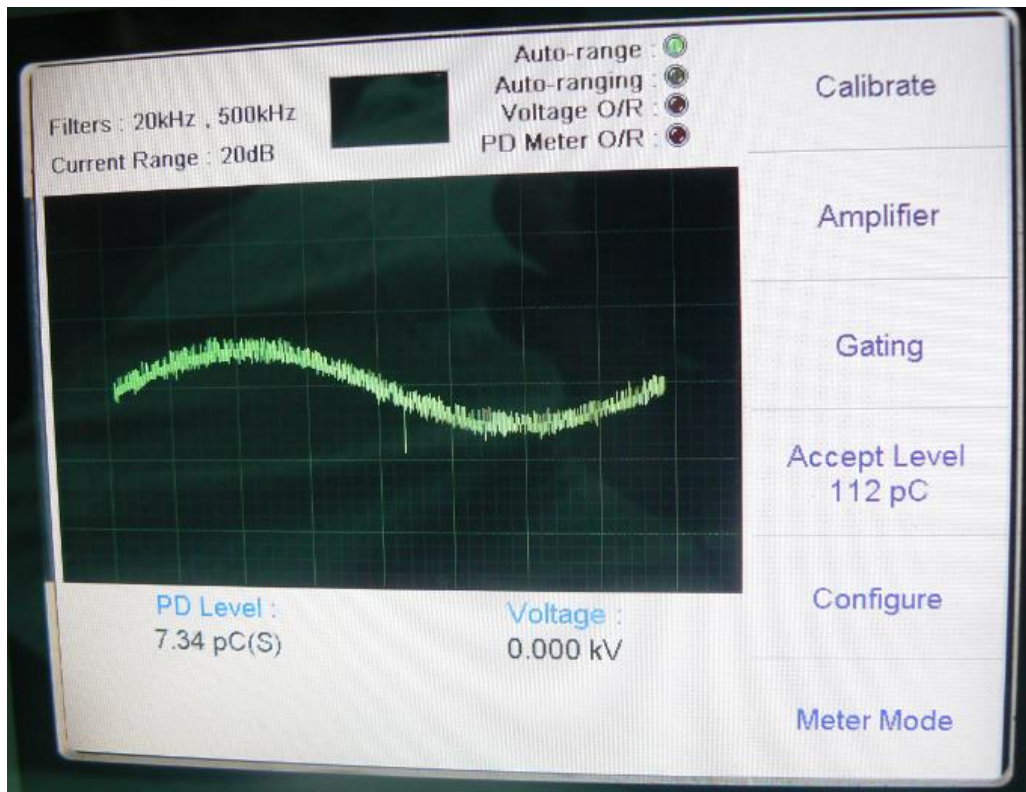


Figura 5-10 Medición de descargas parciales en descargador de sobretensiones

5.4.4 Verificación de sensibilidad del instrumento.

Con el fin de comprobar la sensibilidad del detector de descargas parciales DDX-9101 en forma cuantitativa, se ha colocado en los terminales del capacitor de acoplamiento, un conductor de aluminio desnudo formando una punta aguda como objeto de ensayo.

Este ensayo sirvió para evidenciar la existencia de descargas parciales de tipo corona en el conductor.

Seteado el instrumento a 100pC como referencia, se procedió a incrementar la tensión hasta un valor final de 19,5kV, dando como resultado una descarga de 36,5pC.

En la Figura 5.11 se puede observar la curva de descarga con la forma típica de una descarga parcial de tipo corona.

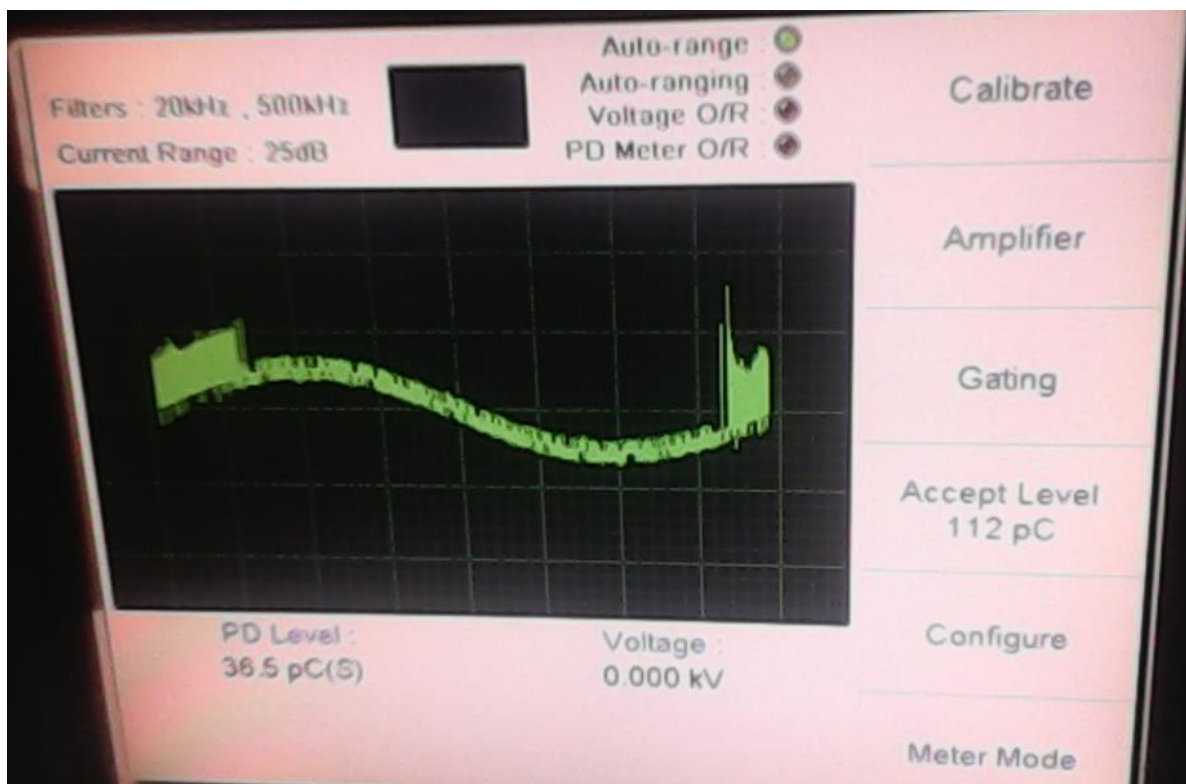
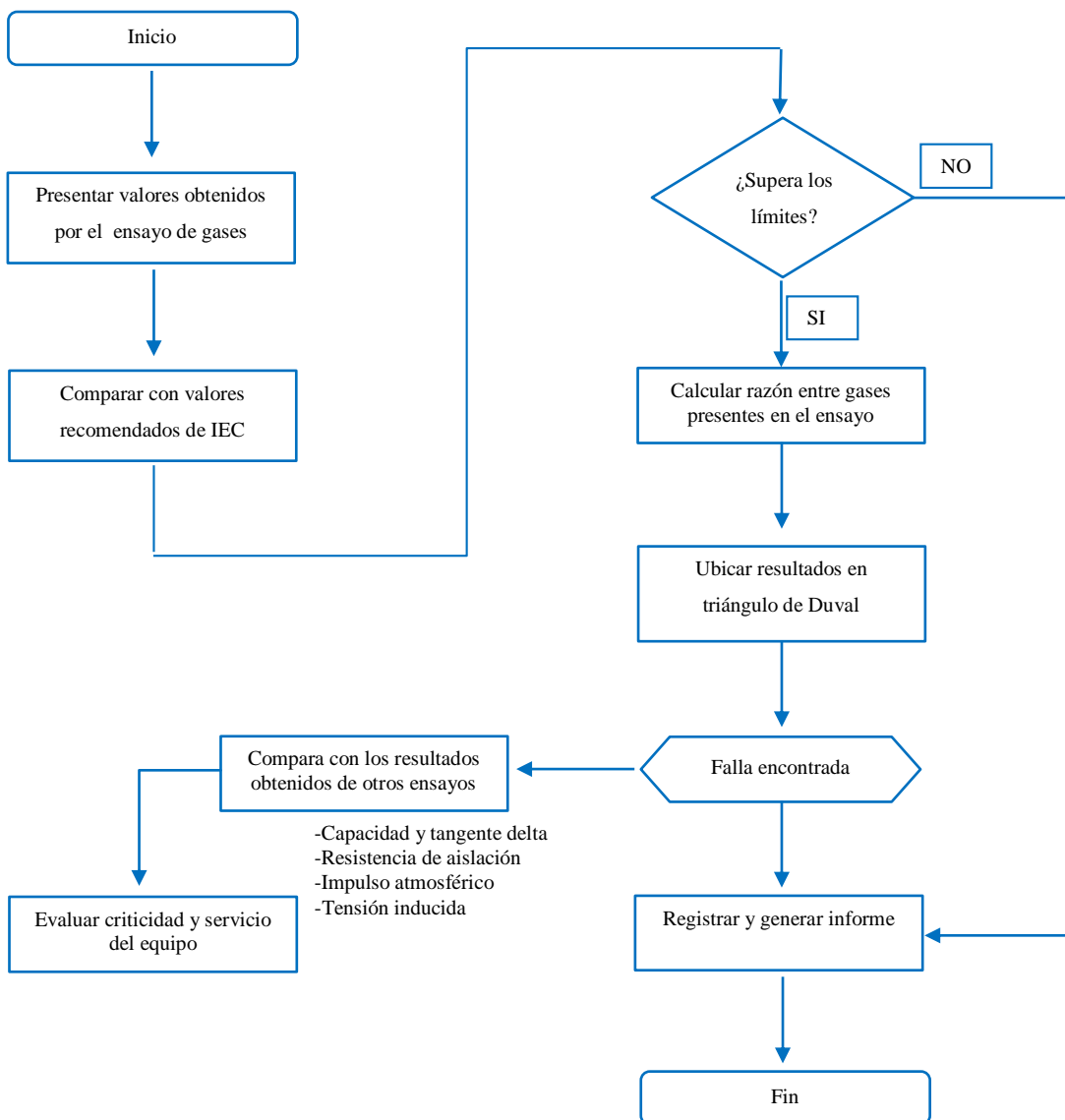


Figura 5-11 Medición de descargas parciales en conductor de aluminio.

5.5 Ensayo por el método de gases disueltos

A continuación se mostrara el uso del método del triángulo de Duval mediante el método de análisis de gases en esta oportunidad en transformadores.

El próximo diagrama permite observar los pasos que se deben realizar para tener un diagnóstico sobre el espécimen. Seguidamente se procederá a desarrollar los ensayos.



Es importante seguir cada paso que presenta el diagrama para obtener un buen análisis y resultado de los valores que brinde el ensayo. A cada valor obtenido se le adjunto el valor límite establecido en la siguiente tabla extraída de la norma IEC 60599.

Values in microlitres per litre

Transformer sub-type	H ₂	CO	CO ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂
No OLTC	60-150	540-900	5 100-13 000	40-110	50-90	60-280	3-50
Communicating OLTC	75-150	400-850	5 300-12 000	35-130	50-70	110-250	80-270

*OLTC: Conmutador de tomas en carga

A continuación se presenta el uso del método de Duval a fin de mostrar su mecanismo y resultados. Cabe aclarar que el mismo se realiza sobre dos transformadores de potencia que fueron atractivos para exponer el uso del método. Lamentablemente no se pudo realizar los ensayos sobre transformadores de medida ya que no se contaba con fondos suficientes para enviar muestras a un laboratorio tercerizado.

5.5.1 Transformador 13,2kV - T3

Fecha de ensayo 24/01/2008

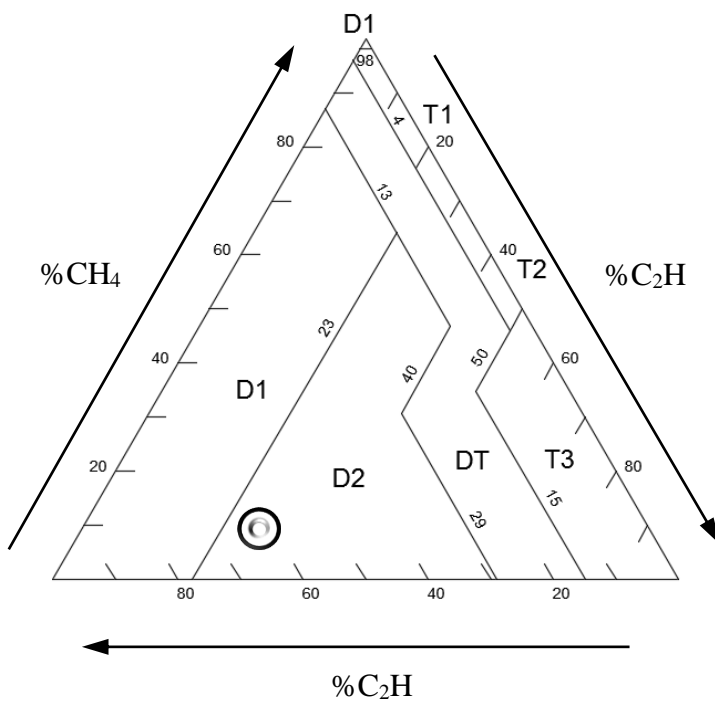
En la tabla se puede visualizar los datos brindados por la cromatografía. El transformador evaluado es de 1000 kVA, 13,2/0,4kV, con sus arrollamientos sumergidos en aceite aislante, enfriados por circulación natural de aceite y de aire con tanque de expansión.

El dato obtenido de cada gas tiene unidades de ppm/día

Datos	Valor	Limites
Temperatura del fluido [°C]	32	
Hidrogeno (H2)	24042	150
Metano (CH4)	1882	130
Etano (C2H6)	549	70
Etileno (C2H4)	4845	250
Acetileno (C2H2)	10824	270
Monóxido de Carbono (CO)	643	850
Dióxido de Carbono (CO2)	1857	12000
Oxigeno (O2)		
Nitrógeno (N2)	41520	

TGCD (ppm)	42785	
TGC Equivalente (%)	51.21	750
CO2/CO	2.89	
O2/N2	0.23	
Agua [ppm]	36	20
Saturación de Agua (%)	40	
Rig. IEC60156 [kV]	54.5	
Tangente Delta 90°C (%)	0.54	

Como se puede observar en la tabla anterior existen valores que sobrepasan a los recomendados como límites por la norma, por lo que se procede a analizar el tipo de falla utilizando el triángulo de Duval.



Calculadas cada una de las razones que identifican a cada arista del triángulo podemos identificar que el tipo de falla presente es del tipo D2 designada como “Descarga de alta energía”

5.5.2 Transformador 33kV – T4

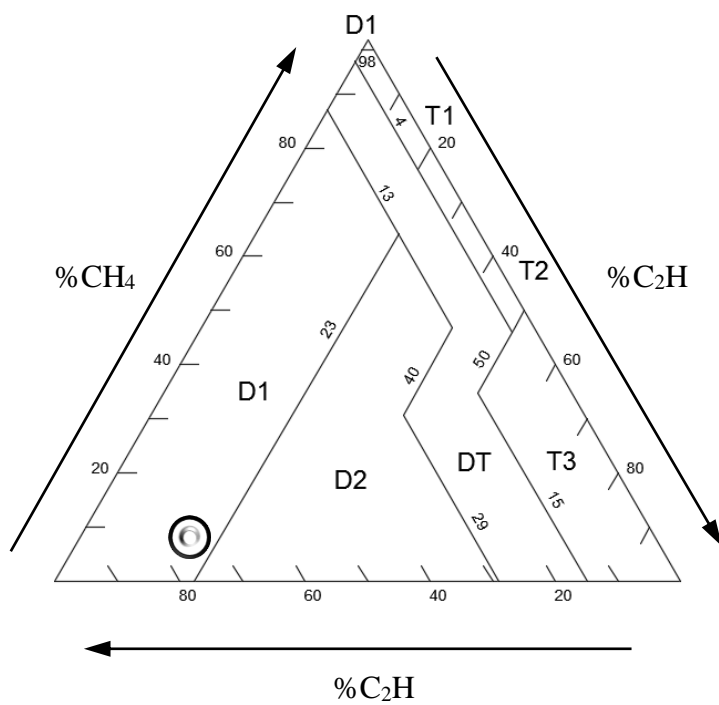
Fecha de ensayo 13/02/2008

En la tabla se puede visualizar los datos brindados por la cromatografía. El transformador evaluado es de 2500 kVA, 33/0,4kV, con sus arrollamientos sumergidos en aceite aislante, enfriados por circulación natural de aceite y de aire con tanque de expansión.

El dato obtenido de cada gas tiene unidades de ppm/día

Datos	Valor	Limites
Temperatura del fluido [°C]	40	
Hidrogeno (H2)	24402	150
Metano (CH4)	3335	130
Etano (C2H6)	222	70
Etileno (C2H4)	4917	250
Acetileno (C2H2)	25750	270
Monóxido de Carbono (CO)	302	850
Dióxido de Carbono (CO2)	3146	12000
Nitrógeno (N2)	36690	
TGCD (ppm)	58928	
TGC Equivalente (%)	53.96	750
CO2/CO	10.42	
O2/N2	0.10	
Agua [ppm]	58	20
Saturación de Agua (%)	48	
Rig. IEC60156 [kV]	57	
Tangente Delta 90°C (%)	0.21	

Como se puede observar en la tabla anterior existen valores que sobrepasan a los recomendados como límites por la norma, por lo que se procede a analizar el tipo de falla utilizando el triángulo de Duval.



Calculadas cada una de las razones que identifican a cada arista del triángulo podemos identificar que el tipo de falla presente es del tipo D1 designada como “Descarga de baja energía”

6 Conclusiones

El conocimiento de la teoría de las descargas parciales ayuda a conocer el fenómeno y sus efectos sobre la aislación de los equipos eléctricos. Se comenzó desde lo básico explicando que son las descargas parciales y su naturaleza, pasando luego por sus clasificaciones y los modelos (abc y dipolo) que permiten una mejor comprensión.

Se introdujo el concepto de carga aparente, que como ya se explicó, se encuentra asociada al movimiento de cargas en el instante que se presenta la descarga parcial.

De todas las posibles formas de detección de una descarga parcial, el proyecto se centra en la detección eléctrica, por ser este método el más sensible.

Se mostraron los modelos prácticos que pretenden ayudar a detectar las descargas parciales, basándose en la Norma IEC 60270.

El método eléctrico permite a partir del valor que se obtiene, diagnosticar si el elemento bajo estudio se encuentra en presencia de descargas parciales. El instrumento utilizado DDX-9101 permite observar la forma de onda que se genera al aplicar tensión y permite presumir un tipo de falla.

Sin embargo, este método es muy impreciso al detectar el tipo de falla presente, debido a que se requiere personal acorde, con experiencia y conocimiento firme en el ámbito del laboratorio para poder analizar y diagnosticar correctamente las imágenes que genera el instrumento.

También, esta técnica tiene el inconveniente de perder precisión en las mediciones en campo debido a la alta interferencia electromagnética derivada del sistema eléctrico.

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

Por medio del triángulo de Duval, entre otros, es posible especificar el tipo de falla presente. Esta es una gran ventaja que posee este método. Testigo de esto, son los resultados obtenidos en los ensayos.

Cabe destacar que la experiencia realizada en la detección de descargas parciales se implementó satisfactoriamente en el Laboratorio de Alta Tensión. A continuación se hará mención a cada ensayo y los resultados obtenidos de cada transformador.

Para los ensayos realizados por el método eléctrico se encontró:

- El transformador de corriente T1 de 132kV se encuentra dentro de los parámetros esperados. En el gráfico dado por el instrumento se encuentra presencia de descarga corona. Pero es importante tener presente que es solo una estimación que es muy susceptible al ojo del laboratorista.
- El transformador de tensión T2 de 13,2kV se encuentra fuera de los límites establecidos por la norma. Se observa en el gráfico la presencia de descargas parciales en aire.

Para el método de gases disueltos, examinando los datos cromatográficos facilitados por el Laboratorio, se puede concluir, utilizando el método de Duval que:

- El transformador de potencia T3 de 13,2kV se encuentra fuera de los límites aceptados. Analizando los datos de gases, se pudo detectar tipo de falla D2- descarga de alta energía.
- El transformador de potencia T4 de 33kV se encuentra, al igual que en el transformador anterior, que los parámetros se encontraban fuera de los límites establecidos por la norma. La falla encontrada fue D1- descarga de baja energía.

No es para nada raro que encontremos cierta practicidad y seguridad en el método de Duval. En informes publicados durante los últimos años, se han comparado dicho ensayo con los demás existentes.

A continuación observaremos el porcentaje de diagnósticos correctos realizados por cada método. Dicha información se extrajo del artículo “Serveron White Paper: DGA Diagnostic Methods”. Claramente queda expresada la efectividad de Duval. Aunque

como se mencionó desde un comienzo, los métodos desarrollados no son determinísticos. No debemos dejar de tener esto presente.

La medición de descargas parciales debe ser un complemento de otros ensayos programados. Los resultados de las mediciones deberán ser correlacionados con los de rutina a fin de llevar a cabo una correcta toma de decisiones.

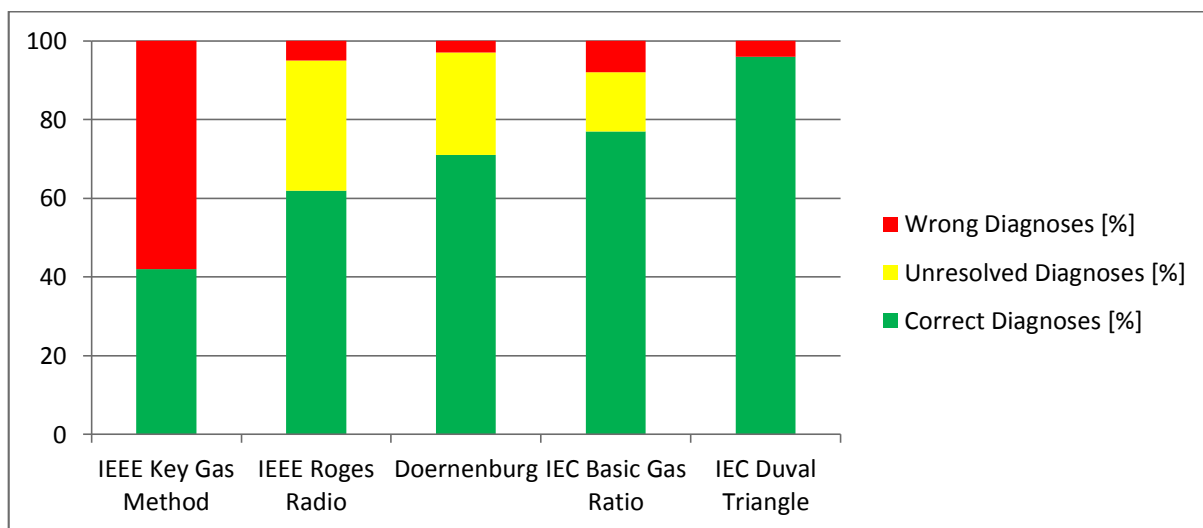


Figura 6-1 Porcentaje de diagnósticos incorrectos y correctos

Volviendo a los transformadores evaluados, como conclusión se detecta presencias de anomalías que pudieran afectar el servicio. Atento a esto, los transformadores de potencia debieron ser puestos fuera de servicios para realizar ensayos adicionales que verificaran los resultados obtenidos por el método eléctrico y el análisis de gases disueltos.

Para el caso del transformador de corriente de 132kV, al no detectarse desviaciones, se realizó un informe adjunto a los datos obtenidos que luego podrán ser usados en futuras mediciones y comparaciones, a fin de observar la evolución de las descargas parciales.

En el transformador de tensión de 13,2kV, los valores medidos de descargas parciales resultaron muy elevados comparados con los recomendados por la Norma Iram, con lo cual se comunica al personal del Laboratorio que es conveniente dejarlo fuera de servicio.

Para finalizar, en futuras trabajos, se propone abordar otros métodos de ensayos de detección de detección de fallas como lo son los métodos por FRA, pulso atmosférico, medición de tangente delta.

También sería una buena propuesta, profundizar los nuevos triángulos de Duval que han ido evolucionando. Evaluar su practicidad, comparándolo con otros métodos.

7 ANEXO I – TRIÁNGULOS DE DUVAL

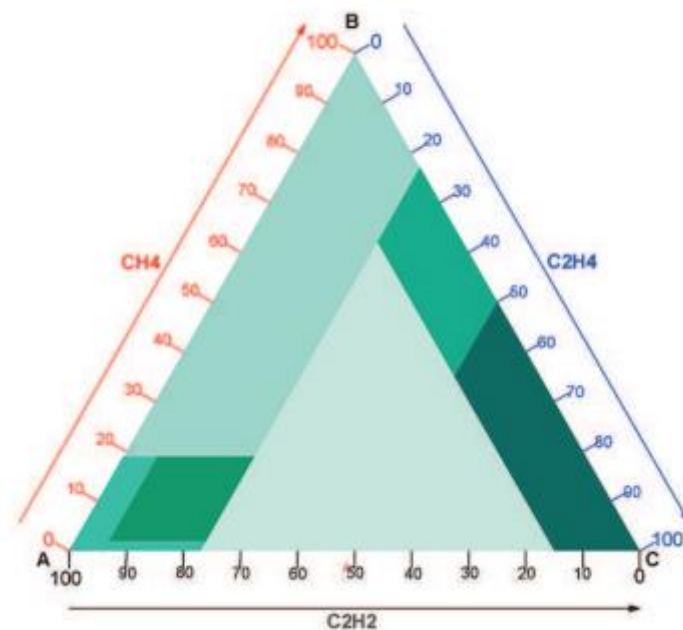
Recientemente se han realizado avances en los diagnósticos de fallas. Se busca lograr individualizar y identificar con más precisión a que falla se encuentra sometido el dieléctrico. El triángulo de Duval ha sido de gran inspiración para alguno y se a logrado profundizar su método, presentando nuevas modificaciones.

Se muestra a continuación los diferentes Triángulo para cada tipo de elemento a diagnosticar. Observar que más allá de la similitud entre Triángulo, las zonas que identifica cada falla son diferentes.

Se tomaron ilustraciones de la publicación, Estado del arte del análisis de gases disueltos en transformadores de potencia, Sarria J., Guerrero N, Rivas E. [18]

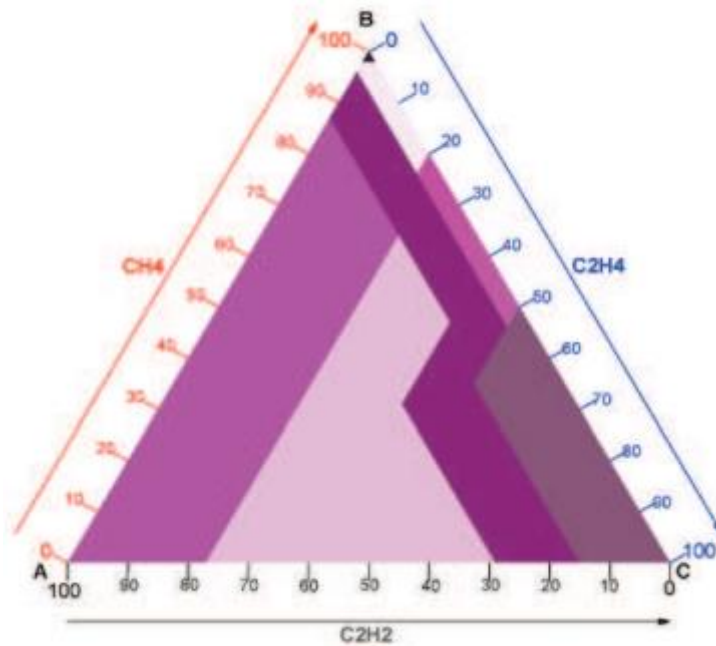
7.1 Triángulo para cambiadores de tomas de carga de aceite

Se identifican 7 zonas y los elementos que utiliza para evaluar las fallas son el acetileno, metano y el etileno.



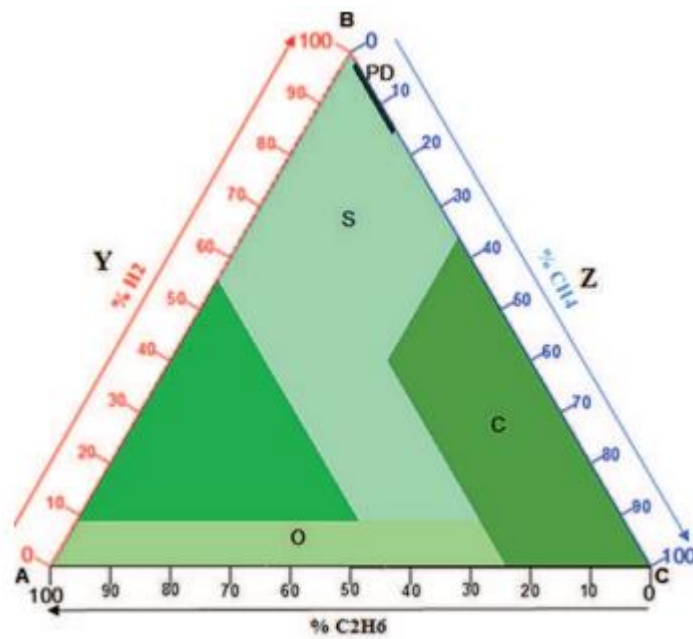
7.2 Triángulo para aceites no minerales

Se identifican 7 zonas y los elementos que utiliza para evaluar las fallas son el acetileno, metano y el etileno.



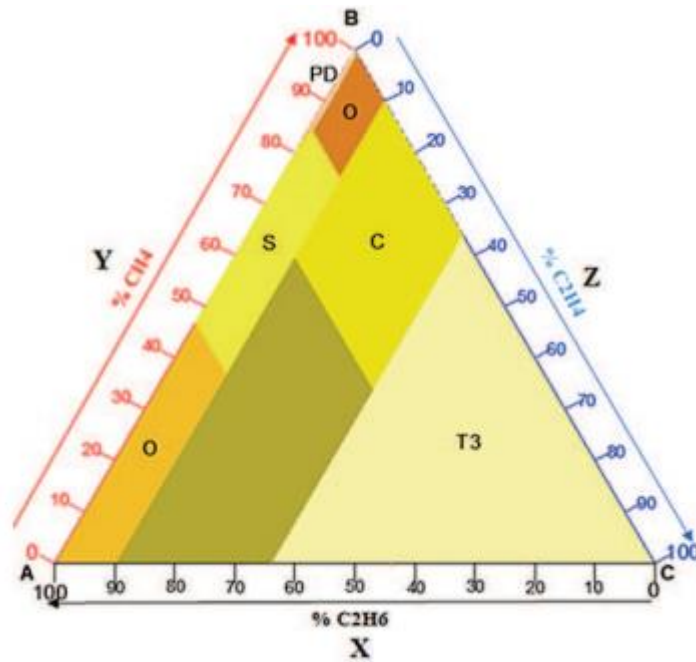
7.3 Triángulo para transformadores con fallas de baja temperatura en aceite mineral

Se identifican 6 zonas y se deben usar solo si se encuentran averías de baja temperatura (T2, T1 y PD). Los elementos usados son etano, hidrogeno y metano.



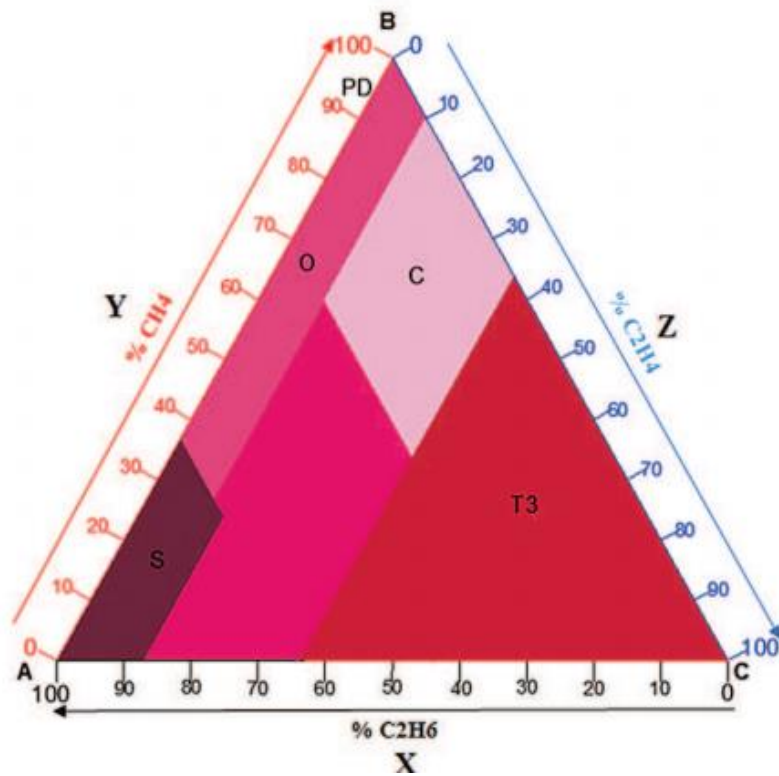
7.4 Triángulo para transformadores con fallas de baja temperatura en aceite mineral

Se identifican 7 zonas y se deben usar solo si se encuentran averías de alta temperatura (T2, T1 y PD). Los elementos usados son etano, etileno y metano.

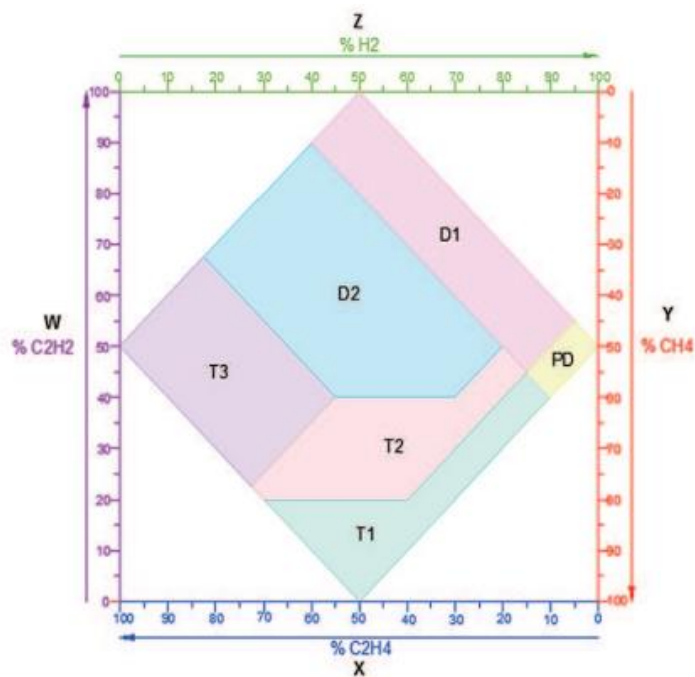


7.5 Triángulo para averías de baja temperatura en aceites FR3

Se identifican 6 zonas y los elementos que utiliza para evaluar las fallas son el acetileno, metano y el etileno.



Como se puede observar, el método del triángulo de Duval realizó aportes muy valiosos al estudio de falla en transformadores y demás elementos. Para finalizar se presenta la última modificación del triángulo. Un punto a destacar es la presencia del hidrogeno junto con acetileno, metano y el etileno para el análisis de falla.



8 ANEXO II – DATOS DE EQUIPOS UTILIZADOS

En el presente anexo se detallan las características de los equipos utilizados para los ensayos del presente trabajo.

Detector de Descarga Parcial DDX-9101

El detector de descargas parciales DDX-9101 de la marca Heafely es el instrumento con el que cuenta el Laboratorio de Alta Tensión para la realización de los ensayos propuestos.

Está diseñado para reemplazar a los detectores analógicos tradicionales. Los costos, la tecnología y la complejidad de las mediciones hacen que estos nuevos sistemas digitales sean óptimos en su trabajo. Estos han sido diseñados para brindar una rápida medición que permita obtener inmediatamente un diagnóstico del elemento que se esté ensayando.



Figura 8-1 Detector de descarga parcial DDX-9101

El sistema tiene tres modos de operación

- Meter mode
- Scope Mode
- Locked Mode

En el Scope Mode, el sistema opera como un amplificador de descarga parcial mostrando en el display la actividad de descarga parcial en una fase. Este modo es usado por operadores expertos para diagnosticar la fuente de descarga dentro de una muestra. Meter Mode proporciona el uso ya sea mostrando medidas digitales o analógicas para el nivel de descarga y el nivel de tensión. Este modo permite al usuario, mediante parámetros definidos, si la muestra ensayada paso o fallo en la prueba. El

Lockerd Mode es una variante del Meter Mode, el cual restringe las acciones de un operador que pueda realizar al menos que posean el código de acceso.

Entre otras características que presenta el equipo, permite ver en pantalla el ancho de banda usado, el modo de escala (automático o manual), el nivel de tensión y el valor obtenido de descarga parcial. También permite ver los parámetros de calibración del instrumento. Además de un indicador luminoso que indica si la muestra paso o no el ensayo, a partir de datos previamente cargados.

Calibrador

Tettex Instruments

Valores

10/100/10³/10⁴

Capacitor de acoplamiento

Tettex Instruments

Tipo 9230/1/200

Capacitancia: 1000 pF

Rated Volt: 200 kV

Test Volt: 240 V

Temp: -10/+50 °C

PD-Level \leq 1 pC

Megohmetro

Kyoritsu

Modelo 3122

Tensión 5kV

Rango 0- 200 G Ω

9 BIBLIOGRAFIA

- [1] Dr. F. H. Kreuger, Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment, Edit. Butterworths, 1989.
- [2] Gabe Paoletti, Alex Golubev, Partial Discharge Theory and Applications to Electrical Systems, Presented at the 1999 IEEE IAS Pulp and Paper Industry Conference in Seattle.
- [3] High-Voltage Test Techniques - Partial Discharge Measurements, IEC 60270.
- [4] Instrument Transformers - Part I: Current Transformers, IEC60044-1, pp. 29-31, 1996.
- [5] Guide for the Measurement of Partial Discharges in AC Electric Machinery, IEEE P1434, October 4, 2010.
- [6] A. Krivda, Automated Recognition of Partial Discharge, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 2, No. 5, October 1995.
- [7] Manual DDX9101 Digital PD detector, Haefely, 2013.
- [8] Guide for the Interpretation of Gases Generated in Oil-Immersed Transformers, IEEE Std C57.104, June 27, 1991.
- [9] Guide to the Interpretation of Dissolved and Free Gases Analysis, IEC 60599.
- [10] Partial Discharge Diagnostics and Electrical Equipment Insulation Condition Assessment. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 12, No. 5, 2005.
- [11] LINEALT. Caracterización de los Mecanismos de Producción de Descargas Parciales Como Indicadores del Grado de Envejecimiento. Universidad Carlos III de Madrid.
- [12] Partial Discharge Theory and Technologies Related to Medium-Voltage Electrical Equipment. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 37, No. 1, 2011.

- [13] Enhancing the Significance of Partial Discharge Measurements. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol.2, No 5. October 1995.
- [14] Partial Discharge. Their mechanism, detection and measurement. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 9, No. 5, 2002.
- [15] Serveron Corporation, Paper DGA Diagnostic Methods.
- [16] Guía de Laboratorio, Transformadores de Distribución y Potencia. Inducor Ingenieria S.A.
- [17] Granero, Andrés. Descargas Parciales en Transformadores Secos Encapsulados.
- [18] Sarria J., Guerrero N, Rivas E., Estado del arte del análisis de gases disueltos en transformadores de potencia, Revista Facultad de Ingeniería 2014.
- [19] Wolfgang Hauschild, Eberhard Lemke, High-Voltage Test and Measuring Techniques Edit. Springer 2014
- [20] Transformadores de tensión y de corriente. Método de medición de descargas parciales. IRAM 2274/1980.
- [21] Transformadores de medición. Parte 1: Transformadores de Corriente. IRAM 2344-1.
- [22] Transformadores de medición. Parte 2: Transformadores de Tensión Inductivos. IRAM 2344-2
- [23] Descargadores de óxido metálico sin explosores para redes de corriente alterna. IRAM 2472.