

PROYECTO FINAL

DETECCIÓN DE DESCARGAS PARCIALES EN TRANSFORMADORES POR EMISIÓN ACÚSTICA

AUTOR:

RETRIVE, GASTÓN ALEJANDRO

FECHA: 20-02-2020

Contenido

1. CAPITULO 1	6
1.1 Introducción	6
1.2 Antecedentes	6
1.3 Descripción del Problema.....	12
1.4 Objetivos	12
1.5 Justificación	13
1.6 Alcances del trabajo.....	13
1.7 Estructura del Proyecto Final.....	14
CAPITULO 2 - Descargas parciales	16
2.1 Introducción	16
2.2 Descargas parciales.....	16
2.2.1 Definición Descargas Parciales	16
2.2.2 Causas o fuentes que dan origen a DPs.....	17
2.2.3 Estudio de las descargas parciales.....	17
2.2.4 Consecuencias de las descargas parciales.....	30
2.3 Tipos de descargas parciales.....	31
2.4 Fuentes de distorsión de descargas parciales.....	32
2.4.1 Efecto de temperatura en aceite	32
2.4.2 Humedad en aceite	35
2.5 Métodos de detección	36
2.5.1 Método EMI	36
2.5.2 Método Eléctrico	36
2.5.3 Método DGA.....	40
2.5.4 Método Acústico	41
2.6 Aplicabilidad de lo estudiado al proyecto.....	41
CAPITULO 3 - Transformadores.....	43
3.1 Fallas comunes en transformadores	43
3.1.1 Introducción	43
3.1.2 Tipos de aceite.....	43
3.1.3 Características del aceite	44
3.1.4 Envejecimiento aceite	46
3.1.5 Degradación de aceite	47
3.1.6 Humedad en aceite	48
3.1.7 Cortocircuito entre bobinas	49
3.1.8 Cortocircuito entre bobina y partes metálicas	51
3.1.9 Fallas de Bushing	51

3.1.10 Fallas del Cambiador de Tomas (TAP).....	55
3.1.11 Fallas del Núcleo.....	58
3.1.12 Falla en el tanque.....	59
3.1.13 Falla en el sistema de protección.....	63
3.1.14 Falla en el sistema de refrigeración.....	64
CAPITULO 4 - Metodología de END de EA	67
4.1 Introducción	67
4.1.2 Señales de Emisión Acústica.....	67
4.1.3 Breve reseña Histórica de Emisión Acústica	68
4.2 Propagación de las ondas elásticas	69
4.2.1 Ondas en un medio infinito isótropo.....	70
4.2.2 Impedancia	71
4.2.3 Presencia de discontinuidades en el medio	71
4.2.4 Atenuación de las ondas	74
4.3 Fuentes de EA.....	75
4.4 Sensores de emisión acústica	76
4.4.1 Tipos de sensores	76
4.4.2 Sensores piezoeléctricos.....	78
4.5 Instrumentación de EA. Sistemas de EA	85
4.5.1 Sensores de EA.....	86
4.5.2 Acoplante	86
4.5.3 Preamplificadores.....	86
4.5.4 Equipo de EA. Amplificador. Parametrizador. Digitalizador.	87
4.5.5 Modelo de la EA a partir de la convolución.....	89
4.5.6 Fuentes de ruido que afectan las mediciones de EA.....	89
4.5.7 Tratamiento del ruido en los ensayos de EA.....	90
4.6 Señales de EA	92
4.6.1 Señales tipo explosión y las señales de tipo continuo.....	92
4.6.2 Estudio de los parámetros	93
4.6.3 Estudio de las formas de onda.....	95
4.6.3.1 Estudio de las formas de onda en el dominio temporal.....	96
4.6.3.2 Estudio de las formas de onda en el dominio de la frecuencia y en el dominio tiempo frecuencia. Análisis espectral	96
4.7 Comparación con otros métodos de medición	97
CAPITULO 5 - Desarrollo en laboratorio – Análisis de ensayos de Calibración.....	100
5.1 Instrumentación utilizada.....	100
5.1.1 Descripción del montaje experimental de la cuba de rigidez dieléctrica.	100

5.1.2 Equipos y cadena de medición de la EA	103
5.1.3 Instrumentación del laboratorio	105
5.1.4 Descripción del aceite aislante ensayado.	106
5.1.5 Seguridad.....	106
5.1.6 Metodología	107
5.2 Ensayos y registros	107
5.2.1 Tareas Previas	107
5.2.2 Ensayo N° 1 - Calibración	112
5.2.3 Ensayo N° 2 - Calibración	115
5.2.4 Ensayo N° 3 - Calibración	117
5.2.5 Ensayo N°4 - Calibración	118
5.2.6 Ensayo N°5 -Calibración	119
CAPITULO 6 - Análisis de Resultados de ensayos bajo norma IEC 156 y ASTM 1816.	123
6.1 Ensayo N°6.....	123
6.2 Cálculo del valor de Rigidez Dieléctrica	124
6.3 Análisis de las señales de EA del sistema.....	126
6.3.1 Discriminación de Ruido base del sistema.....	127
6.3.2 Análisis de la amplitud de la Señal	130
6.3.3 Análisis de duración de la señal de EA	136
6.4 Análisis del espectro de frecuencias de la EA.	142
6.5 Tasa de emisión de señales de EA en función del voltaje	144
CAPITULO 7 - Ensayo mediante EA de uno de los transformadores del laboratorio de Ing. Eléctrica UTN-FRD	147
7.1 Descripción de equipos de medición.....	147
7.2 Memoria de cálculo	149
7.3 Calibración	150
7.4 Procedimiento de ensayo	152
7.5 Análisis de resultados	153
CAPITULO 8 - Tratamiento de Aceite y Medio Ambiente	154
8.1 Introducción	154
8.2 Seguridad Ambiental	154
8.2.1 Recuperación de propiedades físico-químicas y eléctricas del aceite.....	154
8.2.2. Proceso de Tratamiento del residuo	155
8.3 Seguridad Personal	158
8.3.1 Equipo de Protección Personal.....	158
8.3.2 Distancias de Seguridad	159

8.3.3 Colocación de sensores	160
CAPITULO 9 - Estudio de Factibilidad Técnica y Económica	161
9.1 Introducción	161
9.2 Costos de implementación en industria	161
9.2.1 Escenario N°1 Inversión inicial financiada por el departamento de Eléctrica de la Facultad Regional Delta.	162
9.2.2 Escenario 2 Inversión Inicial para Laboratorio de EA de la Facultad Regional Delta	163
9.3 Resultados	163
9.4 Conclusión	164
CAPITULO 10 - Referencias y Bibliografía	168
Procedimientos	170
Planos	179

1. CAPITULO 1

1.1 Introducción

El transformador, en todos sus rangos de operación de tensión eléctrica, es uno de los equipos eléctricos de mayor aplicación en el ámbito laboral. Una falla repentina de estas máquinas puede acarrear graves consecuencias. Debido a esto, resulta necesario asegurar su continuidad operativa, mediante la detección oportuna de fallas incipientes originadas por los esfuerzos mecánicos y térmicos a que se encuentran sometidos en su operación.

En este trabajo se presentan los fundamentos teóricos, se implementa y aplica un método para diagnosticar las condiciones dieléctricas del aislamiento del transformador durante su operación normal, mediante la detección de descargas eléctricas que son precursoras de la ruptura del dieléctrico. Esto se puede realizar mediante la colocación de sensores piezoeléctricos que se adosan a las paredes del transformador y captan las ondas elásticas generadas por las Descargas Parciales [DPs]. Esta metodología de Emisión Acústica [EA] es una técnica de Ensayos No Destructivos [END] que tiene amplia aplicación en ensayos de tipos industriales como por ejemplo la detección de fisuras y fracturas en recipientes a presión, análisis de corrosión en superficies metálicas, detección de fracturas en hormigón y materiales compuestos por fibra de vidrio y fibra de carbono en matriz epoxi. De esta manera se aplicara la técnica de EA en un ensayo normalizado de rigidez dieléctrica en un aislante líquido de manera de monitorear todo el proceso y recolectar las señales características de este proceso de descarga. Una vez caracterizadas estas señales (forma en función del tiempo, frecuencias características, amplitud, rise time, cuentas, etc.), quedan parametrizadas las características que idealmente se deberían buscar en ensayos a plena escala en transformadores de potencia como indicios precursores de falta de aislación, deterioro del estado del aceite aislante u otros defectos que puedan producir este tipo de descarga. Esta técnica a su vez permite el posicionamiento de la fuente emisora de ondas elástica, por lo que no solo se puede detectar el evento sino que mediante triangulación delos tiempo de llegada a los diferentes sensores se puede determinar la posición física de la fuente emisora, en este caso, el lugar físico donde se produce la descarga parcial dentro del transformador. Esto brinda una metodología de ensayos preventiva y predictiva del estado general del transformador y eventualmente de los lugares donde se está sufriendo un deterioro prematuro. Para esto se utiliza un sistema de un sistema de adquisición, digitalización y parametrización de alta velocidad, que conectado a sensores de tipo piezoeléctricos sintonizados en frecuencia y de banda ancha permiten el procesamiento de dichas señales.

1.2 Antecedentes

En la actualidad la tendencia en el diseño y manufactura de equipos eléctricos de potencia es incrementar la capacidad y el tamaño de las unidades, trayendo aparejado un fuerte requerimiento del incremento de confiabilidad de los equipos. La tecnología actual para los aislamientos de alta tensión requiere de modernos procedimientos de prueba, por lo que la detección de descargas parciales es de gran importancia debido a que este fenómeno puede considerarse como predecesor al fenómeno de envejecimiento del sistema aislante de los equipos. A continuación, se presenta un panorama general de la evolución de esta técnica.

Los inicios del reconocimiento de las descargas parciales se remontan al año 1777, durante el cual Lichtenberg vio figuras de polvo semejantes a estrellas y círculos (Fig. 1.1) utilizando el Electrógrafo de Volta. Transcurrieron más de 100 años hasta que se aclaró que las figuras de polvo representaban descargas en superficie eléctricas [1].

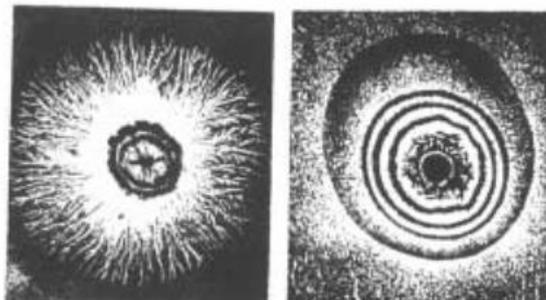


Fig. 1.1 Figura de polvo producido por descargas parciales superficiales bajo polaridad positiva y negativa del voltaje aplicado

En 1873 Maxwell publicó su “tratado de Electricidad y magnetismo”, trabajo de relevancia para la detección de descargas parciales y desarrollo de modelos físicos para la explicación del fenómeno [2].

En 1896 Hertz demostró la hipótesis de Maxwell de ondas electromagnéticas y su propagación en el espacio y tiempo. Su experimento puede ser considerado como la primera aplicación del modo de acoplamiento de campo inductivo utilizado actualmente por algunos equipos comerciales de detección de descargas parciales [3].

Estos métodos tuvieron la mayor importancia técnica en las primeras décadas del siglo XX, forzados por la práctica aplicación de la energía eléctrica y los equipos de alta tensión recientemente desarrollados para la generación, transmisión y distribución de electricidad.

El primer instrumento de medición utilizado para la detección eléctrica de descargas parciales fue el puente de factor de pérdidas aplicado por Schering, desarrollado en 1919 [4] y aplicado en 1924 (Fig. 1.2).

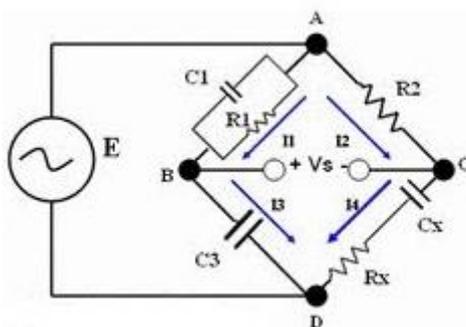


Fig. 1.2 Puente de Schering

Este tipo de puente está dirigido especialmente a mediciones en alta tensión. Su objetivo es la determinación del factor de pérdidas y no la capacidad de elementos aislantes de alta tensión, debido a que la degradación de un aislante supone un gran riesgo para la seguridad de las personas y de las instalaciones, y dicha degradación se manifiesta en un aumento anormal del factor de pérdidas. Su funcionamiento se basa en un equilibrio de las ramas del puente, obteniendo así, relaciones matemáticas de tensión y corrientes que permiten calcular las variables que se desean hallar R_x y C_x .

En 1925 Schwaiger reconoce las características de radio frecuencia de las descargas corona [5]. Este hallazgo puede considerarse como la base para la introducción de medidores de interferencia de radio para la evaluación del nivel de ruido de las descargas corona. Esta prueba todavía se utiliza ampliamente, especialmente en

América del Norte. En Alemania, este tipo de instrumento fue utilizado por primera vez por Dennhard en 1937 [6].

Un progreso muy importante en la detección de descargas parciales fue la aparición del osciloscopio de rayos catódicos. En 1928 Lloyd y Starr utilizaron un tubo de Braun para desplegar eventos de descargas parciales [7]. En dicho tubo, los electrones se aceleraban rápidamente hacia el ánodo debido a la acción de un campo eléctrico fuerte. Un pequeño orificio en el ánodo permitía que ciertos electrones pasen a lo largo del eje del tubo en un haz estrecho. Este rayo de partículas catódicas, que posteriormente pasaba entre dos pares de placas metálicas sobre las cuales se pueden imprimir voltajes, podía desviarse de su curso normal mediante campos electrostáticos o electromagnéticos transversales, o mediante una combinación de ambos, y de ese modo trazaba figuras definidas en la pantalla fluorescente que se volvían luminosa en el punto en que los electrones chocan.

Aquí mismo, un par se sometió a la tensión de prueba instantánea, mientras que el otro par se conectó a un condensador, utilizado para la acumulación de la carga corona generada. Este enfoque temprano, llamado método de paralelogramo, permitió una excelente medición de banda ancha de descargas de corona en arreglos de planos de alambre, utilizado para la simulación de líneas de transmisión aérea de AT.

En 1928, Byrstlyn introdujo un circuito equivalente simple para la evaluación de las pérdidas por descargas parcial bajo estrés de la corriente alterna [8]. Su enfoque "Brecha de chispa con precondensador" ha sido sistemáticamente investigado por Gemant y Philippoff mediante técnicas oscilográficas en 1932 [9]. De esta manera, podrían explicar la secuencia de eventos de descarga por ciclo de la tensión de CA aplicada. Cabe señalar que este método denominado método del paralelogramo puede considerarse como el predecesor del puente integrador, utilizado por Dakin y Malinaric en 1960 [10]. En conclusión a Dakin y Malinaric, el diseño del puente probado por ellos obtuvo una medida de control y calidad más precisa que el puente utilizado por Schering para estimar huecos internos dentro de las estructuras del aislamiento.

Esta herramienta también se aplica en la actualidad, en particular para los estudios físicos de DP a través de osciloscopios y figuras de Lissajous, como se informa en [11].

Un progreso esencial en el desarrollo de detectores sensibles de descargas parciales (DP), se logró debido a la aplicación de amplificadores de banda angosta tal como reporto Arman y Starr en 1936 [12]. Anteriormente, en 1931, investigadores de la época ya habían comenzado a trabajar en el problema de detección de ionización en aislantes. El primer intento empleó un puente con un galvanómetro de vibración que indicaba el equilibrio de la corriente de suministro (Fig. 1.3). El galvanómetro se conectó a través del secundario de un transformador apantallado seguido por un amplificador-detector. Se consideraba que la lectura del microamperímetro (μA) daba alguna indicación de la ionización. Esta disposición del puente estaba destinada a dar un alto sensibilidad a las corrientes de alta frecuencia y lograr el objetivo, pero luego fue abandonado debido a la dificultad de conseguir el equilibrio de corriente.

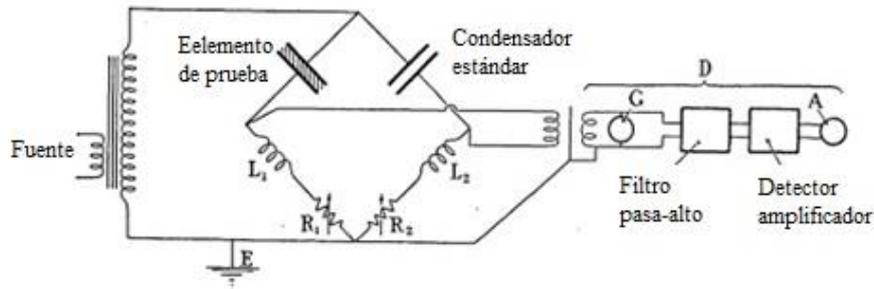


Fig. 1.3 Puente con galvanómetro

En 1954 se tuvo comercialmente el primer detector portátil de DPs diseñado por Mole [13]. Las características básicas de los calibradores de DPs también fueron presentadas por él en 1970 [14]. En este último, se cita que la precisión de medición de la magnitud de (en este caso de descarga parcial por efecto corona) dependen del uso de calibradores acoplados directamente en el circuito de prueba. La respuesta observada en la salida del detector de corona puede variar de manera no lineal con la amplitud del efecto corona que se mide, y casi siempre tienen una forma de onda bastante diferente al del transitorio del efecto corona. Por lo tanto, la mejor manera de medir la magnitud del efecto corona es comparar la respuesta con la respuesta a un calibrador que genera un transitorio que tiene una magnitud y una misma forma de onda que el propio efecto.

La fiabilidad de la medición depende del calibrador, y todos los calibradores deben cumplir con la misma especificación básica por si se obtienen resultados no comparables cuando se usan diferentes detectores de efecto corona.

En 1966, Bailey estimó la duración de los pulsos de origen DPs en cavidades de dieléctricos sólidos tan cortos como algunos nanosegundos [15]. En sus estudios prestó principal atención a métodos utilizados para medir descargas parciales en huecos, especialmente para huecos en cables (Fig. 1.4), tema que ya había estudiado Mason, y también había sido cubierto en un libro de Kreuger. En sus experimentos logró el desarrollo de una muestra conveniente para el estudio de descargas en huecos y aclaró que la misma puede estar hecha de cualquier aislamiento moldeable y también estar en láminas delgadas.

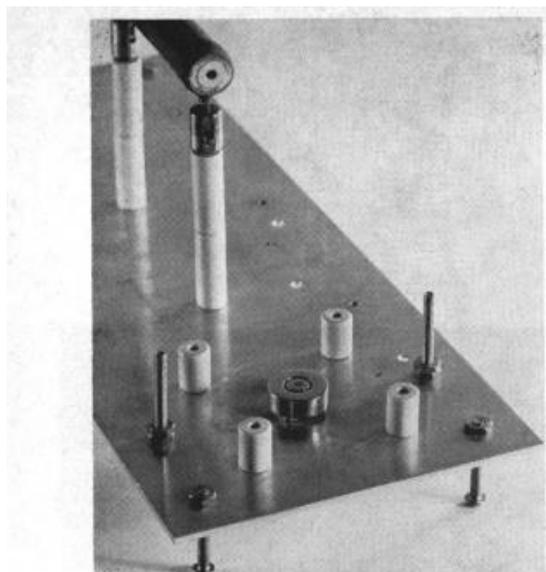


Fig. 1.4 Descarga interna en aislación de cable. Bailey [16].

Posteriormente, la duración de los pulsos de origen DP en cavidades de dieléctricos sólidos tan cortos como algunos nanosegundos tal como estimó Bailey fue confirmada por mediciones realizadas por Fujimoto y Boggs en 1981 [16] y por Boggs y Stone en 1982, aplicando la técnica de osciloscopio de alta velocidad de hasta 1 GHz de ancho de banda [17].

Entre 1968 y 1972 Hideo Okamoto, Kenji Horri y Junji Tomiyama realizaron varias pruebas de descarga parcial para tres prototipos de transformadores de 500 kV, y en 1973, Hideo Okamoto reportó la supresión de ruido en el caso de pruebas de DPs en transformadores de 500 kV [18].

En 1975 Black presentó un sistema para la discriminación de pulsos para la detección de descargas parciales en ambientes ruidosos. El uso de técnicas de filtrado y detección puede resultar muy costoso o poco práctico, especialmente cuando se realizan mediciones en componentes grandes en el campo. Por esta razón, Black consideró que podría ser ventajoso vivir con los pulsos de interferencia y clasificarlos a medida que ocurren. Se considera de importancia este sistema ya que genera un gran ahorro económico en estudios de DPs. En dicho sistema de discriminación de pulsos (Fig. 1.5) se observa un circuito de prueba de alto voltaje con dos condensadores (C_A y C_B) en serie con unidades de medida idénticas. Un condensador es el componente de prueba y el otro es un segundo componente de prueba o condensador de acoplamiento que no necesariamente tiene que estar exento de descargas parciales. La salida de cada uno de estos se alimenta a través del amplificador principal en una unidad de detección de polaridad de pulso. Esto genera una señal que indica la polaridad de cada pulso. Las salidas de los detectores de polaridad se comparan en una unidad de discriminación de pulsos, que permite determinar el alma de un pulso particular. Si las polaridades de los pulsos son coincidentes es el mismo en cada canal, entonces los pulsos son externos a C_A y C_B . Por otro lado, si son de polaridad opuesta, el alma de los pulsos está dentro de C_A o C_B [19]. Por lo tanto, el sistema de discriminación de pulsos puede realizar mediciones de descargas parciales en presencia de interferencia externa siempre y cuando se encuentre dentro de un ancho de banda determinado.

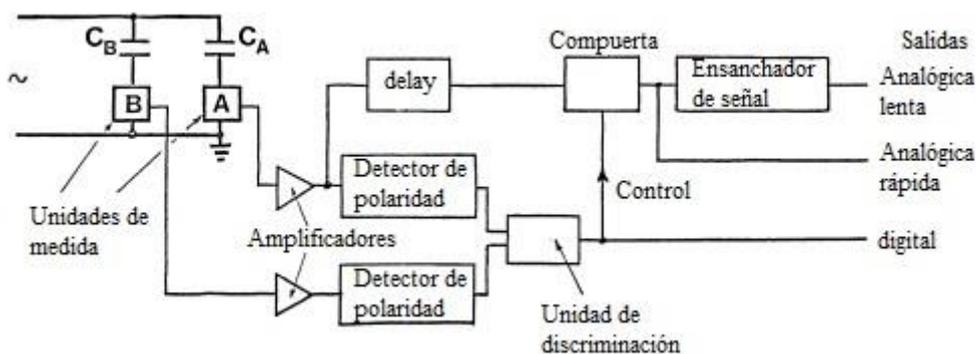


Fig. 1.5 Sistema de discriminación de pulsos

Los detectores de DPs disponibles comercialmente en la década de 1980 usaban solo una banda de frecuencia de medición por debajo de 1 MHz. Uno de los primeros detectores de DPs de banda ancha disponibles comercialmente fue desarrollado por el Dr. Lemke. El principio de medición aplicado se basó en una integración activa (electrónica) de los pulsos DPs preamplificados de banda ancha. La frecuencia de corte superior del preamplificador de banda ancha fue de aproximadamente 10 MHz. Bajo esta condición, los eventos de DP no solo podía detectarse sino también localizarse, como se informó en [20].

Tanto en ensayos de laboratorio como en ensayos de campo, la mayor evolución se ha producido sin duda en el apartado de la medida y los sistemas de adquisición. Mientras que en los años 70 era difícil conseguir osciloscopios analógicos de velocidades de muestreo del orden de decenas de MHz, hoy en día los modernos osciloscopios digitales superan con creces la barrera de las centenas de MHz con resoluciones verticales de 12bits. Las limitaciones técnicas en los sistemas de adquisición de los primeros equipos de medida de descargas parciales definieron las características de los primeros sistemas de medida analógicos de DPs. Los equipos antiguos, empleaban medidores de valor pico para calcular indirectamente el valor de la carga de los pulsos de descargas parciales a través de filtros pasabanda con comportamiento de filtros pseudo-integradores. Los pulsos cortos de DPs se convierten a la salida del filtro en pulsos mucho más largos cuyo valor de pico es aproximadamente proporcional a la carga del pulso. El filtro pseudo-integrador distorsiona la forma de los pulsos aumentando su duración y en consecuencia disminuyendo su frecuencia, lo que permite emplear medidores de pico con constantes de tiempo relativamente lentas. A este método de medida se le denomina método convencional. Hoy en día, gracias a los modernos equipos disponibles, a los nuevos materiales, y las nuevas tecnologías electrónicas, es posible medir los pulsos de descargas parciales con mayor precisión, reproduciendo casi totalmente la forma de onda de los pulsos de descargas parciales. Este hecho permite emplear nuevas técnicas matemáticas de análisis de la carga, de identificación de descargas parciales y de localización de pulsos en todo tipo de sistemas. Todas estas técnicas modernas, que emplean sensores de gran ancho de banda y altas velocidades de muestreo para digitalizar los pulsos de descargas parciales se incluyen en los llamados métodos no convencionales. No obstante, hoy en día coexisten los métodos convencionales y los no convencionales, siendo los convencionales los reflejados en las normativas internacionales y los empleados por los laboratorios acreditados. Se concluye que un conocimiento adecuado del comportamiento de las descargas parciales en un aislante es muy ventajoso a la hora de determinar su vida útil, y por ello, se han desarrollado e implementado nuevas tecnologías rápidamente para la detección de las mismas con técnicas digitales y de ultrasonidos.

- Desarrollo de Normas aplicables al control de descargas parciales en transformadores
El primer estándar para la detección de descargas parciales (DPs) en aparatos de alto voltaje fue emitido en 1940 por la Asociación Nacional de Fabricantes Eléctricos (NEMA) [21] que se refiere a "Métodos de medición de ruido de radio". La publicación 107 de NEMA "Métodos de medición de voltaje de influencia (RIV) de aparatos de alto voltaje", editado en 1964, fue una revisión extensa de la publicación anterior [22]. Las primeras experiencias prácticas con el método RIV revelaron que además de las descargas de corona encendidas en los electrodos de HV en el aire ambiente, también se podían reconocer las descargas internas en dieléctricos sólidos y líquidos. Por lo tanto, el Comité Internacional Especial de Perturbación Radioeléctrica (CISPR) introdujo un método equivalente para medir los voltajes de interferencia de radio en Europa en 1961 [23 y 24].

La primera edición de la Publicación 270 de IEC apareció en 1968 [25]. Además de la definición de la carga aparente, así como el voltaje de inicio y extinción de DPs, se introdujeron varias otras cantidades, como la tasa de repetición, la energía y la potencia de los pulsos de DPs. Además, se especificaron reglas para la calibración de la carga aparente y se presentaron pautas para la identificación de las fuentes de DP más típicas utilizando un osciloscopio para mostrar secuencias de pulso de DPs resueltas en fase a lo largo de cada ciclo de CA en comparación con la base de tiempo lineal o elíptico.

La segunda edición de la Publicación 270 de IEC apareció en 1981 [26]. Este documento fue solo una pequeña revisión del primer número. Sin embargo, contenía más detalles sobre el procedimiento de calibración. Además, se introdujo la cantidad de DPs "la mayor carga aparente que ocurre repetidamente". Desde ese momento, las mediciones eléctricas de DPs se han demostrado como una herramienta indispensable para rastrear las imperfecciones dieléctricas, que pueden ser causadas por un trabajo de ensamblaje deficiente o por fallas de diseño del aparato de AT y MT. Por lo tanto, el aumento de los requisitos de calidad para los sistemas modernos de aislamiento de AT y MT, así como la mejora de la intensidad del campo eléctrico y, por último, la ampliación deseada de la vida útil de los equipos de AT y MT requieren no solo una detección temprana de defectos graves de DPs, sino también reproducibles y comparables resultados de la prueba. Como consecuencia, la tercera publicación de IEC 60270 [27] publicada en 2000 revisó ampliamente la segunda edición de 1981. El estándar actual cubre la instrumentación analógica convencional, instrumentos digitales para la adquisición de datos, y análisis más complejos de los datos capturados de DPs. Adicionalmente se consideran los problemas específicos que surgen para las pruebas DPs bajo voltajes de CC o voltajes de CA y CC superpuestos. Se agrega una cláusula sobre el mantenimiento de las características de los sistemas de medición de DPs y los calibradores de DPs, donde el "Registro de rendimiento " debe incluir no solo información sobre las características nominales de la instalación de medición de DPs, sino también los resultados de tipo, rutina y rendimiento pruebas y resultados de comprobaciones de rendimiento.

Actualmente existe la norma estándar IEC 62478 [28], que cubre los métodos de detección de DPs electromagnéticos y acústicos no convencionales.

1.3 Descripción del Problema.

El fenómeno de descargas parciales, es un factor presente en las fallas de equipos eléctricos. La presencia de un alto nivel de descargas parciales en equipos eléctricos es una indicación de la existencia de un problema en el sistema aislante, que puede evolucionar en una falla que eventualmente saque de servicio el componente. Su detección temprana resulta importante para determinar el estado de los equipos eléctricos, reducir costos de mantenimiento, acortar tiempos de paradas programadas, prolongar la vida útil del equipo y disminuir las paradas imprevistas o de emergencia.

Actualmente el rango de frecuencias de medición normalizado mediante la metodología de EA para DPs se encuentra entre 20 kHz y 500 kHz (Ver adjunta Norma IEC 60270). Si bien puede darse la aparición de frentes de ondas en el orden de los nanos segundos, equivalentes a frecuencias cercanas a los GHz, sería necesario un detector de ondas electromagnéticas para contemplarlo, excediendo así el sistema no normalizado y ampliando de este modo el espectro analizado.

1.4 Objetivos

El objetivo del presente proyecto se basa en evaluar las descargas tipo corona y la ruptura final de un dieléctrico mediante el ensayo de rigidez dieléctrica en aislantes líquidos (contaminados y sin contaminar) y el monitoreo de este proceso mediante la técnica de emisión acústica.

Para lograr este objetivo se deberá cumplimentar con los objetivos particulares detallados a continuación.

- Análisis bibliográfico y teórico de los principios físicos involucrados

- Realización de ensayos normalizados de rigidez dieléctrica (construcción de cuba según norma, evaluación de diferentes calidades de aceites según procedimiento normalizado)
- Aplicación de la metodología de Emisión Acústica.
- Adquisición, digitalización y procesamiento de las señales precursoras de de ruptura de dieléctrico producidas durante el ensayo de rigidez dieléctrica.
- Evaluación y análisis de resultados.

1.5 Justificación

El objetivo de un sistema eléctrico de potencia es suministrar energía eléctrica de forma ininterrumpida a los usuarios (industrias, sector público, hogares, etc.), así como ofrecer calidad en el servicio eléctrico. Por esta razón, debe existir un monitoreo constante y adecuado en cada uno de los equipos que conforman el sistema eléctrico de potencia en los diferentes niveles de tensión, generación, transmisión y distribución. Algunos de estos equipos son generadores, transformadores, líneas, subestaciones, etc.

Los transformadores son componentes de suma importancia para el sistema eléctrico en los diferentes niveles de tensión, razón principal por la cual en los grandes centros industriales la operación confiable de los mismos es indispensable para mantener sin interrupciones el servicio de energía. Sin embargo, el ciclo de vida de un transformador está directamente relacionado con su sistema de aislamiento, la cual por su propia naturaleza sufre un desgaste natural, y aunado a esto existen condiciones externas como son los cambios continuos de cargas, conmutación de bancos de capacitores cercanos al transformador, maniobras programadas por los operadores y condiciones ambientales bajo las cuales está operando.

Por consiguiente, las condiciones del sistema de aislamiento del transformador dependerán directamente de los niveles de estrés, eléctrico, mecánico, térmico y químico, al cual estén operando. No obstante, si el sistema de aislamiento sufre de un nivel de estrés muy elevado, es muy probable que se presenten altos niveles de descargas parciales (DPs) y fallas en los aislamientos que conllevan altas repercusiones. La vida útil esperada de estas máquinas varía de 25 a 40 años dependiendo de su carga, factores de operación y mantenimiento.

Por lo tanto, una forma exitosa de evitar grandes inversiones para mantener operando transformadores de gran potencia es recurrir a un esquema de mantenimiento predictivo, que permita detectar las fallas antes de que estas presenten un peligro serio para la operación del equipo. Para poder desarrollar un mantenimiento predictivo se requiere conocer los principales factores que afectan la operación de los transformadores, siendo las descargas parciales unos de los más importantes por ende donde centraremos a nuestro estudio.

Las descargas parciales son un factor recurrente en las fallas de equipos eléctricos. El efecto perjudicial de la descarga parcial es ya conocido a través de la historia por lo que en los transformadores de gran tamaño se las considera en el periodo de diseño de los mismos

1.6 Alcances del trabajo

Plantear los fundamentos teóricos de la generación y detección de DP en medios líquidos que producen un deterioro del sistema de aislación de un transformador.

Realizar la caracterización de rigidez dieléctrica en aceites con y sin contaminantes sólidos.

Determinar mediante la técnica de EA las emisiones precursoras de ruptura de dieléctrico y proveer su caracterización en tiempo, frecuencia y otros parámetros representativos.

Proveer al departamento de Ingeniería Eléctrica de un procedimiento y elementos (cuba de ensayos normalizados) para la realización de ensayos de rigidez dieléctrica en aceites.

1.7 Estructura del Proyecto Final

El presente proyecto está estructurado en capítulos cuyo contenido se describe brevemente a continuación:

Capítulo 1: Introducción

En este capítulo se presenta la descripción del trabajo, así como una extensa revisión bibliográfica.

Además, establece los principales puntos de interés que se abordan en la investigación.

Capítulo 2: Descargas parciales

Aquí se introducen los conceptos básicos que describen la problemática asociada con la investigación, principalmente los parámetros que definen la cantidad de descargas parciales, y su clasificación de acuerdo al defecto que las ocasionan. A su vez, se explica el fenómeno existente en gases, sólidos y líquidos y se mencionan los distintos métodos existentes de medición de DPs, con sus correspondientes ventajas y desventajas.

Capítulo 3: Fallas comunes en transformadores

Con el propósito de mostrar la importancia de un equipo, en este capítulo se muestran los distintos tipos de fallas que pueden ocasionarse por el no correspondiente mantenimiento preventivo del mismo.

Capítulo 4: Metodología de END de EA

Aquí se describen los conceptos básicos que describen la señales de Emisión Acústica, así como los tipos de sensores con su respectivas características de utilización y rangos de frecuencia para los cuales han sido validados, e instrumentación utilizadas para mediciones de Emisión Acústica.

Capítulo 5: Desarrollo en laboratorio - Análisis de ensayos de calibración

Este capítulo se enfoca en los ensayos previos de calibración que se realizaron en la cuba experimental con la finalidad de armar un procedimiento y realizar los ensayos de manera correcta.

Capítulo 6: Análisis de resultados de ensayos bajo norma

En este capítulo se realiza el método experimental con una cuba y un equipo de rigidez dieléctrica para provocar intencionalmente una chispa en el aceite aislante utilizado y detectarla a través de un sensor piezoeléctrico diferencial. La señal obtenida se procesa y se analiza en diferentes aspectos para determinar las características de cada forma de onda.

Capítulo 7: Ensayo de transformador de laboratorio de eléctrica

Aquí se pretende realizar un ensayo en un transformador real del laboratorio de eléctrica para determinar el estado del dieléctrico y aplicar la cadena de medición de EA estudiada en capítulos anteriores.

Capítulo 8: Tratamientos de aceite y Medio ambiente

En este capítulo se trata de conocer los efectos nocivos que provocan el aceite al medio ambiente, los tratamientos que se realizan al mismo, y la metodología de su reemplazo por un nuevo.

Capítulo 9: Estudio de factibilidad

Se pretende por medio de este capítulo, hacer un relevamiento de los transformadores de las industrias en Zarate- Campana y alrededores, y realizar un análisis técnico-económico para determinar la factibilidad y viabilidad del proyecto.

Capítulo 10: Referencias

Se mencionan las referencias de los libros, papers, y trabajos previos que se debieron leer y entender para realizar este proyecto.

CAPITULO 2 - Descargas parciales

2.1 Introducción

Desde hace tiempo, la evaluación de la calidad o estado de un aislamiento se ha basado en la medición de su factor de pérdidas dieléctricas. A causa de la aparición de los aislantes de material sintético con un factor de pérdidas dieléctricas muy bajo, la medición del nivel de descargas parciales es un buen complemento e incluso en determinados casos es una buena alternativa a la medición del factor de pérdidas dieléctricas ($\text{tg } \delta$). La medición del factor de pérdidas dieléctricas continúa siendo útil en lo que se refiere al control de calidad en la fabricación de los materiales utilizados como materia prima para el aislamiento de los elementos eléctricos.

Para la evaluación de la calidad o el estado de aislamiento de elementos ya fabricados (producto final) y/o en servicio, la medición de las descargas parciales resulta más ventajosa porque hay mayores posibilidades de localizar defectos o anomalías en puntos o zonas concretas (defectos discretos). Por lo tanto, permite poner en evidencia puntos débiles que hayan aparecido después de la fabricación, defectos de montaje o exigencias de operación. Al igual que la medición del factor de pérdidas dieléctricas, la medida del nivel de DPs tiene como objetivo la estimación de la vida útil probable de los elementos y/o equipos en lo que se refiere a su aislamiento. A pesar de que las técnicas actuales de medición de las descargas parciales no proporcionan parámetros cuantitativos de la vida útil esperada, aportan datos cualitativos muy útiles sobre el estado de los aislamientos. Esto permite la detección precoz de eventuales fallos o puntos débiles, a través de la complementación de los mismos con los valores de campo magnético, vibraciones y evolución del fluido aislante.

2.2 Descargas parciales

2.2.1 Definición Descargas Parciales

Según Norma IEC 60270 las descargas parciales son en general una consecuencia de las concentraciones de estrés eléctrico local en el aislamiento o en la superficie del aislamiento (ver figura 2.1). Generalmente, estas descargas aparecen como pulsos con duraciones inferiores a $1 \mu\text{s}$ (microsegundo). Usualmente, las mismas vienen acompañadas de ruido, calor, luz y reacciones químicas.

Las DPs pueden producirse en los medios aislantes gaseosos, líquidos y sólidos sometidos a grandes campos eléctricos. Estas pueden deberse a vacíos, grietas, inclusiones dentro de un dieléctrico sólido, interconexiones dentro de dieléctricos sólidos o líquidos, burbujas dentro de dieléctricos líquidos o a lo largo de la línea de contacto entre distintos materiales de aislamiento, etc.



Figura 2.1

2.2.2 Causas o fuentes que dan origen a DPs

La degradación natural del sistema de aislamiento en un transformador de potencia, puede dar origen a pequeñas cavidades en el aislamiento. Estas cavidades pueden ser capaces de desarrollar una diferencia de potencial en donde el campo eléctrico excede la RD del sistema de aislamiento y que como consecuencia originará DPs. Esto significa que el ciclo de vida del transformador tiende a disminuir, ya que éste depende en gran medida de la salud dieléctrica del sistema de aislamiento.

A continuación se detallan cuatro tipos de estrés que afectan la salud dieléctrica del sistema de aislamiento en un transformador, y pueden ser las fuentes o causas que dan origen a las DPs.

Tabla 2.1 Causas de descargas parciales

Tipos de estrés	Detalle
Eléctrico	Asociado a cambios repentinos en el campo eléctrico.
Mecánico	Ligado a la resistencia mecánica, la cual influye en la torsión y compresión del material aislante.
Químico	Involucra el entorno al que está sujeto el aislante, por ejemplo, la corrosión química, la humedad, radiación, etc.
Térmico	Influencia de la temperatura ambiente máxima y mínima de trabajo, así como la máxima permitida para su adecuado funcionamiento.

Los diferentes tipos de estrés pueden estar o no ligados entre sí, y estos provocan desgastes irreversibles en los sistemas de aislamiento. Por consiguiente, si alguno de los diferentes tipos provoca un desgaste significativo en el sistema de aislamiento del transformador o incluso cuando el equipo este expuesto a grandes niveles de estrés, el campo eléctrico a través de su superficie puede llegar a ser mayor que la constante de rigidez dieléctrica del material aislante y por lo tanto se dará la ruptura dieléctrica, que a su vez da origen a la presencia de DPs. Además, las DPs generan un deterioro progresivo mayor en los sistemas de aislamiento de los equipos eléctricos que el generado en condiciones normales sin la presencia de DPs (particularmente en los devanados y en el aceite mineral).

2.2.3 Estudio de las descargas parciales

La actividad de DPs ocurre en regiones en las que se encuentra parcialmente una fase gaseosa. Estas regiones pueden corresponder, por ejemplo, a oclusiones en sólidos o "burbujas" formadas por vaporización de un líquido. El fenómeno de DPs que ocurre alrededor de los conductores cuando los mismos están sometidos a elevadas tensiones se conoce como corona.

Debe enfatizarse que la presencia de la fase gaseosa es un requisito asumido para la formación de DPs. Si bien se encuentra que la DP ocurre en líquidos, se supone que la formación de un canal ionizado asociado con la descarga eléctrica requiere que el líquido se vaporice primero, es decir, que se formen cavidades gaseosas. Las DPs que supuestamente ocurren en aislamiento sólido, se desarrollan dentro de huecos o grietas que contienen gas o a lo largo de las superficies en las interfaces de gas-sólido. La actividad de DP en cables aislados con materiales poliméricos a menudo se asocia con ramificaciones formadas durante el proceso de envejecimiento. Estas ramificaciones

están compuestos de microcanales que contienen gas o de material de baja densidad que se puede vaporizar fácilmente, como por ejemplo agua.

Otra condición necesaria para la formación de DPs es tener una relación de campo eléctrico [E] - densidad de número de gas [N] mayor que el valor crítico $[E/N]_c$, lo cual hace posible que la velocidad de ionización de las moléculas de gas se acrecienten espacial y temporalmente. Esto quiere decir que puede producirse un rápido aumento de conductividad si se cumple dicha condición, lo que eventualmente conducirá a una formación de una descarga, arco, o algún proceso de ruptura dieléctrica al inyectar un “electrón de iniciación” en el recinto [29]. Dicho electrón podría, por ejemplo, resultar de la emisión de campo eléctrico en una superficie si la intensidad del mismo en dicha superficie es suficientemente alta, o de la ionización de moléculas de gas por radiación externa, etc.

2.3.3.1 Estudio del fenómeno estocástico de descargas parciales.

Hasta hace pocos años, la manera tradicional de analizar las DPs consistía en averiguar cuál era el nivel mínimo de campo eléctrico que empezaba a provocar las descargas y/o en encontrar el valor medio de dichas descargas, medidas en picoculombios. Esta manera de realizar el estudio era básica, ya que solo proporcionaba una o dos medidas junto con las condiciones en que se realizaban los ensayos. Una vez obtenidos estos informes se intentaba predecir el nivel medio de DPs para un determinado campo.

Aún no se han encontrado teorías exactas de las medidas de descargas parciales, ya que se considera que los pulsos del fenómeno son inherentemente estocásticos, debido a la variabilidad estadística de sus propiedades, como la forma del pulso, amplitud y frecuencia de ocurrencia [30].

Las variables aleatorias como la amplitud y frecuencia de los pulsos descritos en el proceso pueden ser definidas por una distribución de probabilidad de un ancho determinado. Por tanto, una base física del comportamiento estocástico del fenómeno de DPs puede ser medida y analizada apropiadamente de forma probabilística pero no el fenómeno en sí, es decir, se pueden predecir o estimar algunos comportamientos de las descargas a través de diversas funciones de probabilidades, pero aun así, el fenómeno seguirá siendo aleatorio.

El carácter estocástico de las descargas parciales reside en la naturaleza de la iniciación y crecimiento de la descarga. Por ejemplo, un fotón o una emisión de electrones inducida por el campo eléctrico en una superficie puede iniciar una descarga en un proceso que solo estaría definido de forma probabilística mediante estudios cuánticos. El choque entre un electrón y una molécula que provoca y determina el proceso de DPs también están descritos en términos de probabilidades.

En la siguiente tabla se resumen algunos de los principales factores que pueden inferir en el comportamiento estocástico de las DPs:

Tabla 2.2 Factores que afectan las descargas parciales

Factores	Modo de influencia
Probabilidad de inyección de un electrón inicial como función del campo eléctrico aplicado.	Un electrón libre bajo las condiciones necesarias del proceso de descarga parcial iniciara la misma.
La dinámica de la carga de una superficie dieléctrica.	Liberación de electrón desde la superficie.
La tasa de crecimiento de una descarga	Mayor cantidad de electrones en dicha

inducida en una cavidad en líquidos.	cavidad.
La tasa de espacio ionizado generado por la descarga.	Mayor tasa de ionización se traduce en mayor probabilidad de descarga.
Fluctuaciones en la densidad y composición del gas.	Al fluctuar la composición/densidad del gas fluctúa la energía cinética de las moléculas variando la probabilidad de inicio de descarga
Presencia de radiaciones ionizantes	Presencia de electrones libres en el ambiente.
Efecto de memoria en el material debido a posibles DPs anteriores.	Mayor probabilidad de iniciar descargas.

Estos factores no son independientes entre sí, por ejemplo, la probabilidad de iniciación de la descarga viene influenciada por la presencia de espacios ionizados, por superficies cargadas de anteriores descargas, etc. La existencia de efectos de memoria, es decir, la existencia de descargas previas, determina que el proceso de DPs es no Markoviano. Esto es un proceso que está influenciado por DPs previas que es difícil de medir mediante modelos de teorías.

- Proceso de Ionización de una molécula de gas

El proceso de ionización de una molécula de gas, puede darse por las colisiones de los electrones con las moléculas de dicho gas. Estos pueden expresarse como:

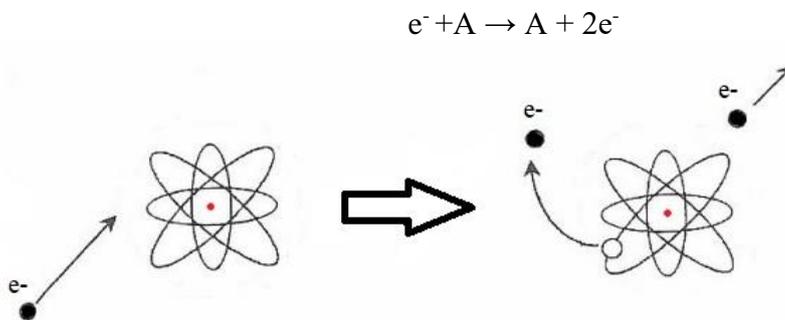


Fig. 2.2 Esquema de Ionización

Esto quiere decir que al introducir un electrón en el espacio entre los electrodos, y bajo la acción de un campo eléctrico externo producto de una diferencia de potencial, el e^- se acelera ganando energía cinética y colisionando con las moléculas neutras del medio (en la ecuación de la figura 2.2 denominado con la letra A).

Se pueden dar 3 tipos de colisiones a saber: las elásticas; las inelásticas y las superelásticas [31]:

- Colisiones elásticas

Los electrones chocan con las moléculas neutras, se conserva el momento redistribuyéndose entre las partículas, y la energía cinética total del sistema permanece invariante.



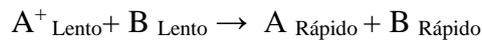
- Colisiones inelásticas

Cuando los electrones chocan con las moléculas neutras, se conserva el momento redistribuyéndose entre las partículas pero parte de la energía cinética inicial se transforma en energía interna en una o más moléculas, creándose iones excitados como se ve en la siguiente expresión:



- Colisiones superelásticas

Cuando los electrones chocan con las moléculas neutras, el momento es conservado pero la energía interna de una molécula se transforma en energía cinética.



En el presente proyecto, se hará hincapié en las colisiones inelásticas que son las encargadas de producir la avalancha de electrones que comenzará el proceso de descarga. En todos los casos de colisión, se dependerá de la energía que tenga cada electrón que a su vez, depende de la función de distribución de energía de los electrones. Esto quiere decir que existirá una fracción significativa de los electrones que tendrán una energía por debajo del promedio y otra porción que tendrá energías superiores. En la figura 2.3 se muestra una función de distribución gaussiana como las que se observan en las amplitudes de DPs.

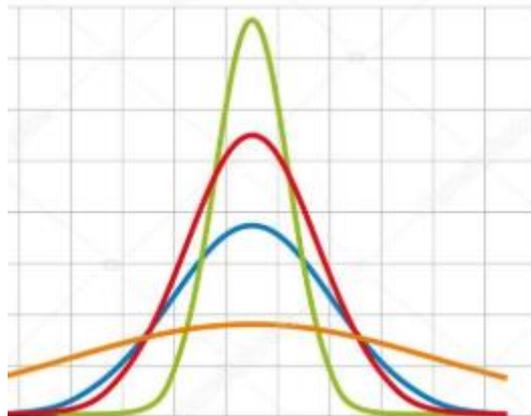


Fig. 2.3 Función de distribución de amplitud Gaussiana

Las distribuciones gaussianas se pueden observar en cada hemicycleo de CA en los procesos de descargas parciales. Una distribución gaussiana representa un promedio de todos los valores de un sistema (en este caso energía de electrones). En esta distribución, se calcula la desviación estándar, se la multiplica por 3, y se la resta al valor medio a ambos lados del centro de la figura obteniendo un intervalo en el que el 96% de los valores estarán presentes.

Algunos de los electrones que poseen una energía por encima del promedio pueden llegar a valores similares a 10 eV [30]. Estos electrones de energía relativamente alta pueden romper o alterar enlaces moleculares al impactar con una superficie, ya que las fuerzas de enlace son típicamente <10 eV, por ejemplo, 3.5 eV para enlaces C-H y 6.2 eV para enlaces C = C. Por supuesto, la producción de radiación ultravioleta y especies reactivas como OH, O y O₃ por impacto de electrones en la descarga puede, en algunas circunstancias, conducir a transformaciones químicas en el aislamiento. Estas

transformaciones químicas pueden influir en el comportamiento estocástico de los fenómenos de DP.

En una primera aproximación, la ionización depende de la energía con la que los electrones chocan con la molécula del gas. La energía que es capaz de ganar el electrón al moverse a través del gas, viene dada por la expresión:

$$\Delta\text{Energía} = q \cdot E \cdot \lambda_e$$

Donde q es la carga del electrón, E es el campo eléctrico que mueve el electrón y λ_e , es el camino libre que recorre el electrón, es decir, la distancia media que recorren los electrones antes de colisionar con otra partícula.

Si expresamos la energía que gana el electrón en función de la presión o la temperatura, partiendo de la ecuación de estado de un gas perfecto tenemos:

$$p = N \cdot k \cdot T$$

Donde p es la presión del gas, N es la densidad del gas, k es la constante de Boltzmann ($\approx 1,38032 \cdot 10^{-23}$ J/K) y T es la temperatura del gas.

Expresando el camino libre λ_e , en función de la densidad del gas tenemos:

$$\lambda_e \approx \frac{1}{N}$$

Con las ecuaciones citadas podemos escribir que la energía que adquiere el electrón relacionada con la presión del gas es:

$$\Delta E \approx \frac{E}{p}$$

(En la ecuación previa $T = \text{cte.}$). Dicho $\Delta\text{Energía}$ aumentará si aumenta E o si el camino medio libre es mayor, esto quiere decir que si el camino que requiere recorrer el electrón es corto, necesito menos variación de energía para ionizar moléculas, y por otro lado, si el camino que requiere recorrer el electrón es largo, necesito mayor variación de energía. Ese camino puede variarse de 2 maneras diferentes, a través de la presión o de la densidad, de manera que si aumento la presión o la densidad el camino que recorre el electrón es más corto, por lo que necesito menor $\Delta\text{energía}$ para la ionización de la molécula.

Para que se produzca la ionización de un gas, la energía del electrón ΔE , debe ser mayor que la energía de ionización de la molécula del gas, aunque la probabilidad de ionización de un gas, no siempre es mayor, cuanto mayor es la energía que posee el electrón, ya que en realidad, cada gas presenta una banda “óptima” de energía a la cual se tiene la máxima probabilidad de ionización de las moléculas.

Existe un segundo proceso que afecta al mecanismo. Este comienza cuando los electrones acelerados por la acción del campo eléctrico, bombardean al cátodo produciendo el desprendimiento de electrones secundarios que comenzaran nuevas avalanchas de electrones en el sistema.

Los procesos que producen dicho desprendimiento de electrones del cátodo, son muy importantes para el desarrollo de las descargas eléctricas. Los electrones abandonan el cátodo, cuando se les suministra la suficiente energía, siendo esta energía característica de cada material y puede ser suministrada por diferentes medios o mecanismos, de los cuales algunos pueden ser:

- Emisión termoiónica

Cuando el metal del electrodo alcanza una temperatura superior a 1500 K, los electrones se mueven más rápidamente, pudiendo alcanzar alguno la energía necesaria para abandonar el metal.

- Emisión fotoeléctrica

Los electrones saltan de la superficie del electrodo por el impacto de fotones sobre la misma, cuando la energía de los fotones incidentes es superior a la banda de conducción del metal de los electrodos.

- Emisión por impacto de iones positivos o átomos excitados

Los electrones saltan de la superficie del cátodo cuando ésta es bombardeada con iones positivos o átomos metaestables.

- Emisión por efecto de campo

Se emiten electrones desde la superficie del metal al aplicar un campo eléctrico fuerte. Este efecto es conocido como Shottky. Este proceso es independiente de la temperatura. Tanto los iones positivos como los fotones y los átomos metaestables contribuyen en la segunda ionización. La importancia de cada uno de ellos depende de las condiciones de contorno.

En base a lo descrito, Townsend [32] introdujo este segundo mecanismo de ionización a través de la siguiente ecuación:

$$I = I_0 \frac{e^{\alpha d}}{1 - \gamma (e^{\alpha d} - 1)}$$

Donde I es la corriente que atraviesa el gas; I_0 es la corriente que inicialmente abandona el cátodo; α es el coeficiente de primera ionización de Townsend; d es la distancia de separación entre electrodos; γ es el coeficiente de segunda ionización de Townsend.

Este coeficiente se ve muy influenciado por la naturaleza de la superficie del cátodo. El coeficiente γ es pequeño para valores de E/p pequeños y aumenta al aumentar E/p. Esto es debido a que cuanto mayor es E/p, habrá mayores números de iones positivos y fotones con la energía suficiente para liberar electrones de la superficie del cátodo.

Townsend por último, estableció un umbral para que se pueda producir una descarga eléctrica:

$$\gamma (e^{\bar{\alpha} d} - 1) = 1$$

Donde $\bar{\alpha}$ representa el coeficiente de primera ionización de Townsend efectivo (término que resulta de restar el coeficiente de absorción del gas al coeficiente α).

Si $\gamma (e^{\bar{\alpha} d} - 1) = 1$, el número de pares de iones producidos en el aire por el paso de la avalancha de electrones es suficientemente grande como para liberar electores secundarios de la superficie del cátodo, produciendo avalanchas subsecuentes. Si esto sucede la descarga se auto-mantiene, es decir, puede mantenerse sin el aporte de la fuente que la originó. Si $\gamma (e^{\bar{\alpha} d} - 1) > 1$ la descarga crece muy rápidamente a causa de sucesivas avalanchas, y si $\gamma (e^{\bar{\alpha} d} - 1) < 1$ la descarga no se auto-mantiene, y al eliminar la fuente, la descarga termina extinguiéndose.

Los métodos de liberación de electrones se pueden observar en la siguiente tabla, en donde se indica cuales se pueden despreciar y cuales no para su aplicación en sistemas de transformación, es decir, en transformadores.

Tabla 2.3 Modo de liberación de electrones y consideraciones del proyecto

Modo de Liberación de Electrón	Consideraciones
Fotoionización de la molécula de gas	Depende básicamente de rayos cósmicos o radiación alta, por lo que se puede despreciar
Fotón, ion o electrón inyectado por colisión desde la superficie	Depende básicamente de rayos cósmicos o radiación alta, por lo que se puede despreciar
Inyección de electrón por campo	Requiere un valor alto de campo eléctrico para producirse, puede despreciarse
Inyección de átomos o moléculas metaestables desde la superficie	Puede considerarse
Foto-desprendimiento de iones negativos	Requiere un valor alto de campo eléctrico para producirse, puede despreciarse
Desprendimiento de iones negativos por acción del campo	Puede considerarse
Ionización de moléculas por acción de campo	Puede considerarse
Emisión de electrones desde la superficie	Depende básicamente de rayos cósmicos o radiación alta, por lo que se puede despreciar
Emisión termoiónica de electrones	Para lo considerado en el proyecto, los valores de temperatura producto de la descarga se puede despreciar

La liberación de un electrón no se produce de manera inmediata, es decir, existe un tiempo entre que se excede el valor de campo eléctrico crítico y la producción o liberación del primer electrón libre. Esta diferencia de tiempo se denomina tiempo de Lag. Este mismo puede determinarse estadísticamente a través de la ley de distribución de Poisson, con la siguiente expresión [30]:

$$\frac{n(t)}{n(\infty)} = \exp[-Re(\Delta V)P(\Delta V)t]$$

En donde $\frac{n(t)}{n(\infty)}$ es la fracción de delay para tiempos mayores a t, $Re(\Delta V)$ es la velocidad a la cual los electrones libres son liberados en el campo eléctricos y $P(\Delta V)$ es la probabilidad que un electrón inicie la descarga. Tanto Re como P son función de la diferencia de potencial aplicada, esto significa que ambos aumentan al incrementarse la diferencia de tensión (ΔV). Sin embargo esta ecuación anteriormente descrita no aplica a sucesos que tengan memoria como lo que se consideran en este proyecto. Un suceso sin memoria podría ser una descarga un tanque de aceite de un transformador con ciertas condiciones de contorno, es decir, un volumen de aceite grande, aceite nuevo y

un agitador para revolver el aceite. En ese caso bajo esas condiciones, la descarga no perturbará ni será predecesora de una descarga posterior.

- Fenómeno de Avalancha de Electrones

El fenómeno de avalancha de electrones puede entenderse como la sumatoria total de todos los electrones producto de ionización por continuas colisiones de los electrones bajo la influencia de campo eléctrico externo, el cual es iniciado por un único electrón libre en un punto particular del sistema (Ver Fig. 2.4).

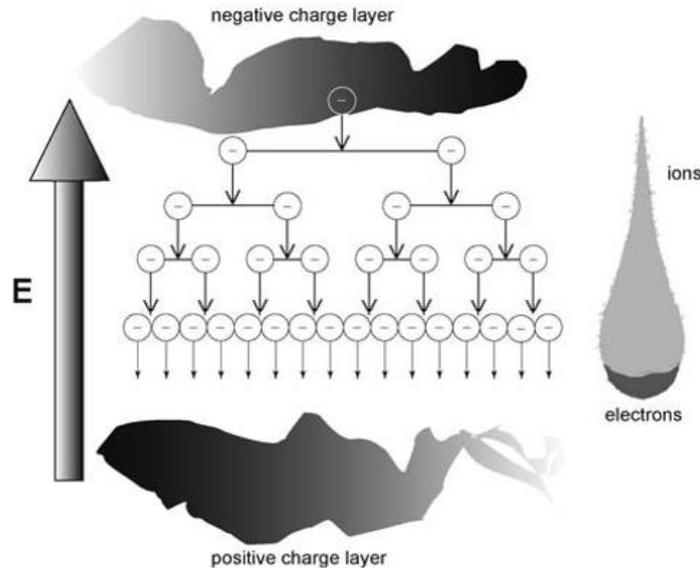


Fig. 2.4

Dicha avalancha contiene una escueta cantidad de electrones, en todos los casos $n_e < 10^8$ electrones donde el efecto en la modificación del campo eléctrico externo que puede llegar a existir es prácticamente despreciable. Puede argumentarse que dicha generación total de electrones en el caso de una avalancha tiene una distribución estadística de amplitud ancha. Esto es importante ya que se asume que la avalancha es un proceso previo o precursor a la descarga parcial, por lo que entender la variabilidad estadística de la avalancha de electrones permite de alguna manera entender la variabilidad estadística del fenómeno de DP.

La siguiente expresión matemática muestra el valor medio del número de electrones que están presentes al inicio del proceso previo a la DP, y es válida para una cantidad de electrones inferiores a 10^8 , es decir, para una avalancha de electrones.

$$\bar{n}_e = \exp\left[\int_0^l \alpha_i(\bar{x}) - \eta_a(\bar{x}) dl'(\bar{x})\right]$$

El exponencial de esta ecuación indica la velocidad de multiplicación de los electrones en un avalancha, l representa el camino seguido por el electrón en el gas, $dl'(\bar{x})$ es un elemento de longitud del mismo camino, η_a es el coeficiente de fijación del gas (indica la probabilidad de desvío de un electrón a través de un gas bajo la influencia de un campo eléctrico) y α_i es el coeficiente de ionización del gas. Este último fue introducido por Townsend y representa el número de electrones libres que es capaz de producir un electrón por unidad de longitud de camino libre. Otra manera de verlo es

como la probabilidad de ionización por colisión que representa el comportamiento del promedio de velocidades de diferentes electrones.

Dicho α_i viene dado por la siguiente formula:

$$\alpha_i \left(\frac{E}{N} \right) = \left(\frac{2}{me} \right)^{\frac{1}{2}} N \int_{e_t}^{\infty} \frac{F \left(e, \frac{E}{N} \right) \sigma(e) de}{W \left(\frac{E}{N} \right)}$$

Siendo m_e la masa del electrón, $W \left(\frac{E}{N} \right)$ la velocidad de desvío media de los electrones, $F \left(e, \frac{E}{N} \right)$ es la función de distribución de probabilidad de energía cinética de electrones dependiente de E/N que muestra la probabilidad de que un electrón tenga una energía en el intervalo e , a un $e + \Delta e$. El valor e_t es un umbral de ionización de energía, por debajo del mismo no se ionizaran las moléculas.

Se debe destacar que una avalancha de electrones tiene una estructura típica con una cabeza negativa que consiste en electrones rápidos y una cola extendida cargada positivamente que contiene los iones que se van produciendo. Esto tiende a retrasar el avance de los electrones que son acelerados por el campo eléctrico externo en la dirección opuesta. (Ver figura 2.4 lado derecho).

- Análisis de Descarga corona en corriente continua (DC)

Para la explicación del fenómeno se utilizara un electrodo de punta y una placa plana separado por un gas. La relación entre la sección de un elemento y la densidad de carga es inversamente proporcional, lo cual quiere decir que a menor sección habrá una mayor cantidad de carga. Por lo tanto al aplicar una tensión continua al circuito, la polaridad de conexión afectara de distinta manera al comportamiento del fenómeno de la descarga.

Primeramente se hace un análisis para una descarga corona negativa generada al aplicar un voltaje de DC negativo al electrodo de punta, utilizando como aislante un gas electronegativo (aire) y luego se evaluara el caso para corona positiva aplicada a la punta del electrodo [30] [32].

Bajo ciertas condiciones y al inicio de las descargas, los pulsos de las coronas negativas exhiben un comportamiento oscilador muy regular en el que tanto las amplitudes de pulso como las separaciones de tiempo se distribuyen muy estrechamente. Este comportamiento fue reportado por primera vez por Trichel, por lo que a dichos pulsos se los denomino pulsos de Trichel.

Un típico pulso de Trichel corresponde a una producción de más de 10^9 electrones, lo cual quiere decir que no puede ser tratado como una avalancha. Aleksandrov propuso un modelo teórico en el cual el pulso de descarga Trichel era consecuencia de un suceso de avalanchas en paralelo, en la cual, la primer avalancha producía la segunda avalancha durante su desarrollo, y así sucesivamente. Luego el mismo Aleksandrov admitió que el modelo propuesto no sirvió para predecir exactamente el comportamiento de los pulsos Trichel, sino que servía para ilustrar un mecanismo a considerar para la descripción del fenómeno.

Malik y Al-Arainy midieron la distribución estadística de amplitud de los pulsos Trichel y reportaron dificultades para reproducir idénticamente descarga bajo ciertas condiciones. Realizaron estudios con SF₆ (hexafluoruro de azufre) y reportaron que las formas de pulsos eran muy irregulares, e incluso midieron una combinación de SF₆/O₂ y notaron que al tener mayores cantidades de SF₆ las irregulares en los pulsos se hacían más notables.

Lama y Gallo sugirieron que luego de una descarga existe un espacio donde queda una nube de iones negativos que perturba el campo eléctrico lo suficiente como para desarrollar pulsos subsecuentes. La avalancha de electrones en el caso que la punta sea negativa, será provocado primeramente por el desprendimiento de electrones desde la superficie del cátodo, los cuales mientras se alejan del mismo van ionizando moléculas en su camino. Con el crecimiento de la avalancha, más electrones se desarrollan en la cabeza de la avalancha (tal como se observa en la figura 2.4), más fotones son liberados y dispersados aleatoriamente, y más iones positivos se acercan al cátodo (electrodo de punta). Los métodos de la producción de la segunda y subsecuentes avalanchas fueron nombrados en proceso de ionización del gas anteriormente descrito.

A medida que aumenta la tensión, la frecuencia de los pulsos de Trichel también aumenta a tal punto que a un valor muy alto de tensión cerca del inicio de la ruptura la separación entre pulsos ya no es distinguible. En este punto, la descarga se transforma en un brillo constante o casi constante, es decir, pierde su característica pulsante. Si se sigue provocando un aumento de tensión aparece la ruptura denominada streamer que provoca la ruptura completa del dieléctrico.

Para el caso de aplicar una tensión continua (DC) positiva al electrodo de punta, los pulsos obtenidos son muy diferentes respecto al caso anterior, presentando tendencias de ocurrencia aleatorias en el tiempo y una ancha distribución de amplitud. La falta de uniformidad de la amplitud y tiempo de ocurrencia de los pulsos se debe especialmente al hecho que el electrón inicial debe originarse por fotoionización o un desprendimiento de algún electrón producto de una colisión (siendo cumplimentada la condición $E/N > E/N_c$). Este proceso de ionización es menos localizado, ya que en el caso de la corona negativa los electrones son típicamente inyectados desde una pequeña región de la superficie del cátodo y en este caso la superficie negativa no es tan localizada, ya que es plana. Como se mencionó anteriormente, al tener el polo positivo en la punta del electrodo se observó que la distribución de amplitudes de los pulsos era más ancha, pero tenía una tendencia de reproducción de los pulsos mucho mejor que en el caso negativo, debido a que en el último es difícil controlar la superficie del cátodo el cual emite los electrones. Para el caso positivo el electrón inicial debe originarse en el gas, por lo que controlar el gas es más sencillo que controlar la superficie del cátodo, pudiéndose así reproducir mejor el pulso. Por lo tanto, las características de los pulsos corona positivos cambian con la composición del gas, ya sea modificándolo intencionadamente o por efectos de descargas ocurridas previamente.

Como se mencionó anteriormente, con las condiciones cumplimentadas de campo eléctrico y un electrón libre que comience la avalancha de electrones se iniciara el proceso de descarga parcial. Los electrones comienzan a viajar hacia el ánodo colisionando con moléculas neutras y ionizando algunas, dejando a su paso iones positivos que se dirigen lentamente al cátodo (placa plana). A su vez, cerca del ánodo habrá iones positivos que harán una “extensión del ánodo”. La avalancha de electrones y iones negativos (electrones que no tienen energía suficiente para romper ionizar una molécula neutra y se adhieren a una molécula obteniendo un ion negativo), se dirigen al ánodo, topándose con la “extensión del ánodo” de iones positivos. Este proceso se denomina comienzo de streamer. Si se sigue aumentando la tensión, esta nube de iones negativos y electrones comienzan a superponerse en tiempo y espacio, provocando que la descarga tenga forma de “resplandor” cubriendo parte de la superficie del ánodo. A mayor tensión los iones negativos pierden estabilidad y puede darse un caso violento de pre-ruptura del aislante, con su posterior ruptura.

Para el uso de corriente alterna, se observó que los comienzos de streamer y el “resplandor” en las coronas positivas se dan en una determinada fase de la onda de CA

al comienzo de la misma al igual que los pulsos Trichel y el “resplandor” negativo. Ambos fenómenos pueden ser vistos en la mitad de ciclo correspondiente en CA si se tiene una magnitud de tensión considerada y dependiendo de la geometría de los electrodos.

Por otro lado, Al-Arainy y sus colegas han demostrado que las distribuciones medidas de amplitud de pulso para los hemisiclos positivos y negativos concuerdan con las expectativas basadas en consideraciones de mediciones de CC correspondientes. Se muestra que para cada medio ciclo, las amplitudes de pulso de corona generalmente siguen un tipo de distribución de probabilidad gaussiana cuando el voltaje aplicado está cerca del inicio de la corona. Sin embargo, a medida que aumenta el voltaje aplicado, las distribuciones muestran desviaciones de este comportamiento. A su vez, muestra que la magnitud de desviación estándar y coeficientes de variación de la onda tanto para pulsos negativos como pulsos positivos son superiores en CA que en CC.

Al utilizar CA en el circuito, las propiedades estocásticas varían por varios factores de los cuales el más evidente es la dependencia del tiempo. Dicha dependencia del tiempo significa que al tener un hemisiclo entero la distribución estadística de amplitud o la forma de onda, será representada como el mejor de los promedios del comportamiento equivalente de CC, en un rango de voltaje alterno desde el inicio hasta el máximo.

Realizando algunas simplificaciones, podemos relacionar la distribución de amplitud del pulso CA con la de CC. Asumimos que la onda de CA es sinusoidal y de la forma:

$$V(t) = V_o \sin(\omega t) = V_o \sin(\phi t)$$

Donde $\phi t = \omega t$ y es la fase de la onda de CA.

La distribución de probabilidad de amplitud de un pulso restringida a un intervalo de fase puede ser descrita por la siguiente ecuación:

$$p_1(q_n/\Delta\phi_{ul}) = \int_{\phi_l}^{\phi_u} p_o(\phi_n) p_1(q_n/\phi_n) d\phi_n$$

Donde $\phi_n \in (\phi_l, \phi_u)$, $p_o(\phi_n)$ es la probabilidad de que aparezca un pulso en la fase ϕ_n , y $p_1(q_n/\phi_n)$ es la probabilidad de que un pulso tenga una amplitud de valor q_n si la fase de ocurrencia es ϕ_n .

Dado que existe una correlación entre voltaje y fase, es posible citar la anterior expresión en función de la tensión, es decir, $p_1(q_n/V)$ y $p_o(V)$ medidas bajo voltajes de continua asumiendo que solo el voltaje aplicado determina la probabilidad que ocurra un pulso de amplitud q_n en un determinado intervalo de tiempo. Esto supone que los efectos de memoria son despreciables, y con este criterio se pueden utilizar las expresiones citadas en [30] para determinar la distribución de probabilidades de amplitud de un pulso de CA a través de una distribución de CC.

Al tomar un valor de la fase, el cual es producto de un promedio de $\Delta\phi_{ul}$ y correlacionarlo con una tensión (V) de CC dada provocara distribuciones de pulsos más anchos que los observados en CC.

Existe una diferencia notoria entre CA y CC producto de los efectos de memoria, es decir, por ejemplo, iones negativos que se formen durante un hemisiclo de CA negativo, pueden influir en el subsiguiente hemisiclo positivo bajo ciertas condiciones. El efecto de esto es el incremento de la tasa de pulsos que presenta la CA ante la CC.

Estudio en líquidos

En contraposición a las teorías de DPs en aire, las teorías realizadas en líquidos son consideradas las más complejas de realizar y de entender. Esto se debe a que a que la fase líquida es menos dócil que la fase gaseosa, y además los aislantes líquidos nunca están puros en su totalidad, debido a que en la misma purificación o el proceso de manufactura que se le realiza quedan restos o huellas que no hacen posible la purificación 100%.

Existen 3 tipos de teorías existentes para líquidos, las cuales se desarrollan a continuación [32]:

- Teoría de ruptura electrónica

De acuerdo a esta teoría, los electrones son emitidos desde el cátodo. En su viaje hacia el ánodo, los electrones colisionan con moléculas del líquido. Si se transfiere suficiente energía durante dichas colisiones, algunos electrones se desprenden de sus átomos y se desplazan con los electrones originales hacia el ánodo. Por lo tanto se produce la avalancha de electrones que se describió anteriormente para gas, conduciendo a una ruptura del dieléctrico.

- Teoría de Burbuja

Las corrientes de fuga no se distribuyen uniformemente sobre las superficies de los electrodos. Según el campo eléctrico aplicado, las líneas de campo tienden a concentrarse en los puntos de microrugosidades convergiendo a dichos lugares (Fig. 2.5). Cerca de dichos puntos, las corrientes de fuga altamente concentradas, con el correspondiente calentamiento Joule de un volumen microscópico de líquido, provocan un aumento rápido de la temperatura a un nivel muy alto por encima del punto de ebullición. Dicho aumento de temperatura puede ocurrir en el orden de $1 \mu s$, de manera que el calor no puede disiparse por convección o conducción y por lo tanto se forma una burbuja de vapor en un punto de microrugosidad en la superficie del electrodo.

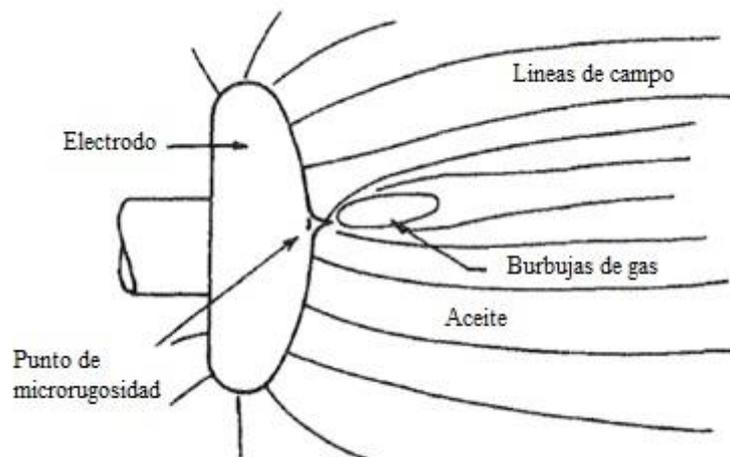


Fig. 2.5 [32]

Otras 3 alternativas propuestas para la formación de la burbuja de gas pueden ser:

1. Liberación de gases ocluidos en microporos de la superficie del electrodo.

2. Cavitación causada por la tensión mecánica del líquido bajo el campo eléctrico altamente concentrado, con la correspondiente diferencia de presión.
3. Disociación electroquímica de las moléculas del líquido con la liberación de gases.

Para el caso de papel impregnado de aceite como lo es en los bobinados de transformadores, o cables o capacitores, las repeticiones de expansión y contracción en las microrugosidades debido al campo eléctrico provocada por CA provocan cavitación y forma burbujas de aire.

Debido a la diferencia entre las permisividades del gas y el líquido, el campo eléctrico dentro de la burbuja es más alto que en el líquido. Cuando la burbuja alcanza un volumen crítico, y bajo campos suficientemente altos, el gas en la burbuja se ionizaría y las avalanchas de electrones se convertirían en streamers. Las cargas formadas en los extremos de la burbuja adquirirán fuerzas de Coulomb que tenderán a deformarla. Además, los electrones e iones acelerados por el campo dentro de la burbuja chocaran contra las paredes de las mismas, ayudando a descomponer algunas de las moléculas líquidas y evaporizando otras. La burbuja de gas crece longitudinalmente (Fig. 2.5), lo que eventualmente llevara a la ruptura completa de todo el espacio líquido.

- Teoría de partículas suspendidas

Las partículas suspendidas podrían ser fibras empapadas en aceite, o incluso gotas de agua. Bajo la acción de un campo eléctrico y debido a que la constante dieléctrica de la partícula es mucho mayor que la del aceite, dicha partícula se ionizará y se moverá a través de campos convergentes.

Si el campo eléctrico es no uniforme en el aceite, actuará una fuerza sobre la partícula que tenderá a llevarla al electrodo como se muestra en la figura 2.6. Esta partícula actuará como una extensión del electrodo que tenderá a atraer más fibras. La fuerza actuante sobre la partícula será mayor cuanto mayor sea el tamaño de la misma, y mayor aun cuando exista un mayor grado de uniformidad del campo eléctrico. Al unirse más fibras se formará un puente que culminará con la descarga en el aceite (Fig. 2.7).

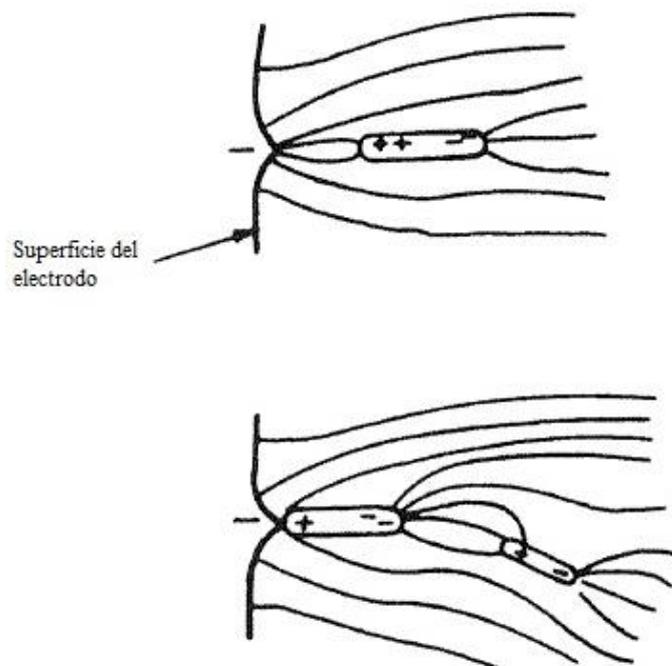


Fig. 2.6 [32]

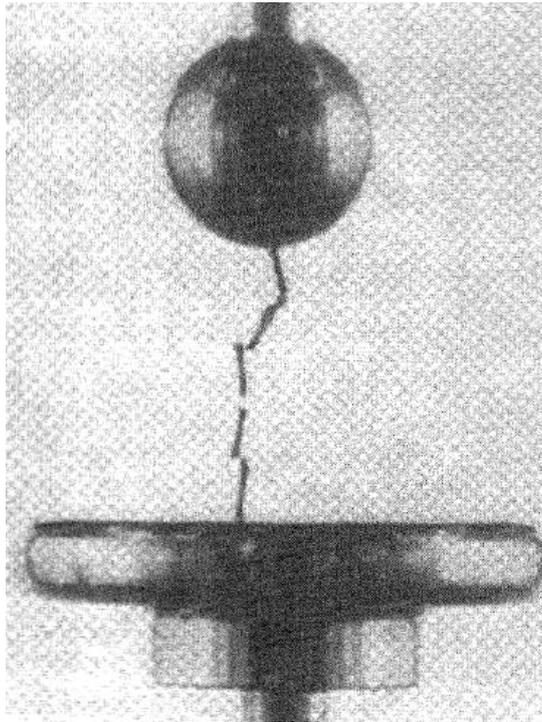


Fig. 2.7 [32]

En el caso de una gota de agua, el proceso se observa en la figura 2.8, donde una elongación gradual de la gota de agua producto de la acción del campo eléctrico culmina en la ruptura del aceite. Luego, el agua es evaporada por el calor proveniente de la descarga.

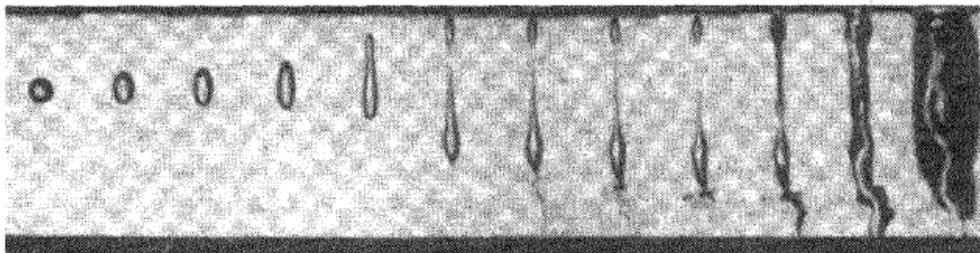


Fig. 2.8 gota de agua entre electrodos sometidos a alta tensión [32]

2.2.4 Consecuencias de las descargas parciales.

Las descargas parciales tienen efectos perjudiciales sobre el medio en que se producen. En medios sólidos o líquidos producen una degradación lenta pero continua del aislante que termina por la ruptura eléctrica del material. En medios gaseosos, como el aire, las descargas parciales producen el conocido efecto corona que se describe a continuación.

El efecto corona es un fenómeno eléctrico que se produce por la ionización del fluido que rodea a un conductor cargado acompañado de luz, ruido y producción de ozono. Estas consecuencias se pueden apreciar directamente por los sentidos humanos (vista, oído y olfato). Sin embargo existen otras consecuencias que no son detectables a simple vista como:

- Generación de radiaciones ultravioletas.

- Oxígeno en forma de ozono con alto poder oxidante.
- Generación de calor.
- Perdidas de potencia.
- Erosión mecánica de las superficies que son bombardeadas iónicamente.
- Interferencias con las ondas de radio.

No todos los efectos son perjudiciales, ya que algunas de estas consecuencias se han usado para el desarrollo importantes productos en xerografía e iluminación.

En el caso principal de los transformadores de potencia, los efectos más comunes producto de las DPs son:

- Provocan que el sistema de aislamiento se degrade con mayor rapidez.
- Dan origen a partículas químicas como hidrogeno, etano, etileno, metano, etc., provocando una contaminación en el aceite del transformador de potencia.
- Pueden ocasionar fallas entre espiras en los devanados del transformador.
- Pueden inducir una la salida de operación inesperada.
- Puede provocar explosiones, cuando el aceite mineral está muy contaminado.

Por consiguiente, todas estas causas contribuyen a disminuir el ciclo de vida del transformador.

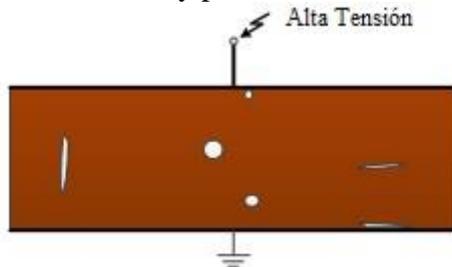
2.3 Tipos de descargas parciales

Una descarga parcial es el desarrollo de una ruta ionizada que no logra cerrar el espacio completo entre los electrodos y, por lo tanto, puede disipar solo una energía muy limitada. La razón por la que se inicia una descarga pero no logra cerrar el espacio entre electrodos puede ser un campo eléctrico no uniforme o un material no homogéneo entre los electrodos por lo que una región de campo fuerte permite que comiencen las descargas, pero estos pueden alcanzar una región de campo mucho más débil y esa propagación no puede continuar. Por otro lado una región de material dieléctricamente más débil permite que comiencen las descargas, pero un material más fuerte detiene su desarrollo.

Por lo tanto, las descargas parciales pueden darse en diferentes sitios y de diferentes maneras, y a la hora de estudiarlas se puede clasificar según su origen en internas, superficiales y coronas.

- Descarga parcial interna.

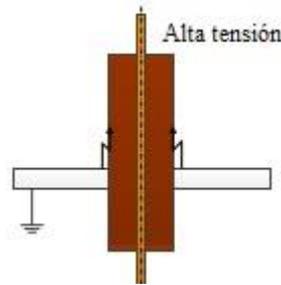
Son producen en vacuolas de gas en el interior de un medio aislante. La descarga hace que la superficie de la vacuola se cargue provocando la posterior extinción de la misma. La existencia de vacuolas no precisa de un único modelo, sino que pueden darse casos de distintos tipos de oclusiones en los líquidos. Este tipo de descargas son las que se trabajan en el proyecto en el laboratorio y por lo tanto, las estudiadas.



Ejemplo de Cavidades - Burbujas- Oclusiones

- Descarga parcial superficial.

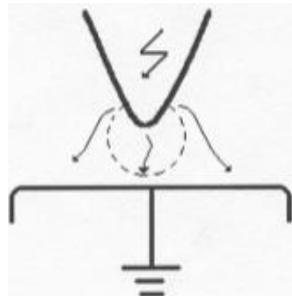
Esta descarga se produce en la superficie de contacto entre dos materiales diferentes. La diferencia entre permisividades de los materiales ocasiona el aumento del campo en el aire que puede culminar en una ruptura de aislación del material. Las descargas parciales superficiales pueden ocurrir por el resultado de una mala ubicación o instalación del dieléctrico respecto a los conductores o de una corriente de fuga que fluye a través de una capa conductora debido a contaminación o humedad en la superficie de aislamiento.



Ejemplo de descarga superficial en bushing de transformador

- Descarga parcial corona.

La descarga parcial corona se produce con la ionización del aire alojado entre dos electrodos. Es frecuente que estas descargas vengán acompañadas de interferencias que pueden llegar a producir ruido e incluso luz en algún caso.



Ejemplo de Descarga parcial tipo corona en aire

2.4 Fuentes de distorsión de descargas parciales

2.4.1 Efecto de temperatura en aceite

En la mayoría de los aisladores sólidos, a medida que aumenta la temperatura, aumentan las pérdidas dieléctricas dando como resultado una disminución de la resistividad del aislamiento y provocando un mayor pase de corriente a través del mismo. Este proceso puede llevar a la fuga de corriente y finalmente a la ruptura del aislamiento. El caso es diferente para el aceite del transformador. Según experimentos realizados en aceite de transformador, un aumento de la temperatura del aceite dentro del rango normal, aumenta la resistencia a la descomposición del mismo, es decir, un aumento de la temperatura del aceite aumenta la movilidad de los portadores de carga y, por lo tanto, aumenta la conductividad del aceite, lo que podría resultar en una reducción de la resistencia a la descomposición del aceite [33].

El análisis anteriormente mencionado se basa en dos explicaciones posibles que se explicarán a continuación.

El primer supuesto está relacionado con la cantidad de humedad en el aceite. A medida que aumenta la temperatura del aceite, la cantidad de humedad en el aceite disminuye y esta podría ser la razón por la cual la resistencia a la descomposición del aceite aumenta al aumentar la temperatura.

Una posible segunda explicación es que hay una cantidad de gas disuelto en el petróleo. La solubilidad del gas aumenta con el aumento de la temperatura y esto también finaliza en la misma conclusión.

La temperatura no solo puede afectar la resistencia a la descomposición del aceite, sino que también puede afectar la actividad de DPs dentro de un transformador. La investigación del cambio en la actividad de la DP debido a un aumento de la temperatura no solo hace que los resultados de laboratorio se acerquen más a la realidad, sino que también se puede utilizar como un factor para la clasificación. Por ejemplo, si durante las condiciones de sobrecarga la actividad de la DPs disminuye, entonces puede ser un buen indicador para identificar el tipo de defecto que es la fuente de las descargas. En las figuras 2.9 2.10 2.11 y 2.12 se muestra el voltaje de inicio de DPs en función de cuatro tipos de defectos en un transformador lleno de aceite.

Como queda claro en las figuras 2.9 y 2.10, el voltaje de inicio de DP para corona en aceite y un objeto metálico a potencial flotante aumenta con el aumento de temperatura, pero en las figuras 2.11 y 2.12 se observa que para descarga de superficie en aceite y burbuja libre en aceite, el voltaje de inicio de DP disminuye con el aumento de la temperatura.

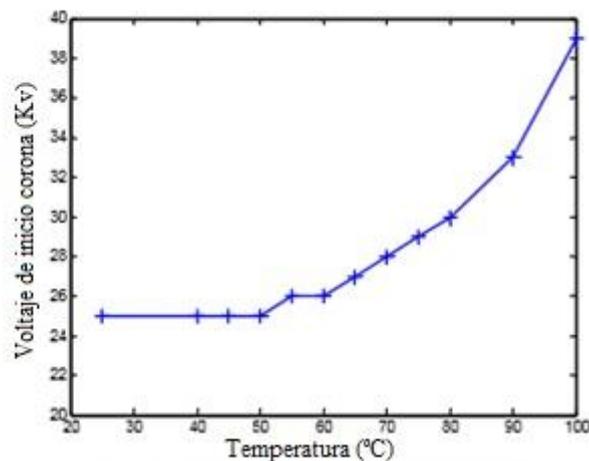


Fig. 2.9 Voltaje de inicio de corona VS Temperatura [33]

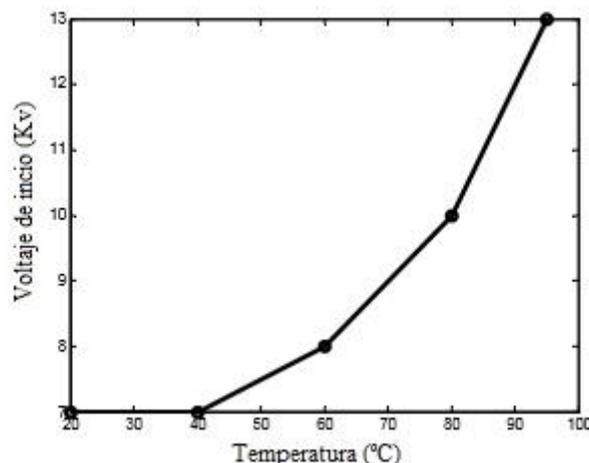


Fig. 2.10 Objeto de metal a potencial flotante VS Temperatura [33]

Para el caso de corona en aceite, dado que el gradiente del campo eléctrico es alto en el punto más agudo, obliga a las partículas en aceite a moverse hacia el mismo. Cuando la temperatura es alta, las partículas conductoras en el aceite pueden moverse más fácilmente y rápidamente hacia el punto de menor sección o más agudo. Esta es la razón por la cual a altas temperaturas, el voltaje de inicio de la corona es mayor.

Para el caso de un objeto metálico con potencial flotante, la descarga es una especie de ruptura que se produce en el espacio de aceite entre el electrodo y el objeto metálico. Como resultado, el comportamiento de este tipo de descarga frente a la temperatura es similar al comportamiento de la descomposición del aceite frente a la temperatura.

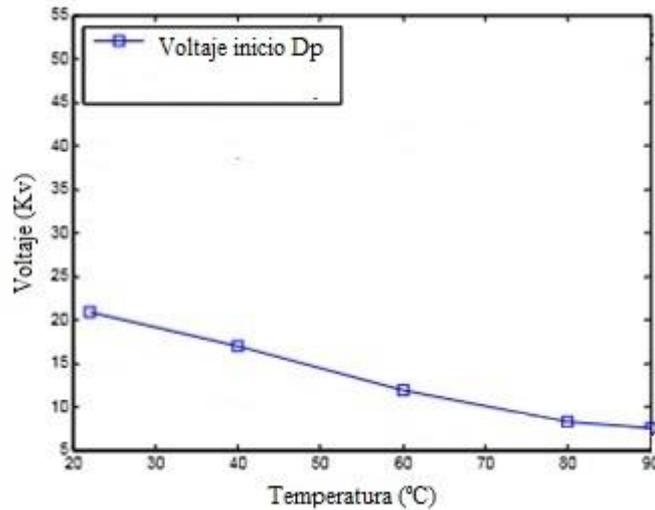


Fig. 2.11 Descarga Superficial en aceite: Voltaje Vs Temperatura [33]

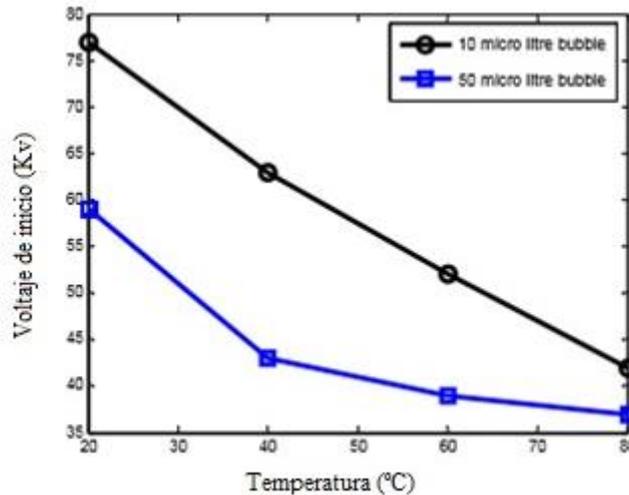


Fig. 2.12 Burbuja de aire en aceite: Voltaje Vs Temperatura [33]

El caso de descarga de superficie en aceite es distinto a los casos anteriormente mencionados. Para altas temperaturas, la liberación de electrones de la superficie es más fácil. Esto significa que la disponibilidad del electrón inicial de la semilla que se necesita para el inicio de la avalancha es mayor para una temperatura mayor. Esto implica que al tener mayor tensión será más fácil liberar un electrón de la superficie razón por la cual la tensión de descarga superficial disminuye con el aumento de la temperatura.

Para el caso de una burbuja en el aceite, se considera que la misma es no esférica. Esto significa que la burbuja tiene forma de elipse. A su vez, el mayor diámetro de la burbuja es paralelo a la superficie del recipiente. Para temperaturas altas, la tensión de la superficie del aceite disminuye, lo que hace que el diámetro de la burbuja sea mayor. Mientras la tensión aplicada aumenta, la burbuja se alarga en la dirección del campo eléctrico. Esto significa que si el voltaje sigue aumentando, dentro de la burbuja el aire se ionizará y producirá una descarga parcial.

Como corolario de lo descrito anteriormente, se demuestra según [33] que un aumento de la temperatura da como resultado un aumento de la tasa de repetición de actividad de DPs para los casos de descarga superficial en aceite y burbujas en aceite, y una reducción de la tasa de repetición de actividad de DPs para los casos de corona en aceite y objetos metálicos a potencial flotante.

2.4.2 Humedad en aceite

La humedad o contenido de agua en el aceite de transformador es altamente indeseable, afectando las propiedades dieléctricas del aceite. El contenido de agua en el aceite también afecta el aislamiento del papel del núcleo y el devanado del transformador. El papel es altamente higroscópico por naturaleza, por lo tanto absorbe la cantidad máxima de agua del aceite. Esto afecta a la propiedad del aislamiento del papel, así como también reduce su vida útil. En un transformador en funcionamiento, el aceite se vuelve más caliente, por lo tanto el papel libera agua y aumenta el contenido de la misma en el aceite del transformador.

La temperatura del aceite en el momento de tomar la muestra para la prueba es muy importante. Durante la oxidación se forman ácidos en el aceite, los cuales dan lugar a la solubilidad del agua en el aceite. El ácido acoplado con el agua descompone más el aceite formando más ácido y agua. Por lo tanto, es de importancia realizar un correcto mantenimiento y purificación del aceite para evitar este tipo de problemas.

El contenido de agua en el aceite se mide en ppm (partes por millón de unidades).

Este contenido de agua en aceite es permitido en volumen hasta 50 ppm según lo establecido por la norma IS - 335 (1993) (Indian Standard).

Los resultados experimentales muestran que aumentar la cantidad de humedad en el aceite disminuye ligeramente el voltaje de inicio de la corona y aumenta drásticamente la tasa de repetición de la corona [34]. En [34] se realiza un ensayo en el cual se calienta el aceite por un tiempo superior a 2 horas para eliminar la humedad y el contenido de agua del aceite. Luego se mezcla agua y aceite de tal manera de tener 10 ppm de agua en el aceite y se mide la tasa de descargas parciales durante 10 minutos. Esto se repite sucesivamente y progresivamente agregando 10 ppm en cada ensayo (Ver figura 2.13). Por conclusión se muestra que para 50 ppm de contenido de agua en aceite, la cantidad de descargas parciales es notoriamente considerable y por consecuente, la rigidez dieléctrica del aceite es inferior a un aceite sin contenido de agua.

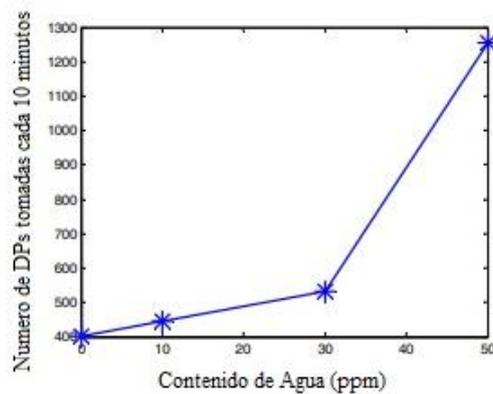


Fig. 2.13 Cantidad de DPs en función de la humedad en aceite. Foto sacada de [34].

2.5 Métodos de detección

2.5.1 Método EMI

Al producirse una descarga parcial en un medio aislante, ésta emitirá ondas electromagnéticas (EMI) que pueden captarse por medio de por ejemplo una antena y convertirse, en función de su potencia, en decibeles (dB).

2.5.2 Método Eléctrico

Desde hace tiempo, la evaluación de la calidad o estado de un aislamiento de alta tensión se ha basado en la medición de su factor de pérdidas dieléctricas ($\text{tg } \delta$).

A causa de la aparición de los aislantes de material sintético con factor de pérdidas dieléctricas muy bajos, se toma la medición del nivel de descargas parciales como un buen complemento, e incluso en determinados casos se toma como alternativa a la medición del factor de pérdidas dieléctricas ($\text{tg } \delta$). La medición del factor de pérdidas dieléctricas continúa siendo útil en lo que se refiere al control de calidad en la fabricación de los materiales que se utilizan como materia prima para el aislamiento de los elementos eléctricos (aparatos, conductores, aisladores, componentes, etc.). [35]

Para la evaluación de la calidad o el estado de aislamiento de elementos ya fabricados (producto final) y/o en servicio, la medición de las descargas parciales resulta más ventajosa, porque existen mayores posibilidades de localizar defectos o anomalías en puntos o zonas concretas (defectos discretos). Por lo tanto, esto permite poner en evidencia puntos débiles que hayan aparecido después de la fabricación y/o defectos de montaje.

Al igual que la medición del factor de pérdidas dieléctricas, la medida del nivel de descargas parciales tiene como objetivo la estimación de la vida útil probable de los elementos y/o equipos de Alta y Media Tensión en lo que se refiere a su aislamiento.

Para la evaluación de la calidad o del estado de un aislamiento, tanto o más importante que el valor medido es su variación en el tiempo, es decir, su evolución temporal.

Para un adecuado control y/o vigilancia del estado de un aislamiento, es conveniente repetir la medición del nivel de descargas parciales en intervalos de tiempo, que en cada caso pueden determinarse en función de los resultados de la comparación y/o análisis de los valores obtenidos.

- Explicación método Eléctrico

Cuando en una cavidad del dieléctrico se produce una DP, una cierta parte de la energía que había en la cavidad se disipa en forma de carga eléctrica “q”.

Como no es posible medir el valor de esta carga manifestada, ha sido necesario definir un valor que pueda medirse y que sea una imagen lo suficientemente representativa de la energía disipada por la DP en el seno del dieléctrico. Este valor se denomina carga aparente “q” y se considera dimensionalmente como una cantidad de electricidad acumulada. La norma UNE 23313 (equivalencia IEC 270 – 1981), lo define de la siguiente forma:

La carga aparente “q” de una descarga parcial es la carga que, al inyectarse instantáneamente entre los bornes del objeto a ensayar, cambiará momentáneamente la tensión entre los bornes en la misma medida que al producirse una descarga parcial. El valor absoluto de la carga aparente se denomina amplitud de la descarga. La carga aparente es normalmente del orden de los picocoulombs (pC). Ésta no es igual al valor de la carga transferida efectivamente a través de la cavidad en el interior del dieléctrico donde se ha producido la DP, pero se utiliza por ser un valor observable en los bornes del objeto ensayado y que es función del valor de la carga efectiva de la DP. Se trata por consiguiente de un valor que es posible medir.

Los equipos de medida de descargas parciales, (figura 2.14), se componen básicamente de:

- Fuente o generador de tensión alterna: Habitualmente es un transformador de salida en Alta Tensión. En lo que se refiere al ensayo, el objeto que se prueba se comporta como un condensador (Ct) con una capacidad que dependerá de entre qué puntos se le aplica la tensión.
- Condensador (Ck): Se conecta en paralelo con el objeto que se ensaya. Se trata de un condensador de Alta Tensión, exento de descargas parciales. Su capacidad ha de ser mayor que la del objeto a ensayar. Se llama condensador de unión o de acoplamiento.
- Impedancia de medida (Zm): La misma va conectada en serie con el condensador de unión o bien en serie con el objeto a ensayar.
- Instrumento de medida: Conectados a los bornes de la impedancia de medida que se comporta como un shunt de medida. Lo que mide realmente el equipo de instrumentos son las corrientes ocasionadas por las DPs.

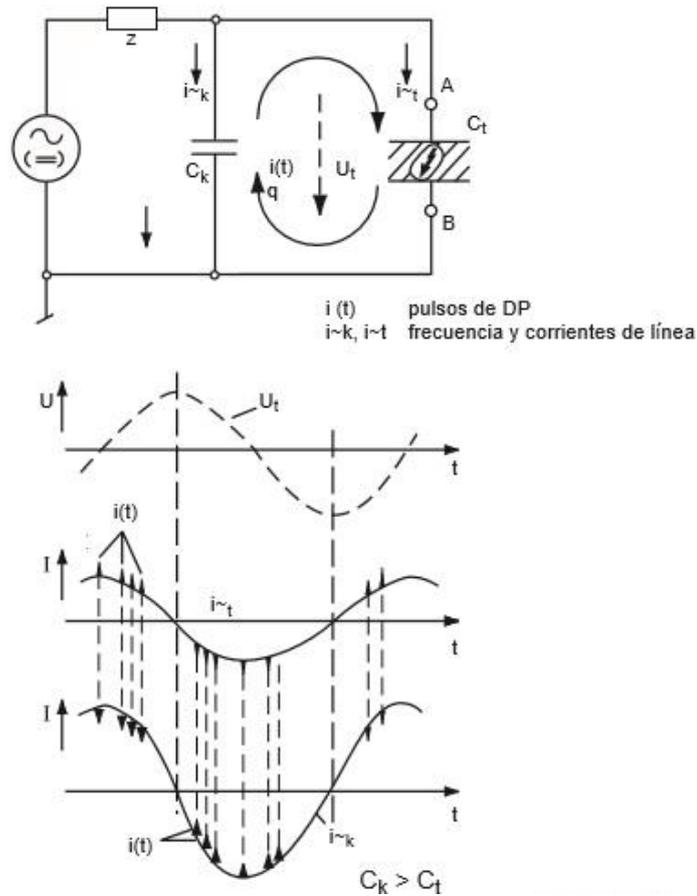


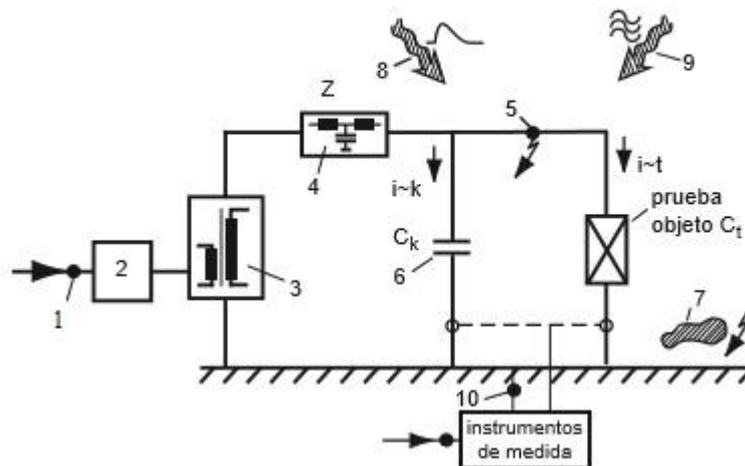
Fig. 2.14. Circuito eléctrico y forma de DP del método eléctrico [35]

El funcionamiento del método se basa en pulsos de corriente que se superponen a la onda sinusoidal de la corriente capacitiva que circula por el objeto a analizar (condensador « C_t ») cuando se aplica la tensión alterna de prueba. (Figura 2.15).

Estos pulsos de corriente debidos a las DP tienen valores de cresta proporcionales a los valores de la carga aparente y por lo tanto pueden calibrarse en picocoulombs. Los mismos pueden visualizarse en la pantalla de un osciloscopio y de esta manera medir su amplitud, determinar su secuencia temporal y su correlación con el valor de la tensión alterna de prueba que se ha aplicado.

Por otro lado, las perturbaciones o interferencias electromagnéticas son un reto importante en lo que refiere a la medición de las DP, ya que pueden falsear en gran medida los valores registrados.

En la siguiente figura (fig. 2.15) se representan las fuentes típicas de interferencias que afectan a los equipos de medida de DP.



- 1 Red de alimentación
- 2 Divisor o regulador de Tensión
- 3 Fuente de Alta Tensión
- 4 Filtro de la fuente de Alta Tensión
- 5 Cables de interconexión y electrodos
- 6 Condensador de acoplamiento
- 7 Objetos metálicos varios cercanos al lugar
- 8 Interferencias de impulsos
- 9 Ondas electromagnéticas de radiodifusión
- 10 Corrientes parásitas en el sistema de tierra

Fig. 2.15. Fuentes de distorsión de DPs [35]

La norma UNE-21313 (equivalencia IEC 270 – 1981), clasifica las interferencias en:

- a) Perturbaciones en principio independientes de la tensión aplicada al objeto a ensayar. Son básicamente las de procedencia exterior al equipo ensayado.
- b) Perturbaciones ligadas a la fuente de la tensión de prueba. Son las que tienen su origen en el propio equipo de ensayo y generalmente crecen con el aumento de la tensión de ensayo.

Por lo tanto a la hora de realizar ensayos bajo ese método es preciso:

- Detectar estas perturbaciones, distinguiéndolas de las DPs.
- Determinar su valor equivalente a una DP, es decir, medir el valor de la carga aparente que tendría si fuera realmente DP.

Eliminar totalmente o en la mayor parte posible los ruidos e interferencias, sin que esta eliminación afecte a la medición correcta de las DPs.

A continuación se explican algunos sistemas y métodos para eliminar perturbaciones externas del sistema:

- Filtros pasa-banda (ancha o estrecha) intercalados en la conexión entre la impedancia de medida Z_m y el equipo de instrumentos de medida. Estos filtros depuran la señal captada en bornes de Z_m .
- Impedancia de filtro colocada a la salida de la fuente de alta tensión para amortiguar las perturbaciones procedentes de esta fuente de alimentación.

- Filtro en la entrada de la tensión auxiliar al equipo de instrumentación para amortiguar las perturbaciones y/o armónicos procedentes de la red de baja tensión.
- Antena para captar las interferencias de radiofrecuencia y mediante circuitos lógicos determinar su naturaleza y eliminarlas de los circuitos de medida.
- Circuitos lógicos que según la polaridad de los pulsos en el condensador de acoplamiento Ck y en el objeto a probar determinen si son DPs (polaridad diferente) o si son perturbaciones (misma polaridad).

Cuando se trata de DPs de valores pequeños los recursos explicados para eliminar las perturbaciones e interferencias pueden resultar insuficientes.

En estos casos el ensayo se realiza dentro de un recinto blindado de manera de constituir una jaula de Faraday con todas las masas conductoras conectadas a tierra. Eso además de los recursos nombrados, y en especial el filtro amortiguador de las perturbaciones provenientes de la fuente de alimentación de alta tensión, será de gran ayuda para eliminar la mayor cantidad de ruido e interferencias externas.

2.5.3 Método DGA

Este método denominado análisis de gases disueltos (DGA) es ampliamente utilizado en transformadores industriales.

Los aceites minerales aislantes están constituidos por una mezcla de diferentes moléculas de hidrocarburos unidos por enlaces carbono-carbono. Como resultado de defectos eléctricos y térmicos puede romperse alguno de estos enlaces, con formación de fragmentos pequeños inestables, que se recombinan rápidamente mediante reacciones complejas, para dar moléculas gaseosas como son hidrógeno, metano, etano, etileno o acetileno. La mayoría de los gases formados se disuelven en el aceite o, si se producen rápidamente en grandes cantidades, se acumulan como gases libres dentro del recinto contenedor de aceite. A continuación se observa el cuadro 2.4 que muestra los niveles de energía y los gases disueltos producto de los fenómenos que ocurren en el transformador.

Cuadro 2.4 Gases presentes en método DGA.

Nivel de Energía	Fenómeno	Gas
 Alto	Arco Eléctrico	Acetileno (C ₂ H ₂): Descarga de alta energía. (temp > 600°C). Formación intensa de Carbono
		Etileno (C ₂ H ₄): Pirolisis del aceite (temp > 400°C). Se podría esperar formación de Carbono
	Calentamiento	Etano (C ₂ H ₆): Acompañado del metano en pirolisis del aceite
		Metano (CH ₄): Pirolisis del aceite (aprox 200°C)
		Bajo

En cuadro 2.5 se puede observar un DGA realizado por Uruman (Sociedad Uruguaya de mantenimiento, gestión de activos y confiabilidad) en el cual se observa ppm de cada gas disuelto en el aceite partiendo de un análisis de un transformador nuevo.

El procedimiento se realiza cada un año, hasta observar valores en los cuales el aumento de los gases disueltos en el aceite es tan notable que se comienza a realizar un seguimiento quincenal por prevención.

Los valores indicaron que el transformador en cuestión estaba presentando fallas en las cuales se rompían enlaces moleculares liberando gases y que posiblemente se provocase una futura falla de no ser tratado correctamente en tiempo y forma.

Tabla 2.5. Análisis de gases disueltos, mantenimiento preventivo de Urumán.

GASES DISUELTOS EN ACEITE AISLANTE		05/1997	03/1998	03/1999	03/2000	03/2000	04/2000
		NUEVO	10 meses	24 meses	34 meses	34 ½ meses	35 meses
Metano	ppm	6	36	200	1900	4000	3700
Etileno	ppm	29	100	290	2200	3200	3900
Etano	ppm	7	8	51	370	630	910
Acetileno	ppm	1	0	0	2	5	5
Hidrógeno	ppm	12	20	25	630	1500	1650
Monóxido de carbono	ppm	500	570	560	480	650	560
Dióxido de carbono	ppm	1500	2300	2600	2700	4700	8000
Oxígeno	ppm	19700	14100	19600	19200	19200	20200
Nitrógeno	ppm	73700	59700	73700	58000	67700	66200
Gases combustibles	ppm	555	734	1226	5582	9335	10725
Gases totales	%v	9.5	7.7	9.7	8.5	10.2	10.5

2.5.4 Método Acústico

El mismo será estudiado en detalle en el Capítulo 4 del presente proyecto.

2.6 Aplicabilidad de lo estudiado al proyecto

Una vez realizado el estudio de las descargas parciales en distintos medios, distintos estados de la materia, comportamientos con distintos tipos de alimentaciones, efectos que distorsionan las descargas, tipos de electrodos utilizados, etc. Se realizará una síntesis de lo que se espera obtener al ensayar la cuba en el laboratorio de la facultad.

En primer lugar, se utilizará corriente alterna para realizar el ensayo, lo cual implica que teniendo magnitudes de tensión adecuadas y dependiendo la geometría de los electrodos que en nuestro caso son ambos iguales y simétricos con terminación curva, se podrá observar en cada hemiciclo los fenómenos descritos en la sección 2.2.3.

En cuanto a la geometría de los electrodos, fueron realizados según la norma IEC60156. Los mismos fueron lijados en sus extremos con lija 2000 lo cual le da una rugosidad absoluta inferior a 5 µm (micrones). Luego los electrodos fueron pulidos para darles una mejor terminación.

La descarga se realizará en un medio aislante líquido (aceite de transformador), siendo la misma la condición más compleja para realizarse. En la explicación de líquidos citada en la sección 2.2.3, se hace mención a 3 tipos de teorías para aislantes líquidos, de las cuales se considerarán que solo 2 tienen aplicabilidad a los ensayos de laboratorio que se realizarán.

La primera teoría es la teoría de la burbuja, donde se mencionó que las superficies del electrodo poseen microrugosidades que tienden a concentrar las líneas de campo eléctrico provocando un aumento de las corrientes de fuga y cuyo calentamiento de la zona provoca el calentamiento de microvolúmenes de líquido. Este calentamiento por efecto Joule culmina en la formación de burbujas de gas. Esto explica la “necesidad” de una zona de gas para la ionización, ya que al tener menor permitividad dieléctrica en el gas que el aceite se produce la ionización en el interior de la burbuja de gas. El gas contenido dentro de la burbuja es aire, lo cual implica que dentro de la burbuja el medio es electronegativo. Esto quiere decir que la probabilidad de ocurrencia o aparición de iones negativos en el medio es mayor, es decir, las moléculas tienen una fuerte afinidad para atraer electrones del medio.

Por otro lado, la teoría de las partículas suspendidas también aplica a los ensayos de laboratorio que se realizarán.

Al producirse una descarga entre los electrodos fluirá una corriente por los mismos. Las descargas parciales son de baja energía y corta duración, mientras que los arcos eléctricos son de alta energía y pueden tener grandes periodos de duración.

Los arcos eléctricos alcanzan temperaturas entre 2000 K y 10000 K. Esta alta temperatura puede cortar los enlaces C-H o C-C del aceite del transformador, emitiendo contaminantes negros sólidos producto de la descomposición de hidrocarburos. La concentración de contaminantes liberados por el arco depende en gran medida del tamaño del arco y de la duración de la aplicación del mismo.

Además, existe una reducción de la permisividad relativa del aceite, la cual puede ser causada por la reducción del contenido de agua o a la aparición de más partículas conductoras que mejoran la conductividad y reducen la capacitancia del sistema.

Esto quiere decir que posterior a cada ensayo, el aceite presentará partículas de carbono que afectarán las descargas siguientes, por lo cual, deberá seguirse la norma correspondiente (IEC156) que especifica el período de tiempo que debe tomarse entre descarga y descarga, la cantidad de ensayos que deben realizarse, la agitación correspondiente que debe realizarse para no concentrar todos los componentes en el líquido, y la eliminación de cualquier tipo de oclusión que resulte de la formación de la descarga.

CAPITULO 3 - Transformadores

3.1 Fallas comunes en transformadores

3.1.1 Introducción

Los transformadores son uno de los componentes más críticos de un sistema de energía. Sus reparaciones debido a fallas inesperadas pueden ocasionar graves pérdidas económicas, ya sea directa o indirectamente. Si bien al momento de adquirir estos elementos se puede estimar su vida útil de manera aproximada, poder realizar tareas preventivas que extiendan este tiempo se considera de vital importancia.

Los costos de reparación, como los de reemplazo o pérdidas por disminución de potencia entregada, son montos onerosos, por lo que surge el interés de detectar alertas tempranas a estos comportamientos.



Fig. 3.1 Falla de un transformador

Distintos estudios sobre las fallas en transformadores concuerdan en que la falla en la aislación es una de las principales causa de fallas en los mismos.

Las fallas más comunes en los transformadores ocurren en los sistemas de protección, seguido por problemas de fallas del cambiador de tomas (TAP) y fallas en los Bushings. Las fallas menos comunes se producen en el tanque, seguido por fallas en núcleo.

En el capítulo 3 del presente proyecto, se hace mención y descripción de las principales averías en los transformadores.

3.1.2 Tipos de aceite

Los aceites aislantes se emplean de diversas maneras en transformadores e interruptores por inmersión de estos aparatos, en impregnación de materiales fibrosos, y otros materiales como por ejemplo fabricación de conductores eléctricos.

Prácticamente todas las variedades de aceites tienen buenas propiedades dieléctricas, pero no todos pueden emplearse como materiales aislantes.

Para juzgar si un aceite es apropiado como material aislante, deben tenerse en cuenta las siguientes características:

- Tendencia a la sedimentación
- Perdidas por evaporación
- Viscosidad a diferentes temperaturas
- Estabilidad química
- Peso específico y coeficiente de dilatación
- Temperatura de inflamación y congelación
- Absorción de humedad

- Rigidez dieléctrica
- Conductividad térmica
- Calor específico

Una de las principales ventajas de todos los aceites aislantes es su propiedad de autoregenerarse después de una perforación dieléctrica o de una descarga disruptiva; sin embargo, hay que tener en cuenta que esta propiedad no es independiente de la energía de la descarga y, si esta es muy elevada, puede sobrecalentar el aceite provocando su combustión.

La mayor desventaja de los aceites aislantes es su inflamabilidad y las posibles consecuencias que pueden originar por acciones químicas, arcos eléctricos, o descargas estáticas, como por ejemplo el desprendiendo de gases ligeros como hidrogeno e hidrocarburos que en contacto con el aire se vuelven explosivos.

Los aceites aislantes más utilizados y sus características más importantes más pueden observarse en la tabla 3.1.

Tabla 3.1 obtenida da la página de Schneider Electric

	Aceite Vegetal	Aceite Sintético	Aceite mineral	Siliconas
Procedencia	Ester Vegetal	Ester sintético	Refino petróleo	Química
Biodegradación	99%	80%	No biodegradable	No biodegradable
Punto de combustión (°C)	360	322	165	360
Punto de inflamación (°C)	330	275	142	250
Densidad (Kg/dm ³)	0.92	0.97	0.85	0.96
Calor de combustión (MJ/Kg)	40.5	32	45	28
Rigidez dieléctrica IEC 60156 (kV)	>75	>75	>70	>50
Saturación de agua a Temp. Amb. (ppm)	1100	2600	55	220
Uso actual como aislante de transformadores de potencia	Poco utilizado	Poco utilizado	Muy utilizado	No utilizado
Esperanza de vida (años)	35-40	35-40	25-30	25-30

3.1.3 Características del aceite

A continuación se desarrollan algunas de las características más importantes de los aceites de transformador.

- Contenido en aditivos antioxidantes

Los aditivos antioxidantes (inhibidores) reducen la oxidación del aceite y por tanto la formación de lodos y acidez. Existen aceites inhibidos, parcialmente inhibidos y no inhibidos.

- Viscosidad

Influye sobre la capacidad del aceite para evacuar el calor generado en los devanados y el núcleo y sobre las propiedades de impregnación del papel aislante y otros materiales sólidos. A bajas temperaturas, una viscosidad elevada es un factor crítico para la puesta en servicio en frío de transformadores con refrigeración natural (riesgo de aparición de puntos calientes).

- Punto de congelación

Es la temperatura más baja a la cual fluye el aceite. Conviene que sea lo más bajo posible para evitar la solidificación de parafinas, que reducen considerablemente la viscosidad del aceite a baja temperatura.

- Contenido de agua

El agua puede estar presente en un aceite en forma disuelta o de emulsión, produciendo en ambos casos, y muy principalmente en el último, una disminución de la rigidez dieléctrica, un aumento de las pérdidas dieléctricas y una aceleración de la degradación del papel aislante.

- Tensión de ruptura dieléctrica

La tensión de ruptura viene medida por la tensión necesaria para formar un arco eléctrico entre dos electrodos situados en el seno del aceite en condiciones normalizadas. Su valor está muy influenciado por el método de ensayo y depende de la presencia de contaminantes físicos, como agua no disuelta, fibras, partículas conductoras, etc.

Las partículas sólidas en suspensión producen un descenso apreciable de la tensión de ruptura, especialmente en presencia de un cierto contenido de agua, que puede ser absorbida por las mismas partículas.

- Densidad

Debe ser lo suficientemente baja como para evitar que, en climas fríos, que el hielo producido por la congelación del agua libre esté flotando en la superficie del aceite y posibilite que se produzcan arcos eléctricos en los conductores.

Puede ser útil para controlar de una manera sencilla la homogeneidad de aceites de varios suministros.

Esta característica no es afectada, en general, por la degradación del aceite en servicio.

- Factor de pérdidas dieléctricas ($\text{tg } \delta$)

Las pérdidas dieléctricas son función directa de la cantidad de impurezas y compuestos polares debidos al envejecimiento del aceite.

Un aumento de la tangente delta en un aceite en servicio se debe generalmente a envejecimiento por oxidación y viene acompañado por aumentos del índice de neutralización, contenido de lodos y reducción de la tensión interfacial.

Eléctricamente, un aumento de las pérdidas dieléctricas origina un calentamiento del aceite y del papel impregnado, acelerando sobre todo en el papel el proceso de degradación térmica de este material.

- **Aspecto y color**

Informa sobre el grado de refinado de un aceite nuevo, siendo más transparente cuanto más refinado está. En un aceite en servicio, un aumento del índice de color es indicativo de un cierto grado de envejecimiento o contaminación.

- **Acidez. Índice de neutralización**

Indica el contenido en compuestos ácidos, procedentes principalmente de la oxidación del aceite. La presencia de estos ácidos reduce las características dieléctricas del aceite. Estos ácidos también actúan sobre el papel y otros materiales aislantes sólidos degradándolos. El aceite nuevo debe ser neutro y libre de cualquier componente ácido.

- **Tensión Interfacial**

Es función de la cantidad de compuestos polares capaces de orientarse en la superficie de contacto del aceite y del agua. Estos compuestos pueden aparecer por contaminación con otros materiales o por reacciones de oxidación del aceite.

Este parámetro se reduce fuertemente al comienzo del proceso de envejecimiento del aceite, para luego estabilizarse en un valor bajo. Esta disminución se acompaña siempre de un aumento de las pérdidas dieléctricas y también del índice de neutralización, cuando la causa de la presencia de compuestos polares es la oxidación del aceite. Por tanto, en ocasiones, una baja tensión interfacial es síntoma de presencia de contaminantes.

- **Sedimentos y lodos**

Los aceites pueden contaminarse en servicio por partículas sólidas en suspensión, como fibras, óxidos metálicos, etc. Además, por oxidación del aceite se forman lodos que se depositan sobre las bobinas y núcleo del transformador y reducen el diámetro efectivo de los conductos de circulación del aceite, empeorando la refrigeración del transformador.

- **Punto de inflamación**

Indica la tendencia a la formación o existencia en disolución de gases inflamables a altas temperaturas. No debe confundirse esta temperatura con la de combustión que es muy superior. En un aceite en servicio, la reducción del punto de inflamación indica la presencia de contaminantes volátiles combustibles o de productos de degradación por efecto de temperaturas altas o descargas eléctricas en el aceite.

- **Policlorobifenilos (PCB) y policloroterfenilos (PCT)**

Los aceites minerales aislantes nuevos deben estar libres de PCB y PCT debido a que liberan toxinas que son mortales para el ser humano.

3.1.4 Envejecimiento aceite

El envejecimiento de aceite de transformador es una combinación de cambios en el líquido aislante que aparece durante la operación de un transformador.

Por lo general, su consecuencia es un deterioro de las propiedades físico-químicas del aceite y condiciones operativas del transformador. Al mismo tiempo, las características de calidad del aceite alcanzan los valores máximos permisibles, lo que indica un cercano fin de su vida útil. [36].

Es posible identificar varios factores que tienen la mayor influencia en los procesos de envejecimiento del aceite de transformador. Entre ellos, la oxidación de los hidrocarburos por el oxígeno del aire, la alta temperatura, la presencia de superficies metálicas, el impacto de un campo eléctrico, la aparición de agua y las impurezas mecánicas, etc.

La oxidación del aceite procede más intensamente bajo la influencia de un campo eléctrico. Este proceso va acompañado de una formación de agua en el aceite. El agua, a su vez, no solo reduce la tensión de ruptura del líquido aislante, sino que también en presencia de un arco eléctrico promueve la formación de más carbono. Además, la humedad aumenta la actividad corrosiva del aceite en relación con las partes metálicas del transformador. El agua acelera la degradación del aislamiento de celulosa y los procesos oxidativos en el aceite.

El efecto dañino del campo eléctrico es el flujo más acelerado de todas las reacciones químicas. Como resultado, las moléculas neutras del aceite se polarizan y se produce su compuesto activo con oxígeno. Esto aumenta aún más la oxidación del líquido aislante y aumenta la cantidad de lodo en el aceite.

Por otro lado, se debe prestar especial atención al número de ácido en el ensayo de acidez del aceite (normalmente no puede superar un valor de 0.25 mg de KOH/g), cuyo aumento es uno de los principales signos de envejecimiento del aceite del transformador.

A medida que aumenta el número de ácido, la agresividad del aceite aumenta y en la parte activa del transformador se acumulan los sedimentos, lo que reduce la resistencia del aislamiento y perjudica la transferencia de calor.

- Protección contra la oxidación y el envejecimiento

Para ralentizar el proceso de envejecimiento del aceite, el transformador puede equiparse con sistemas de protección adicionales como por ejemplo una película especial o nitrógeno. En el primer caso, el tanque de expansión está cubierto con una película especial. Con la expansión del aceite, se estira y excluye el contacto con gases externos. En el segundo caso, el transformador está completamente hermetizado, y el aire es reemplazado por nitrógeno seco. Con la expansión del aceite, el exceso de nitrógeno entra en un contenedor adicional.



Fig. 3.2 Envejecimiento del aceite

3.1.5 Degradación de aceite

La degradación del aceite de transformador se debe a condiciones de uso. En muchos casos, el aceite aislante está en contacto con el aire y sometido a las reacciones de oxidación que son aceleradas por las elevadas temperaturas y catalizadas por la presencia de metales.

En un estado de oxidación avanzado se puede producir un cambio de color, una formación de sustancias ácidas y/o la producción de lodo en el aceite, además de otros

tantos agentes contaminantes como el agua, partículas sólidas, productos polares solubles, etc. Como consecuencia de esto, pueden alterarse algunas propiedades dieléctricas del aceite de transformadores y provocar fallas en servicio.

El deterioro de los materiales constructivos (ejemplo: papel, pintura, etc.), que pueden inferir con el buen funcionamiento del equipo eléctrico y disminuir su vida útil de funcionamiento, pueden también determinarse estudiando las modificaciones de las propiedades del aceite de transformadores.

En aceites de transformadores nuevos, el valor del índice de neutralización es pequeño pero aumenta como resultado del envejecimiento por oxidación. Se utiliza como índice general que permite determinar la conveniencia del reemplazo o regeneración del aceite de los transformadores.

Los materiales sólidos comprenden los productos de degradación o de oxidación insolubles de los materiales aislantes sólidos o líquidos, de fibras de orígenes diversos, de carbón, de óxidos metálicos, etc. que resultan de las condiciones de explotación del equipo. La presencia de partículas sólidas puede reducir la rigidez dieléctrica del aceite de los transformadores, y además puede limitar los intercambios térmicos, favoreciendo así la continuación de la degradación de la aislación.

Los lodos en el aceite están constituidos por productos formados en un estado de oxidación avanzado y es una advertencia de la posible acumulación de depósitos en el equipo.



Fig. 3.3 Degradación de aceites

3.1.6 Humedad en aceite

El agua puede provenir del aire atmosférico o bien resultar de la degradación de los materiales aislantes. Para contenidos de agua relativamente bajos no se modifica el aspecto del aceite.

La solubilidad del agua en el aceite del transformador aumenta en función de la temperatura y del índice de neutralización (Fig. 3.4). Cuando el contenido de agua supera cierto nivel (valor de saturación), el agua no puede permanecer en solución y aparece el agua libre en forma de gotitas. El agua libre provoca una disminución de la rigidez dieléctrica y de la resistividad y un aumento del factor de disipación dieléctrica ($\text{tg } \delta$).

La cantidad total de agua en un transformador se reparte entre el papel aislante y el aceite teniendo una relación predominantemente mayor en el papel. Pequeñas variaciones de temperatura modifican sensiblemente el contenido de agua del aceite de los transformadores, pero levemente la del papel. Un alto contenido de agua en el aceite

de los transformadores acelera la degradación química del papel aislante y hace necesario la aplicación de medidas de corrección.

Casi toda el agua de un transformador se encuentra en la celulosa.

Durante la operación normal de los transformadores a diferentes cargas y diferentes temperaturas, parte del agua pasa de un lado a otro, entre el aceite y el papel. La presencia de agua en la parte sólida del aislamiento, incluso en concentraciones pequeñas, incrementa la tasa de envejecimiento, reduce la temperatura permisible de los puntos calientes en el transformador e incrementa el riesgo de formación de burbujas y el subsecuente fallo dieléctrico.

La humedad residual excesiva puede permanecer en algunos componentes aislantes masivos, en particular en la madera y el plástico o en materiales impregnados con resinas, que necesitan tiempos de secado más extensos, en comparación con el papel y el cartón prensado, por lo tanto, todos los materiales aislantes presentan distintos tiempos de secado. El mismo es prácticamente proporcional al inverso del cuadrado del grosor del aislamiento. Sin embargo, la estructura del material también es un factor importante; por ejemplo: el cartón prensado que tiene una alta densidad requiere de un tiempo de secado más largo que un cartón de menor densidad.



Fig. 3.4 Contenido de agua en aceite

3.1.7 Cortocircuito entre bobinas

Los devanados son una parte importante del transformador. Comúnmente hay dos bobinados, uno en el lado de baja tensión y otro del lado de la alta tensión. Estos devanados soportan estrés eléctrico, térmico y mecánico durante su funcionamiento y, por lo tanto, debido a estas tensiones se producen las fallas que culminan con agotamientos de bobinados o rupturas de los mismos.

En transformadores de baja tensión, es improbable que se produzca una ruptura del aislamiento entre vueltas a menos que la fuerza mecánica en el devanado debido a cortocircuitos externos haya causado la degradación del aislamiento, o el aceite aislante se haya contaminado por la humedad.

En los transformadores de potencia, las fallas dieléctricas ocurren en los devanados debido a pérdidas o ruptura de aislación entre vuelta y vuelta de cada bobinado (entre espiras), comúnmente debido a la alta corriente y voltaje que están muy por encima de los valores nominales de funcionamiento.

Por otro lado, los devanados de los transformadores son generalmente de cobre, por lo tanto producen pérdidas térmicas por efecto Joule. Estas pérdidas térmicas hacen puntos calientes en el devanado debido al mal mantenimiento o a la falta del mismo. Esto con el tiempo causa un gran desgaste y una disminución de la fuerza física del devanado hasta su punto de ruptura.

En consideración a las fallas mecánicas, las más comunes son distorsión, aflojamiento o desplazamiento de los devanados, las cuales resultan en la disminución del rendimiento del transformador. Las principales razones que causan estas fallas son las reparaciones

inadecuadas, mal mantenimiento, corrosión, fabricaciones deficientes, vibraciones, movimientos mecánicos dentro del transformador, etc.

Las fallas entre espiras son de gran interés para nuestro proyecto ya que exhibe puntos donde pueden ocasionarse DPs por falta de aislación entre vueltas de espiras.

A continuación se observan las figuras 3.5, 3.6 y 3.7 en la cuales se ilustran fallas en las espiras de los devanados debido a falta de aislación entre las mismas o a cortocircuitos.



Fig. 3.5. Cortocircuito entre espiras



Fig. 3.6 Cortocircuito entre espiras



Fig. 3.7 Devanado quemado por falla entre espiras

3.1.8 Cortocircuito entre bobina y partes metálicas

En general la ocurrencia de un cortocircuito entre bobina y una parte metálica en un transformador es poco común. Esto puede darse debido a contactos de partículas metálicas, o elementos exteriores al transformador como puede ser por ejemplo, herramientas o elementos utilizados en inspecciones internas previas del transformador.



Fig. 3.8 Partículas metálicas en transformador.

La influencia de las partículas de impurezas de hierro en el voltaje de ruptura del aceite del transformador fue estudiado por medición de la tensión de ruptura del aceite con partículas de diferentes concentraciones y tamaños. La distribución del campo eléctrico en el aceite aislante y la distorsión de campo causada por partículas de hierro fueron analizadas mediante una simulación [37].

Al comparar experimentos y resultados de la simulación, obtuvieron las siguientes conclusiones:

1) A mayor tamaño de impurezas, mayor influencia en el voltaje de ruptura del aceite aislante.

Al tener una mayor concentración de partículas de hierro en el aceite aislante, se produce una significativa disminución de la resistencia a la descomposición del mismo. Una importante conclusión del paper es que los resultados experimentales muestran que el voltaje de ruptura del aceite aislante es casi lineal con el valor numérico de concentración de partículas de impurezas de hierro.

2) El aceite aislante que contiene partículas de impurezas de hierro presenta voltaje de ruptura más bajo al utilizarse tensión continua. La razón principal puede explicarse ya que el puente de impurezas se puede formar más fácilmente, lo que resulta en una descomposición del aislamiento más veloz.

3) Al analizar los resultados de la simulación, se descubrió que la intensidad máxima del campo eléctrico y la no uniformidad del mismo entre los electrodos aumenta en proporción al aumento de la concentración de impurezas de hierro del aceite aislante. Además, ambos parámetros están positivamente correlacionados con el tamaño de las partículas de hierro.

3.1.9 Fallas de Bushing

Uno de los elementos fundamentales del transformador son los bushings, que como es sabido tienen como función interconectar los bobinados y las redes externas, como así también han de conducir la corriente y aislar el conductor a su paso a través de la tapa de la cuba del transformador y en caso de que el aislante sea aceite, asegurar la estanqueidad necesaria de mismo para evitar que se escape [38].



Fig. 3.9 Montaje de Aisladores

Se pueden establecer las siguientes clasificaciones [39-40]:

- Bornes con aislamiento sólido (tipo DIN).
- Bornes condensadores.

En los bornes con aislamiento sólido, el máximo gradiente de potencial se produce al paso del conductor por el orificio practicado en la tapa. Este gradiente lo soporta tanto la porcelana como el aceite existente entre ella y el conductor. De allí que actualmente no se utilicen para tensiones superiores a aproximadamente 50 kV de tensión máxima de red, puesto que, para tensiones más elevadas, el gran tamaño de la porcelana y la cantidad de aceite interpuesto las hacen prácticamente inviables.

Estos bornes, denominadas tipo “DIN”, están compuestas básicamente por los siguientes elementos:

- Un cable o varilla conductora elemento de unión entre el bobinado y la línea exterior.
- Un cuerpo de porcelana que envuelve a conductor aislándolo a su paso por la tapa.
- Una caperuza metálica dotada de un sistema de apriete, que mediante una junta anular semi-toroica de neopreno realiza un cierre hermético con la porcelana y evita la salida del aceite del transformador. La caperuza dispone de un orificio normalmente tapado con un tornillo roscado que permite efectuar el purgado de aire. Suele llevar también otro taladro roscado para alojar el descargador superior.

En algunos casos se coloca una brida metálica, que sirven de elemento de presión para mantener rígidamente unido el borne a la tapa del transformador.

Entre borne y la tapa se monta una junta (plana o toroidal) para asegurar la estanqueidad y evitar el derrame de aceite.

El aceite del transformador (excepto en transformadores de distribución del tipo “hermético de llenado integral”) debe bañar totalmente el espacio entre la parte interior de la porcelana y el conductor. Se dispone de un tornillo de purga que permita evacuar el aire que pueda quedar ocluido en el interior de la borne.



Fig. 3.10 Borne para transformador de media tensión tipo DIN

Para poder elevar el nivel de tensión en las líneas de transporte se requiere bornes para los transformadores de dimensiones adecuadas y fiables.

Esto dio lugar al desarrollo de los bornes tipo condensador (Fig. 3.11), cuyo el principio de funcionamiento está basado en reducir de forma progresiva el gradiente de potencial hasta hacerlo cero a su paso por el orificio de la tapa.

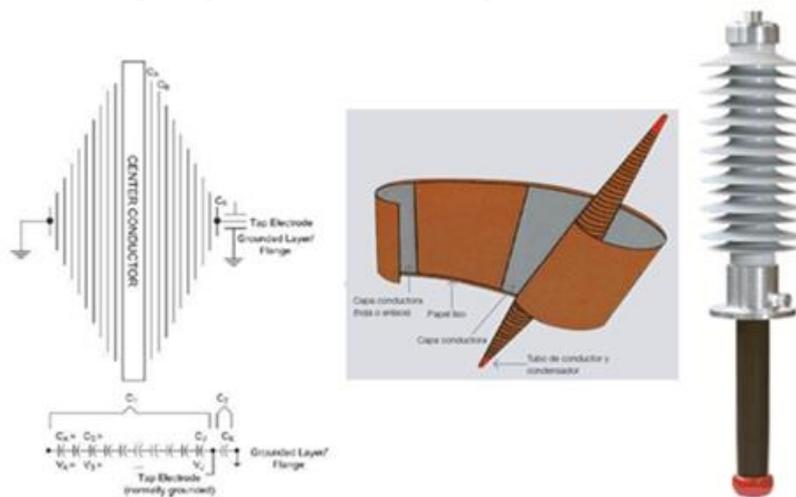


Fig. 3.11 Estructura de un borne con condensador

En la figura 3.12 a y b, se observa una comparación entre bornes sin condensador y borne con condensador.

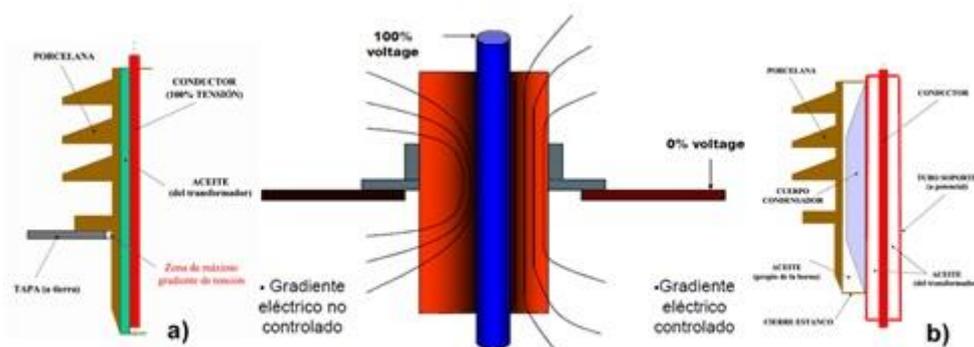


Fig. 3.12 a) Borne sin Condensador

b) Borne con condensador

Los bornes condensadores constan básicamente de los siguientes elementos:

- Cable o varilla conductora: por un extremo mediante un conductor, se une al bobinado y por el otro se conecta a una pieza metálica terminada en un perno externo para efectuar la conexión a la línea exterior con un conector de presión. Generalmente se utiliza varilla rígida para intensidad de corriente superiores a 800 A. Esta varilla termina en un deflector, elemento metálico de forma redondeada y puesto a potencial con objeto de uniformizar el campo eléctrico en torno a la unión.

En este último caso, la unión del cable del bobinado al borne queda dentro de un receptáculo.

- Condensador: Bobinado sobre un tubo metálico puesto a potencial y que rodea al conductor (cable o varilla).
- Cuerpo de porcelana o silicona que envuelve al condensador protegiéndolo y haciendo rígido el conjunto y bañado por aceite propio. Incorpora una brida metálica como elemento de unión a la tapa del transformador.
- Carcasa: Sirve como depósito conservador para la expansión del aceite del borne; generalmente dispone de un indicador de nivel y un tapón para relleno del aceite propio del borne. Este mismo orificio (situado en la parte superior de la carcasa) sirve para la verificación del nivel de aceite cuando ésta carece de nivel.
- Toma capacitiva: Dispositivo que permite (a voluntad) el conectar o desconectar a tierra la última capa del condensador con objeto de verificar el estado del aislamiento del mismo. Consiste en una pequeña caja dentro de la cual se ubica un terminal unido internamente al condensador; un tapón roscado (o atornillado) a la caja, protege al terminal y lo pone a tierra mediante una pinza interna. Para efectuar medidas de aislamiento y capacidad se desmonta el tapón quedando entonces el terminal libre y a la vista, y por tanto el condensador aislado y dispuesto para medidas.

En cuando al aislamiento del condensador puede ser de tres tipos:

- RBP (resin-bonded paper): para el condensador de estos bornes se utiliza papel tratado con resina (papel bakelizado). Durante la fabricación del bobinado del condensador se da calor al conjunto con objeto de conseguir la polimerización de la resina que impregna el papel.
Actualmente los bornes de este tipo han dejado de fabricarse, aunque existen muchas unidades aún en servicio.
- RIP (resin impregnated paper): son aquéllas en las que se utiliza papel sin tratamiento alguno, y posteriormente una vez finalizado el bobinado sufren un proceso de impregnación y secado en resina bajo vacío.
- OIP (oil-impregnated paper): este tipo utiliza igualmente papel sin tratar, y finalizado el bobinado tras un cuidadoso secado se impregna de aceite también bajo vacío.

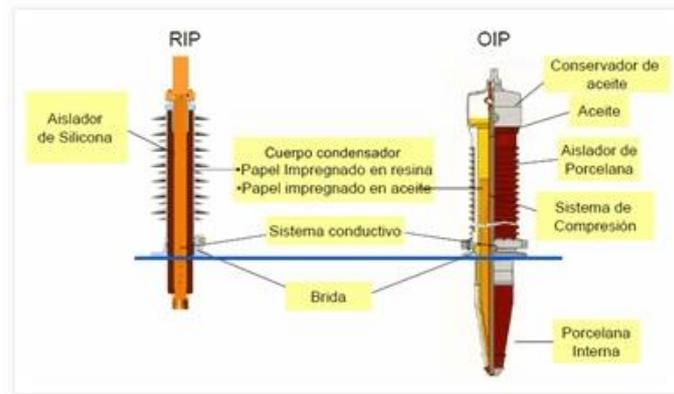


Fig. 3.13 Comparación constructiva de pasatapas RIP Y OIP

A continuación se muestran algunas de las fallas más comunes de bushings:

- Aflojamiento de los conductores causado por vibraciones en el transformador, lo que resulta en un sobrecalentamiento del mismo. Esto daña al papel aislante y al aceite.
- Una súbita subida de voltaje, la cual genera una descarga parcial que daña el bushing y causa una ruptura en cuestión de horas.
- Ruptura en los sellos del bushing que se originan por la presencia de agua, desgaste o pérdidas dieléctricas excesivas.
- Largo periodo de tiempo de funcionamiento del aceite y el no reemplazo del mismo.

3.1.10 Fallas del Cambiador de Tomas (TAP)

Los primeros usos de los cambiadores de toma de carga datan de 1926, año en el que el Dr. Jansen comienza a realizar diferentes estudios al respecto.

El Dr. descubrió el funcionamiento de los cambiadores de toma de carga al conectar resistencias óhmicas por medio de contactos a las tomas de un arrollamiento para que los cambios de voltaje se realizaran sin interrupción.

A partir de 1930 comenzaron a fabricarse cambiadores de toma de carga para transformadores de potencia [41].

La función de un cambiador de tomas en el transformador es regular el nivel de voltaje. Esto se hace al añadir o remover vueltas del devanado secundario del transformador. Es la parte más compleja y una de las más importantes del funcionamiento de los transformadores.

Los cambiadores de toma de carga son muy resistentes al paso del tiempo, lo cual no quiere decir que lo aguanten todo. El cuidado que requiere esta maquinaria es mínimo pero deben darse unas garantías suficientes de mantenimiento para evitar que los cambiadores de toma de carga se estropeen.

La reparación de un cambiador de toma de carga es altamente costosa, por eso es recomendable no llegar a esa situación.

Un cambiador de tomas típico de transformadores de potencia proporciona una regulación del orden del $\pm 10\%$, en pasos de 0,625% o 1,25% de la tensión nominal.

Dentro de los cambiadores de toma de carga, tenemos los siguientes elementos:

- Selector de tomas o preselector.
- Ruptor.
- Cabezal del cambiador

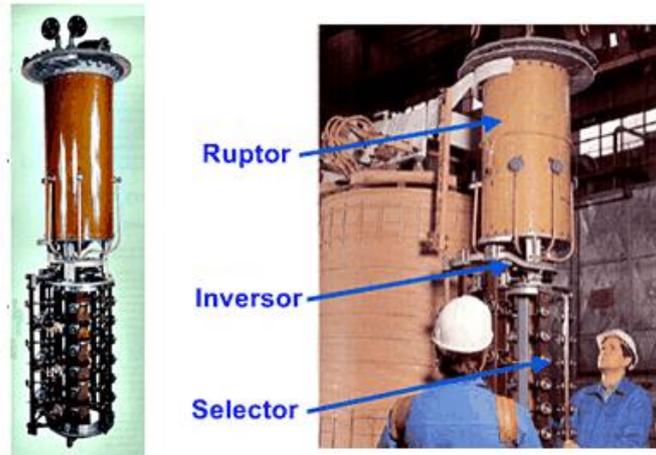


Fig. 3.14 Partes del cambiador de tomas

- Selector de tomas

Este dispositivo, como su nombre lo indica, realiza la selección de dos tomas a conmutar a través de dos contactos móviles. Cada una tiene una tensión determinada, aumentada o disminuida en la tensión equivalente al número de espiras conmutadas. El primero conecta la toma en la que se encuentra trabajando el transformador (toma en servicio), mientras que el otro es el encargado de seleccionar la toma en la que se desea que el transformador funcione (próxima toma a conectar).

El selector es una de las piezas más importantes porque prepara en el conductor de tensión, sin corriente, el ajuste escalonado antes de que el conmutador bajo carga realice el cambio de una posición a otra.

El selector se encuentra alojado en la cuba del transformador unido de forma rígida al arrollamiento. Este es recorrido por la corriente pero no la interrumpe y es utilizado conjuntamente con el ruptor. Normalmente este dispositivo va sumergido en el aceite del transformador.

Puede incorporar un preselector que conecta el devanado principal con el devanado de regulación de forma aditiva o de forma sustractiva, permitiendo duplicar el número de toma virtual respecto a las reales que pueden trabajar. De esta manera, se reducen costos en la fabricación del transformador.

- Ruptor

El ruptor es el elemento que efectúa la transferencia de intensidad de carga desde la toma en servicio a la próxima toma seleccionada sin interrumpir el servicio. El movimiento del dispositivo (basculante o rotatorio según tipos) se consigue mediante la actuación de un juego de resortes.

El ruptor está unido a la cabeza del cambiador de tomas bajo carga, de manera que forma un único cuerpo extraíble para efectuar las operaciones rutinarias de mantenimiento.

El mismo se encuentra inmerso en un depósito de aceite independiente de la cuba del transformador, para evitar contaminarlo debido a la degradación que sufre el aceite durante el proceso de conmutación. En este depósito se encuentran los siguientes elementos del ruptor:

- Juego de contactos principales: Conducen la corriente de paso. Entre ellos y el bobinado de regulación no hay resistencias de paso y no cortan ninguna corriente.

- Juego de contactos de paso: Son conectados en serie a un juego de resistencias de paso. Establecen y cortan la corriente.
- Impedancia de paso: Resistencia o reactancia que comprende uno o varios elementos que puentea la toma en servicio con la siguiente que va a ponerse en servicio, a fin de transferir la carga de una toma a otra sin interrumpir la corriente de carga ni modificarla sensiblemente, limitando al mismo tiempo la corriente de circulación durante el tiempo en que las dos tomas están siendo utilizadas.

El cambio de tomas bajo carga se inicia al operar el accionamiento a motor. Este proceso de cambio de tomas, se finaliza forzosamente, independientemente de que durante el tiempo de marcha se apliquen nuevos impulsos de control.

- Cabezal del Cambiador

Es el elemento generalmente situado sobre la tapa del transformador, y que sirve de soporte al selector de tomas y al ruptor.

Dispone de una serie de bridas de conexión que sirven para la conexión de la cabeza con el tanque de expansión de aceite, vaciado y filtrado de aceite del cambiador de tomas bajo carga y para la toma de muestras de gases que se producen en cada operación como consecuencia de la descomposición del aceite por el arco.

- Proceso de conmutación

La conmutación está compuesta de dos pasos fundamentales, selección e interrupción de toma. Este proceso tiene una duración que varía entre los 5 y 7 segundos, dependiendo del tipo de conmutador.

El selector y el mecanismo acumulador de energía en conjunto son los primeros elementos en moverse al recibir la orden de cambio de toma. Casi todo el tiempo de duración del proceso de conmutación es invertido en cumplir este primer paso.

Finalizando el paso anterior, se libera la energía acumulada en los resortes del acumulador de energía, dando lugar a la operación del ruptor, donde se produce el cambio de toma propiamente dicho con una duración aproximada de 40 ms. A este subproceso se lo denomina interrupción.

El cambiador de tomas bajo carga está diseñado para que el subproceso de interrupción se realice en el menor tiempo posible, debido a las altas temperaturas que provocan los arcos eléctricos de corriente. Es por eso que el ruptor del cambiador de tomas generalmente se encuentra sumergido en aceite con un coeficiente dieléctrico suficiente para atenuar el arco eléctrico y minimizar el desgaste de contactos eléctricos.

Si durante la etapa de interrupción existe un instante en el cual ninguna toma queda conectada, la línea de salida quedaría sin tensión, lo cual no es deseable. Si tocara dos tomas simultáneamente se produciría un cortocircuito en un cierto número de espiras, originando una corriente de circulación muy importante y de gran magnitud.

Algunas causas comunes de los problemas del cambiador de tomas bajo carga son:

- En una falla run-through, el cambiador de tomas presenta un delay de tiempo antes de producir un cambio en el número de vueltas del devanado. Esto puede deberse al relé que tiene residuos del aceite contaminado, por lo que toma un mayor tiempo en realizar el cambio. Otra causa puede ser es el desgaste del resorte en el tiempo.
- Falta de mantenimiento que deriva en una desincronización de la conexión de eje entre el grifo y selector de tomas ocasionando que el cambiador de tomas no esté en su correspondiente lugar.
- Condensadores viejos y desgastados en el motor controlador, lo que hace que el cambiador falle al momento de controlar la dirección de movimiento.

- Uso regular que desgasta el resorte y lo hace más frágil hasta el punto de romperse. Por ello, el cambiador no puede cambiar la proporción de las vueltas del devanado.
- Descompostura del motor en el cambiador debido a un voltaje excesivo.

3.1.11 Fallas del Núcleo

Los núcleos de los transformadores modernos aún mantienen las características básicas desarrolladas hace aproximadamente 90 años (láminas de hierro delgadas y planas).

El núcleo ha sido fabricado de acero porque este material lleva y confina el flujo magnético mucho mejor que el aire, así la permeabilidad del acero es una medida del número de veces que es mejor conductor del flujo magnético que el aire. La tecnología en marcha ha traído mejoras en calidad en términos de acero para el núcleo, diseños de núcleo, y técnicas de fabricación.

El material ideal para el núcleo (minimizando las pérdidas por histéresis) no debe producir fricción entre las partículas moleculares magnéticas, a medida que el campo magnético continuamente cambia su dirección. Para minimizar las corrientes parasitas, el material de laminación debe hacerse tan delgado como sea posible, sin embargo, el espesor no debe ser reducido más allá de cierto punto porque las laminaciones se volverían muy débiles mecánicamente.

En un principio se utilizó hierro dulce, pero el calor por la fricción hizo estragos durante la temprana vida de los transformadores. Posteriormente se encontró que al agregarle al acero pequeñas cantidades de silicio se minimizaban las pérdidas por fricción conocidas como histéresis. En 1935 se descubrió que con un porcentaje de 3% de silicio y un laminado en frío y un recocido a altas temperaturas se reducían las pérdidas totales del núcleo, debido a la orientación de los granos en sentido paralelo al material (alta permeabilidad y bajas pérdidas por histéresis) [42]. En cuanto a aislamiento, antiguamente se revestían de barniz. Hoy en día la mayoría utiliza aislamientos inorgánicos.

El núcleo laminado de acero está rodeado por los devanados y su función es concentrar el flujo magnético. Una mínima descompostura en las láminas resulta en un incremento en la energía térmica [38]. Los efectos que podrían darse por un sobrecalentamiento excesivo son:

- Devanados dañados debido al alcance del sobrecalentamiento a la superficie del núcleo.
- Daño en el aceite del transformador. Esto genera gases indeseados que puede afectar y ocasionar fallas de aislación dentro del transformador.

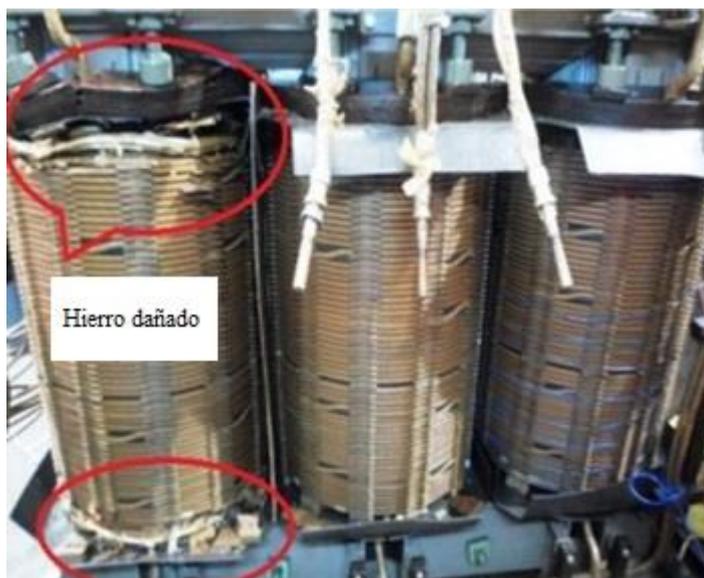


Fig. 3.15 Falla en núcleo. Hierro dañado.

3.1.12 Falla en el tanque

La función del tanque es contener el aceite utilizado para aislamiento y refrigeración de los transformadores.

Una falla en el tanque ocurre cuando existe algún tipo de estrés ambiental, grandes porcentajes de humedad o excesos de radiación solar.



Fig. 3.16 Fuga de aceite de un transformador corroído.

Todo lo anterior puede generar grietas o filtraciones en las paredes del tanque por el que el aceite podría escaparse [38]. Las consecuencias esta acción puede ser:

- Reducción de aislamiento en el transformador y daños en los devanados.
- Sobrecalentamiento y daños en otras partes del transformador

El tanque debe estar limpio. Sus juntas no deben presentar signos de envejecimiento y se debe corregir de inmediato cualquier fuga de aceite que manifieste.

Se debe revisar que no existen rastros de carbón en el interior del tanque y que tampoco presente señales de "abombamiento", ya que si se advierten las mismas, se deberá desconectar el transformador y tratar de determinar las causas que lo hayan generado.

Por lo tanto, se suele realizar inspecciones tanto internas como externas con el fin de prevenir futuras fallas incipientes que terminen con la vida útil del transformador [43].

Inspección Externa: Las fotografías son una parte esencial de la inspección externa, las cuales ayudan a armar un futuro informe del estado externo del transformador (Fig. 3.17).

Generalmente, en la inspección externa se buscan las siguientes anomalías visibles en el transformador:

- Pandeo o ruptura del tanque externo
- Evidencia de derrame de aceite o de fuego
- Evidencia de la operación de la válvula de alivio de presión
- Daños en bushings o en descargadores
- Bajo nivel de aceite en el tanque principal
- Daños en el tanque de expansión
- Evidencia de sobrecalentamiento (pintura ampollada, etc.)
- Evidencia de objetos extraños o contacto con animales
- Evidencia de vandalismo o de sabotaje
- Daños en cabina de comando



Fig. 3.17 Inspección Externa de transformador.

Inspección Interna: En muchas ocasiones puede haber muy poco para observar externamente, por lo que se requiere hacer una inspección interna dentro del transformador. En ciertas ocasiones el transformador se vacía por completo, mientras que en otras el aceite se baja lo suficiente el nivel de aceite como para exponer la parte superior del núcleo y el conjunto de la bobina.

Antes de ingresar al tanque, se deberán observar todas las reglas de seguridad correspondientes. En muchos casos, el tanque del transformador es considerado como espacio confinado, por lo que deberá de seguirse el protocolo correspondiente a espacios confinados. El tanque deberá ser ventilado a la atmosfera para eliminar todos los gases posibles que pueda contener dentro. Los gases combustibles dentro del tanque son más pesados que el aire, por lo que presentan peligro de asfixia. Se recomienda utilizar un monitoreo calibrado de espacios confinados durante toda la operación interna, de esta manera si el mismo indica bajo nivel de oxígeno, toda persona que se encuentre dentro del tanque deberá evacuarlo.

Previo al ingreso dentro del tanque, todo personal deberá remover todo ítem personal que lleve consigo para el ingreso (joyas, billeteras, peines, etc.)

Los únicos elementos permitidos dentro del tanque son cámaras fotográficas, lapiceras, papel, y luz flash. Estos artículos deben registrarse antes de entrar y luego verificarse después de salir del tanque. Es posible encontrar cualquier cosa dentro del tanque del transformador, incluyendo destornilladores, alicates, varillas de soldadura, anteojos de seguridad, etc., pertenecientes a descuidos de equipos de trabajos anteriores.

Algunas anomalías que se miran dentro del transformador son:

- Olor de aislamiento quemado
- Apariencia del aceite del transformador (más oscuro se traduce como peor estado)
- Evidencia de depósitos metálicos
- Evidencia de material de aislación roto
- Daño físico interno
- Desplazamiento de bobinas
- Evidencias de arcos eléctricos entre bobinas
- Evidencias de actividad de descargas parciales
- Evidencia de agua en el fondo del tanque (el agua es más pesada que el aceite, por lo que se depositara en el fondo del tanque)

Si la inspección interna no provee suficiente información para determinar las causas de fallas, puede ser necesario descargar el tanque del transformador y realizar un desmontaje del mismo para buscar el daño y las pistas que solucionen los inconvenientes.



Inspección interna en transformador (Fotografía sacada de la página de empresa VOLTRAFO)



Inspección interna en transformador de 70 MVA (Fotografía sacada de la página de empresa VOLTRAFO)



Inspección interna en transformador (Fotografía sacada de la página de empresa VOLTRAFO)



Inspección interna en transformador de 75 MVA (Fotografía sacada de la página de empresa VOLTRAFO)

3.1.13 Falla en el sistema de protección

La función principal del sistema de protección es resguardar al transformador de cualquier falla al detectarla y resolverla lo más rápido posible. Si no es posible, entonces la aísla para evitar daños mayores.

Sus componentes son el relé buchholz, la válvula de alivio de presión, protección contra sobrecargas y el relé de presión súbita [38].

A continuación, se describen los componentes de protección más importantes y las fallas que pueden ocasionarse si los mismos no actúan de manera correcta.

El relé buchholz [44] se emplea en los transformadores de potencia que emplean aceite como medio refrigerante y tienen tanque conservador (depósito de expansión).

El mismo permite detectar las fallas en el interior del transformador por lo que la protección del transformador se puede complementar con otros elementos que detecten también fallas externas al mismo.

El principio de operación del relé buchholz se basa en el hecho de que cualquier falla que se origina en el interior de un transformador de potencia está precedida por otros fenómenos a veces no perceptibles pero que a medida que transcurre el tiempo pueden provocar fallas más graves que eventualmente producen daños severos al transformador, por lo que resulta importante detectar las fallas incipientes y enviar señales de alarma acústica o bien óptica sin que necesariamente se envíe una señal de disparo al interruptor que deje fuera de servicio al transformador.

Las fallas más importantes que pueden ser detectadas por un relé buchholz son las siguientes:

a) Cuando alguna conexión interna en cualquier parte de los devanados del transformador exhibe una discontinuidad eléctrica momentánea, se produce un arco eléctrico que puede alargarse si se produce la fusión de los conductores y transmitirse a otras partes de los devanados pudiéndose provocar un cortocircuito severo que cause daños muy graves al transformador. El arco eléctrico inicial en presencia del aceite refrigerante del transformador produce gases que se manifiestan como humo y los mismos son captados por el relé. El relé advierte la situación y saca manda una señal de alerta.

b) Cuando se produce una sobrecarga brusca o cortocircuito, éste se manifiesta como un fuerte aumento en la temperatura de las capas interiores de los devanados hacia el exterior de manera tal que el aceite refrigerante que se encuentra en contacto con las bobinas se volatiliza y se descompone. Los gases producto de esta descomposición circulan hacia el exterior de los devanados produciendo burbujas que rechazan la correspondiente cantidad de aceite traduciéndose esto como una fuerte circulación que normalmente es detectada por el relé buchholz.

c) Las fallas del aislamiento a tierra se traducen en un cortocircuito de fase a tierra con presencia de un arco eléctrico que volatiliza y descompone el aceite siguiendo el mecanismo de circulación de aceite por las burbujas de gas en el interior del transformador y que debe ser detectada por el relé buchholz.

Estas fallas del aislamiento de los devanados a tierra, frecuentemente son producidos por sobretensiones atmosférica o por maniobras de interruptores en ciertas condiciones de operación del transformador o la red, por lo que la protección contra este tipo de sobretensiones es un aspecto que debe ser considerado con suma importancia en la parte de los diseños de instalaciones relacionadas con protección del equipo eléctrico contra sobretensiones.

d) La descomposición química del aceite se puede presentar por diferentes circunstancias que van desde mala calidad del mismo hasta sobrecargas continuas. El proceso de descomposición trae como consecuencia la producción de gases por las

descargas que en principio puede ser flujos de electrones, pero que posteriormente se pueden traducir en arcos eléctricos que a su vez producen una mayor cantidad de gases que debe ser detectado con el proceso descrito en anterioridad por el relé buchholz.

En todos los caso, un bajo nivel de aceite provoca que el relé entre en acción aunque no exista un desperfecto. Esto significa un desperdicio de energía y por lo tanto es una falla en el sistema de protección.

La válvula de alivio de presión impide que el transformador explote debido a la acumulación de presión del gas, la cual se produce por el sobrecalentamiento del aceite. Si el resorte falla, la válvula no podrá liberar la presión correctamente, por lo que podría ser peligroso. De igual manera tendríamos un problema si la presión se acumula rápidamente, ya que el proceso de liberación es lento.

La protección contra sobrecargas permite que una magnitud específica de voltaje vaya al transformador, lo que evita una subida excesiva. Una falla significa la entrada de una gran carga de voltaje a los devanados y un posterior daño. Humedad, calor, y corrosión son las principales razones de una descompostura.

El relé de presión súbita protege al transformador de explotar debido a un posible incremento exponencial de la presión del gas. La humedad puede afectar su circuito interno.

3.1.14 Falla en el sistema de refrigeración

El sistema de refrigeración reduce el calor en el transformador debido a las pérdidas de cobre y hierro. El sistema contiene ventiladores, bombas de aceite e intercambiadores de calor enfriados hidráulicamente. (Fig. 3.18).



Fig. 3.18 Ventilación forzada en un transformador de potencia.

Cuando el transformador está funcionando bajo carga, las pérdidas de energía en el circuito magnético y los devanados se convierten en calor y la calefacción puede dañar el aislamiento. Es muy importante controlar cuidadosamente la temperatura dentro del transformador para evitar el sobrecalentamiento y un posible incendio en el lugar.

El componente principal del sistema de refrigeración de transformadores es el aceite. La liberación de calor de los devanados y del circuito magnético se produce en una secuencia tal, desde el metal caliente hasta el aceite y desde el aceite, hacia el exterior.

El proceso de refrigeración de transformadores se puede dividir en dos partes: refrigeración de transformadores interna y externa. Cada parte requiere una solución técnica. En el primer caso, todo el sistema (tubos, canales, etc.) está dentro del transformador y no es visible desde el exterior. En el segundo caso, todos los elementos

(filtros, ventiladores, bombas, etc.) son externos y pueden recibir un servicio sistemático.

Una falla causa un incremento de calor y acumulación de presión del gas, lo cual podría desencadenar en una explosión.

A continuación se citan algunas de las fallas más comunes en el sistema de refrigeración:

- Filtraciones en las bombas de aceite y agua. Esto da como resultado una reducción de los fluidos y un bajo intercambio de calor. Las filtraciones pueden ocurrir debido al estrés ambiental, corrosión, humedad y radiación solar.
- Descompostura de los ventiladores. Estos pueden fallar si no hay un buen mantenimiento o si existe un desgaste en los motores.
- Un termostato defectuoso también representa un problema debido a las malas lecturas que proporcionan

Métodos de Refrigeración de Transformadores

Los transformadores con una potencia de hasta aproximadamente 16.000 kVA se enfrían naturalmente [45]. Los tanques de dichos transformadores son lisos, con tubos de enfriamiento y radiadores tubulares. El aceite transfiere el calor de los núcleos magnéticos y los devanados del transformador al medio ambiente.

El movimiento natural del fluido es causado por la diferencia de densidad a altas y bajas temperaturas, que causa la convección. El calor acumulado en la parte superior del radiador se transmite al medio ambiente en parte por la radiación, en parte por la convección del aire. La temperatura máxima del aceite a carga normal no debe exceder los 95 °C.

La refrigeración de transformadores con soplado forzado y circulación, se usa en transformadores con tensiones más elevadas. El sistema incluye varios radiadores externos con ventiladores de enfriamiento de aire instalados en las paredes del tanque y tubos acostillados con bombas eléctricas. Los ventiladores absorben aire del fondo y lo dirigen a la parte superior de las tuberías, enfriando el aceite caliente. Las bombas ingresan líquido a través de los tubos a alta velocidad. Con un fuerte flujo de aire y una gran área de superficie, dichos enfriadores son compactos y eficientes.



Fig. 3.19. Válvula en transformador.

La pureza y calidad del aceite de los transformadores debe cumplir con ciertos requisitos y parámetros estándares que son:

- Ausencia de azufre y ácido, que pueden dañar el aislamiento del transformador.
- Liberación efectiva de calor de los circuitos magnéticos y bobinados. El aceite debe tener una alta capacidad de calor y conductividad térmica.
- La viscosidad del aceite también es muy importante, varía con la temperatura. Los potentes transformadores están llenos de aceite, que puede cambiar rápidamente la viscosidad a medida que cambia la temperatura
- Alta tensión de ruptura. La tensión de ruptura del aire suele ser de 30 kV/cm, pero para un transformador este parámetro es de 150 kV/cm. La tensión de ruptura depende del contenido de humedad del aceite. El aceite debe estar lo más seco posible.
- El polvo y otras impurezas, como los gases, también pueden reducir la tensión de ruptura del aceite
- Alto punto de inflamación, muy por encima de la temperatura de funcionamiento del transformador, previene posibles incendios. El límite inferior de la temperatura de ignición del transformador es de 150°C. El líquido aislante debe tener un punto de inflamación de al menos 180°C. El aceite de transformador es un líquido inflamable, por lo tanto, se deben tomar medidas de seguridad contra incendios.

CAPITULO 4 - Metodología de END de EA

4.1 Introducción

Este capítulo se basa en el sustento bibliográfico del libro fundamentos de la emisión acústica del Ing. Martin P. Gómez [46].

Se entiende por Emisión Acústica (EA) a las ondas elásticas que se generan en un material cuando se ejercen ciertas acciones sobre él.

En algunos casos, dependiendo del tipo de material y del proceso emisor, la detección de las ondas elásticas se realizará escuchando el sonido emitido, tal como en la rotura de un papel, vidrio o madera y detectando con la audición las ondas emitidas, infiriendo la rotura o el proceso que ocurre en el material.

Existen dos casos en la que la detección acústica no es sencilla, debido fundamentalmente a dos razones que dependen fuertemente del material, que son: si la intensidad de la onda es muy baja y si la frecuencia de la onda es mayor que la audible. Esto es lo que ocurre en la mayoría de los casos de EA estudiados en la actualidad, dado que se aplica principalmente a materiales como los metales, en los cuales los fenómenos de emisión ocurren con amplitudes muy pequeñas y a frecuencias situadas en el rango de los ultrasonidos, desde un poco más allá de la región audible hasta unos pocos MHz. Más allá del audible, se hace imprescindible un dispositivo que permita captar las ondas elásticas, las registre, las procese y las muestre en algún formato conveniente. Ese dispositivo se denomina sistema de EA.

La emisión acústica puede generarse en principio por cualquier mecanismo que convierta alguna forma de energía, en energía elástica que se propagará por un medio. La energía involucrada por la fuente de ondas puede ser: mecánica, electromagnética, química, térmica, u otras. Entonces, una Fuente de EA convierte las energías mencionadas en ondas elásticas. Esta liberación de energía ocurre de manera estocástica, en un proceso que se denomina Evento de EA.

En el caso de los metales, se pueden citar entre los mecanismos de emisión de ondas elásticas a aquellos procesos que involucran a la degradación de los mismos tales como: la deformación plástica, el crecimiento de fisuras, degradación de superficies, etc. Otros procesos sin degradación, también llamados reversibles, también producen emisión acústica. Estos pueden ser por ejemplo: procesos tribológicos (fricción entre superficies), transformaciones de fases cristalográficas, fusión o solidificación, etc. En no metales también ocurre la EA por degradación, por ejemplo, procesos muy distintos entre sí como la rotura de maderas o pérdidas en dieléctricos (en transformadores).

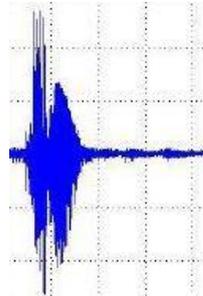
En materiales compuestos igualmente hay procesos que emiten EA de manera irreversible (con degradación) tales como: la fisura de la matriz, el despegado, la rotura de fibras, la rotura de recubrimientos.

4.1.2 Señales de Emisión Acústica

El sistema de EA se basa en la conversión de las ondas elásticas generadas en el material, en señales eléctricas, denominadas señales de emisión acústica, por medio de un transductor o sensor que habitualmente está constituido por un cristal piezoeléctrico. Las señales eléctricas o de EA luego serán preamplificadas, filtradas, detectadas, amplificadas y procesadas para ser estudiadas de diversas maneras con el fin de extraer información relevante de los procesos y/o del material.

Las señales de EA se clasifican en dos tipos: las señales tipo explosión y las señales de tipo continuo. Las primeras son pulsos transitorios de mayor o menor duración según el fenómeno que las produzca y las características del medio en el cual se propagan. Estas tienen un comienzo y un final. Las otras como su nombre lo indica no tienen comienzo

ni final. En los procesos que generan la EA pueden superponerse ambos tipos de señales. Como ejemplo de cada tipo de señales se pueden mencionar a la deformación plástica o la fricción como fuentes de señales de EA tipo continua, mientras que la fisura, la corrosión o las transformaciones martensíticas pueden dar señales tipo explosión.



a) Señal tipo Explosión



b) Señal tipo Continua

4.1.3 Breve reseña Histórica de Emisión Acústica

Históricamente, se comienza con la denominada “pre-científica”, etapa en la cual se utilizan las ondas elásticas emitidas por un material para obtener información del estado del mismo.

Luego, en la etapa científica se busca comenzar a conocer características del fenómeno para descubrir su fundamento y propiedades. Las piezas metálicas más antiguas se remontan aproximadamente al año 2650 aC, siendo las primeras experiencias de EA con estaño puro. Sin embargo en otros materiales podría ser aún más antigua.

El primer documento escrito sobre la EA en metales se debe a Abu Musa Yabir al-Sufir Hayyan (721-815), quien escribe que el estaño emite un fuerte sonido o ruido, cuando es deformado; y también describe algo similar con el hierro cuando el mismo es enfriado, luego de la forja

En 1540, menciona las aleaciones de plomo y estaño diciendo que el ruido que emiten (cuando es deformado) es una forma de reconocerlas, agrega que esto ocurre más con el estaño que con otros metales.

En 1640, en Madrid, el sacerdote español Álvaro Alonso Barba escribe un capítulo en su libro “El arte de los metales” dedicado a la caracterización de los metales, y cuando se refiere al estaño, expresa: “Se produce un estridor cuando se lo muerde o quiebra”. Este fenómeno es un ejemplo emblemático de la EA pre-científica, conocido como “grito del estaño”, sonido producido por este material al deformarlo. Esta propiedad fue utilizada en el pasado por ejemplo para determinar si una moneda era falsa (en general se les agregaba estaño), deformándola al morderla; si generaba un sonido o una vibración en los dientes indicaría su falsedad. Este sonido o vibración es producido por un fenómeno llamado maclado que produce EA.

Luego, entre la edad media y el siglo XX continúa una extensa lista de antecedentes sobre la primitiva EA en diversos metales hasta que en el año 1933, en Japón, Kishinoue estudió la emisión de ondas elásticas de una varilla de madera, cuando se la sometía a una tensión flexural, utilizando como transductor una cápsula de fonógrafo.

Se suele identificar como hito histórico que determina a la EA como una disciplina científica, al trabajo que desarrolló en 1950 en Alemania, Joseph Kaiser en su tesis doctoral sobre “Estudios del Fenómeno Acústico en Ensayos de Tracción” donde demostró que la emisión acústica podía ser detectada en los metales, entre ellos

aluminio, cobre, plomo, acero y cinc sometidos a esfuerzos de tracción. Utilizando detectores piezoeléctricos, un amplificador de alta ganancia y la presentación en osciloscopio pudo probar que la emisión se producía en forma de impulsos aleatorios de corta duración y de amplitud de hasta 4 órdenes de magnitud por debajo de la observada en el grito del estaño. Sin embargo el trabajo no tuvo una gran relevancia hasta la década siguiente.

En 1966 se hizo en USA lo que se conoce como la primera aplicación de la emisión acústica como técnica de Ensayo No Destructivo (END). Se trató del control del crecimiento de los defectos durante la prueba hidrostática de las cámaras de los misiles Polaris, intentando, al mismo tiempo, predecir el momento del fallo antes de su destrucción.

En los últimos años, gracias a la irrupción de los ordenadores se reduce el coste y surgen nuevas oportunidades de desarrollo. A mediados de los 90 la EA se aplica ampliamente en la industria petroquímica y aeroespacial.

Actualmente la EA es un método fiable para el control de daños en estructuras, el aumento de su popularidad es debido en parte a los avances en los equipos, especialmente en el aumento de la velocidad de adquisición. Además actualmente se ha abierto un nuevo enfoque ya que hay una transición a un análisis de las señales de EA basado en la forma de onda y no sólo en algunas características de la señal.

4.2 Propagación de las ondas elásticas

Los fundamentos sobre la propagación de ondas elásticas que se describen a continuación se basan en las ecuaciones lineales de elasticidad de los medios materiales. Esto es una extensión de la ley de Hooke a tres dimensiones. Las ondas elásticas en general son producidas por una perturbación y viajan por el medio hasta el detector.

Como parte de la introducción de este capítulo, en las Fig. 4.1 y 4.2 se muestran ondas sísmicas medidas por el canal vertical de un sismógrafo de período corto, y si no se aclarara esto, un lector apresurado podría suponer por su semejanza que estas podrían estar representando una señal de EA tipo explosión en la Fig. 4.1 y una señal continua en la Fig. 4.2.

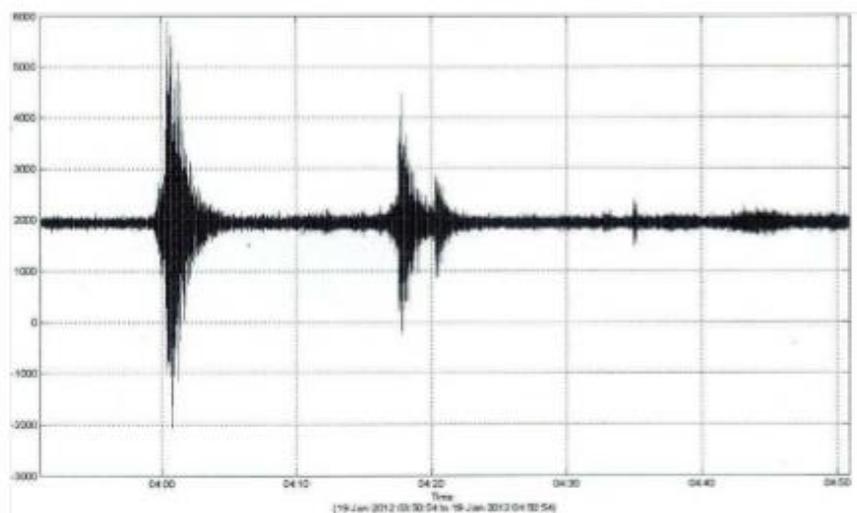


Figura 4.1. Cuentas de amplitud en función del tiempo del canal vertical de un sismógrafo registrando la liberación de energía en un sismo.

La analogía en las señales está relacionada por las similitudes en cómo se generan, propagan y miden ambas familias de ondas, que corresponden a muchos órdenes de magnitud de diferencia en sus dimensiones espaciales y temporal. En general, la sismica considera fenómenos relacionados con tamaños medidos en kilómetros (o mayores), mientras que los fenómenos de la EA están en el orden de magnitud de los milímetros (o menores). Ese dimensionamiento espacial está relacionado con el tiempo a través de la velocidad de propagación de las ondas que es del mismo orden en ambos casos, y esto a su vez con las frecuencias características, en un caso en el orden de los Hz o menores, y en otro típicamente en los MHz (y hasta algún orden más). Esta similitud fundamenta la utilización de la metodología matemática que modela la generación y propagación de ondas, desarrollada previamente en la geofísica, que luego fue tomada por los más importantes trabajos en EA en la década del 80 del siglo pasado.

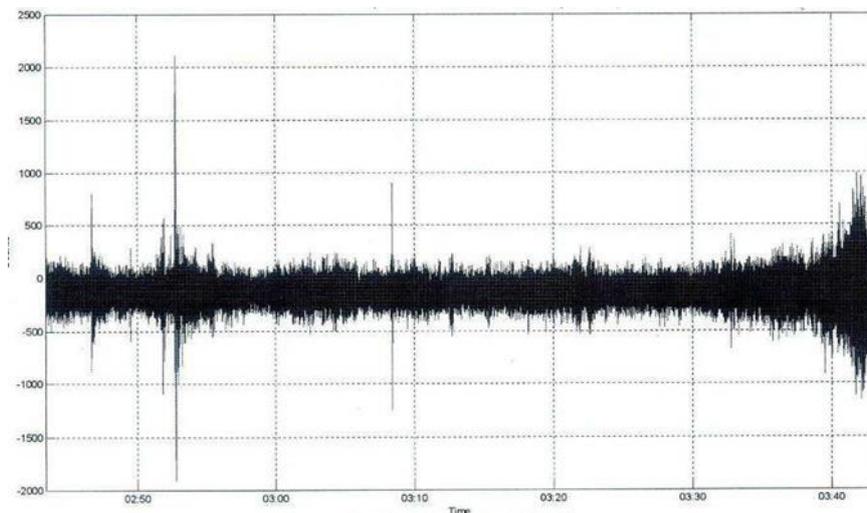


Figura 4.2. Cuentas de amplitud en función del tiempo del canal vertical de un sismógrafo mostrando un fondo de ruido sísmico (tipo continuo).

4.2.1 Ondas en un medio infinito isótropo

Para comenzar el estudio se aplican los fundamentos de la mecánica del continuo al caso más simple que es un sólido lineal, elástico, isótropo e infinito. A partir de los conceptos de tensor deformación y tensor de tensiones, se aplica una fuerza F en un punto de la superficie del cuerpo. Luego se plantean la conservación de la cantidad de movimiento y de la energía para obtener las siguientes ecuaciones:

Ecuaciones de onda

$$C_P = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}$$

Siendo C_P la velocidad de fase de ondas longitudinales.

$$C_S = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$

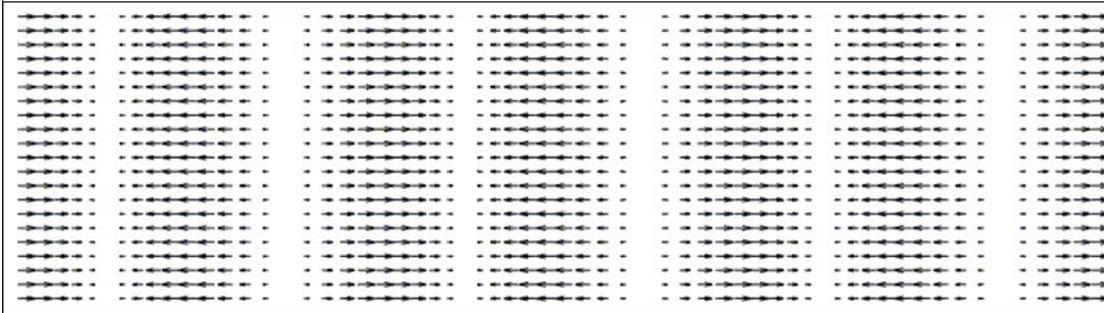
Siendo C_S la velocidad de fase de ondas transversales.

Donde:

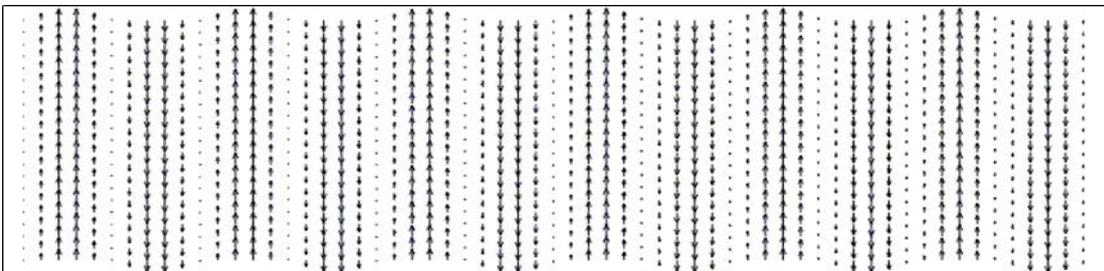
- μ : Módulo de corte (representa la resistencia del material a esfuerzos de corte).
- ρ : Densidad del medio.
- λ : Longitud de onda.

Las velocidades de fase son aquellas de puntos determinados de la onda.
El cociente de las velocidades de fase longitudinal transversal, será:

$$\frac{c_p}{c_s} = \sqrt{\frac{2-2\nu}{1-2\nu}}$$



Representación de ondas longitudinales o tipo P.



Representación de ondas transversales o tipo S.

4.2.2 Impedancia

La impedancia da la respuesta del sistema a un estímulo externo. Suele usarse para cuantificar las discontinuidades de medios por ejemplo para problemas de refracción y reflexión. La impedancia acústica se define como el cociente entre la fuerza (tensión o tracción) y la velocidad de propagación.

Para un medio isótropo la impedancia será:

$$Z_Y^P = \rho C_P \delta_Y \quad ; \text{ Para una onda tipo P}$$

$$Z_Y^S = \rho C_S \delta_Y \quad ; \text{ Para una onda tipo S}$$

4.2.3 Presencia de discontinuidades en el medio

Las discontinuidades alteran la separación en ondas puras longitudinales y transversales. Aparecen efectos que pueden dividirse en dos grupos: por un lado aquellos manifestados por las ondas viajeras de volumen, y por otro lado, la aparición de ondas de superficie y guiadas. Entonces se estudiarán:

- Reflexión, refracción y conversión de modos.
- Ondas superficiales y ondas guiadas.

4.2.3.1 Reflexión, refracción y conversión de modos en un medio semi-infinito

Sean ondas planas que inciden oblicuamente sobre una superficie plana. Las ondas tipo P producen movimientos de las partículas materiales o desplazamientos paralelos a la dirección de propagación de la onda, mientras que en las tipo S ese movimiento es transversal a la propagación. Cuando las ondas S inciden con un ángulo sobre una

superficie plana, el plano de polarización de S se puede descomponer en dos componentes transversales, siendo SH (H por horizontal) la componente paralela a la superficie incidida y SV (V por vertical) la componente transversal a SH.

Se observa que las ondas tipo P y las SV están mezcladas por lo que al interactuar con la interfase producirán conversiones de modo. Eso no ocurre con las SH. Este problema se puede estudiar en dos casos el primero para la incidencia de ondas tipo SH y luego para la incidencia de ondas tipo P y SV. Para las ondas transversales se puede separar el comportamiento en ondas SH y SV. Las ondas SH que inciden sobre una superficie libre, presentan el caso más sencillo de análisis.

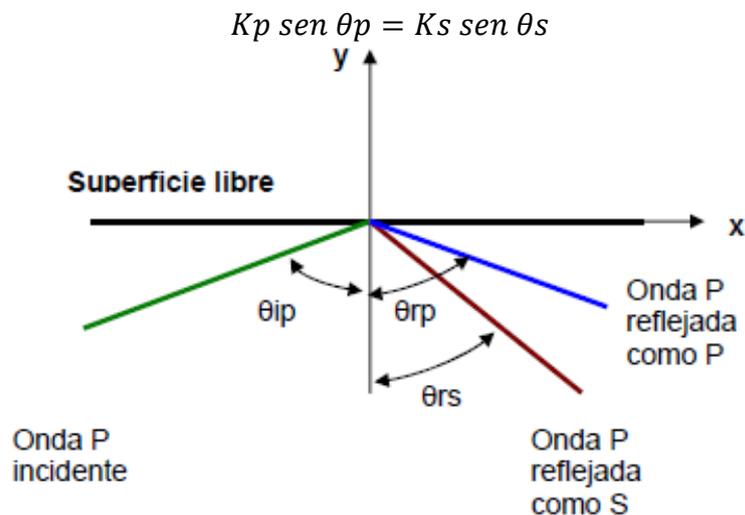
4.2.3.1.1. Reflexión de ondas tipo SH

Un contorno rígido impone desplazamientos nulos en su superficie ($x=0$), mientras un contorno libre impone tracciones nulas. Se verifica que para ambos casos el ángulo de reflexión es igual al de incidencia. También los módulos de la amplitud de las ondas incidente y la reflejada serán iguales para ambos tipos de interfase, pero lo que cambia para cada caso es la fase de la onda reflejada ya que para el contorno rígido la reflejada tendrá un desfase de π , mientras que en la superficie libre de tracción no habrá cambio de fase.

4.2.3.1.2 Reflexión de ondas P y SV

Como se ve en las ecuaciones de desplazamiento las ondas longitudinales y transversales están relacionadas, lo que produce la conversión de modos. Esto permite que una onda P, o una onda SV, que incidan sobre la interfase puedan dar ambas ondas P y S reflejadas.

En la resolución, para que se cumplan las condiciones de contorno aparece una condición que es:



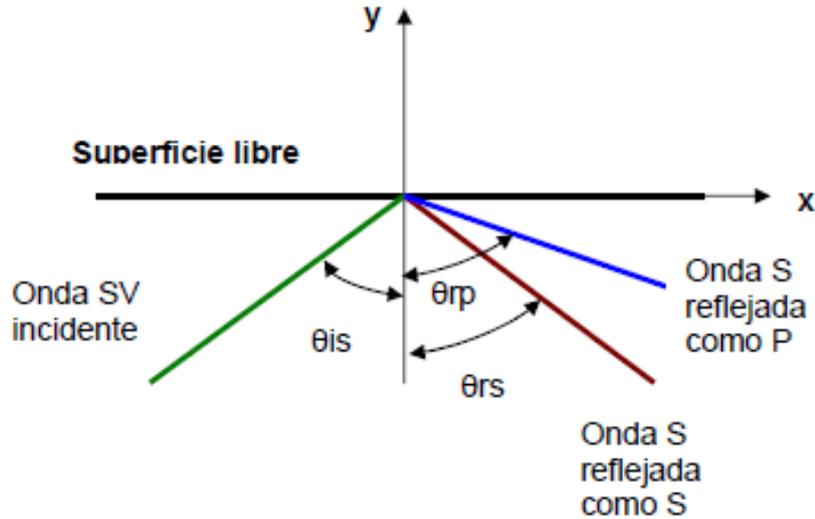
Reflexión de ondas P en una superficie libre

En el caso de SV incidente existe un ángulo crítico en el cual la onda P se propaga por la interfase, esto es cuando:

$$\text{sen } \theta = \frac{C_s}{C_p}$$

Se pueden calcular la reflexión y la refracción de ondas en la interfase entre dos medios de diferentes materiales. En esa interfase se debe requerir la continuidad de tensiones y

desplazamientos para las componentes normales y tangenciales. En algunos casos, la interfase no puede transmitir los esfuerzos de corte y solo transmite la componente normal. En esa situación podría no haber continuidad en la componente tangencial.



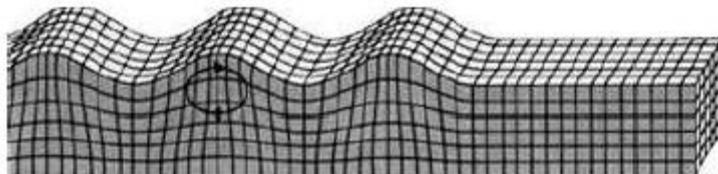
Reflexión de ondas S en una superficie libre

4.2.3.2 Ondas superficiales y ondas guiadas

4.2.3.2.1 Ondas de Rayleigh o de superficie

Rayleigh estudió las soluciones de las ecuaciones para una superficie libre sobre la cual no incidían ondas, encontrando la solución para otro modo de propagación que son las ondas superficiales. De la resolución de las ecuaciones para el desplazamiento de las ondas en la superficie llegó a una condición sobre C_R (velocidad de las ondas de Rayleigh).

Los desplazamientos normal y tangencial de la superficie están desfasados en $\pi/2$ por lo tanto el movimiento de las partículas materiales de la superficie es en forma elíptica. Estas ondas decaen menos que las P o las S, por lo tanto sus amplitudes son mayores (por ejemplo son las ondas que mayor devastación causan en un terremoto). Por este motivo y dado que los sensores de EA se colocan en la superficie contribuyen de manera relevante. La penetración de las ondas de Rayleigh en el material se considera no mayor que una o dos longitudes de onda.



Ondas de Rayleigh

4.2.3.2.2 Ondas Guiadas

Sean ondas armónicas propagándose por un cuerpo extendido con una sección de corte de dimensiones finitas, por ejemplo una placa plana de espesor $2h$. En ese caso las ondas se reflejarán una y otra vez entre los planos. Estas ondas incidentes y reflejadas formaran ondas estacionarias. Estas ondas podemos representarlas en el modo SH siendo paralelas al plano de la placa (u horizontales), o en modos P y S propagándose en el plano formado por la normal a la placa y la dirección de propagación, siendo el segundo caso el de las ondas de Lamb. Para el estudio de ambos casos podemos separar el problema según los modos de propagación, sin analizar las reflexiones de las ondas

como en el sólido semi-infinito, sino estudiando el problema estacionario a través de la sección de corte y de ondas viajeras en la dirección de la propagación en la guía de onda.

Ondas en el modo SH

En primer lugar en la placa habrá una propagación del modo SH (en la dirección perpendicular al plano de propagación, paralela a la placa, u horizontal). Ondas incidentes en el modo SH, que se reflejan en ambas superficies libres interferirán constructivamente para dar un patrón estacionario. A través de consideraciones geométricas del frente de ondas se llega a una ecuación de frecuencias posibles de los modos de propagación. A cada frecuencia le corresponderá un modo de propagación. Cada uno de estos transporta energía. La energía se propagará con una velocidad igual a la velocidad de grupo.

Ondas en el plano de propagación (Ondas de Lamb)

Las ondas de Lamb se propagan en sólidos acotados de espesores característicos menores o del orden de la longitud de onda de la propagación. Aunque el formalismo planteado por Lamb en 1917 era para una placa infinita de espesor $2h$, este puede extenderse a tubos o cilindros sólidos. Para la placa infinita, la propagación se produce mediante complejas conversiones entre los modos P y S, aunque la energía se conserva en el sistema. Luego al calcular los desplazamientos se observa que estos serán simétricos y antisimétricos, respecto de un plano que corta al medio en espesor a la placa, es decir el plano con $z=0$.

Tanto la velocidad de fase como la de grupo dependen de la frecuencia de las ondas. En general solo ciertos valores de u están permitidos por la condición de interferencia entre las ondas reflejadas en las superficies de la placa.

4.2.4 Atenuación de las ondas

Cuando las ondas elásticas se propagan en un medio material, se produce una atenuación o disminución de la amplitud debida a diferentes mecanismos. La primera causa de atenuación se debe a factores geométricos. En estos se puede encuadrar tanto a la atenuación geométrica que no depende del medio, como a la debida a la difracción que si depende. Luego hay otros factores dependientes del medio que contribuyen a la atenuación del sistema. En nuestro proyecto serán de interés las dos primeras.

4.2.4.1 Atenuación geométrica

Si se emiten ondas desde un origen localizado, que para facilitar la visualización se podría considerar como cuasi-puntual, al propagarse el frente de onda alejándose de la fuente se va expandiendo (en tres dimensiones va aumentando su superficie) produciendo una disminución de la intensidad es decir la potencia (energía por unidad de tiempo) emitida por unidad de superficie, siendo esto independiente de otros posibles mecanismos de atenuación. De esta manera se ve que la disminución del valor de la amplitud, no implica necesariamente una pérdida en la energía de la onda, sino que puede ocurrir una redistribución de la misma. Esta atenuación no depende del medio sino de la fuente emisora.

4.2.4.2 Atenuación por difracción

Es debida a discontinuidades en el material (complejos contornos, agujeros, cavidades, inclusiones, fisuras, granos, etc.) y depende de la longitud de onda. Se origina dentro del sólido con objetos que actúan en mayor o menor medida como difractores según la longitud de la onda. En el rango de la EA la difracción es notable por la presencia de defectos del material. En este caso distintas partes de la onda siguen por diferentes caminos, disminuyendo la intensidad en ciertas zonas y aumentándola en otras. Estos fenómenos han sido ampliamente estudiados en la literatura para las ondas en general y

para ondas elásticas como el ultrasonido. Un mecanismo similar al anterior sucede con el fenómeno de desdoblamiento.

4.2.4.3 Atenuación por absorción y amortiguamiento o pérdidas genuinas

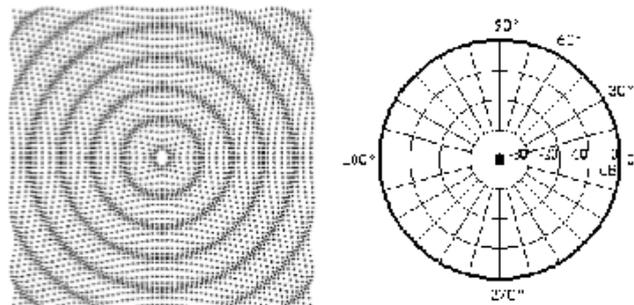
Las ondas elásticas que se propagan en un medio interactúan con él en un proceso de intercambio de energía. Esto relaciona las características del medio con los parámetros de las ondas viajeras. La amplitud decrece exponencialmente con la distancia dependiendo de las propiedades del material y la frecuencia. En general para las pérdidas genuinas la atenuación crece proporcionalmente a la frecuencia, es decir a mayor frecuencia habrá mayor atenuación. En estas pérdidas “genuinas”, hay disminución de la energía por interacción con el medio y pueden asociarse a efectos magnetoelásticos, termoelásticos, etc. En general, en una situación concreta ocurre la combinación de la mayor parte de los fenómenos mencionados. Como regla se puede afirmar que la atenuación es dependiente de la frecuencia de la onda, siendo mayor a medida que ésta aumenta.

4.3 Fuentes de EA

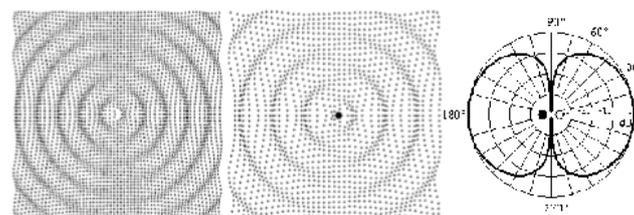
Una fuente de EA se la puede considerar como un radiador de ondas de energía elástica. En un sólido se pueden producir diferentes tipos de fuentes de EA a partir del crecimiento de fisuras, deformación plástica con el movimiento de dislocaciones, separación de interfaces, corrosión, separación fibra-matriz en materiales compuestos, el movimiento de las paredes de los dominios magnéticos, transformaciones de fase, descargas parciales en dieléctricos, etc.

Direccionalidad de las fuentes

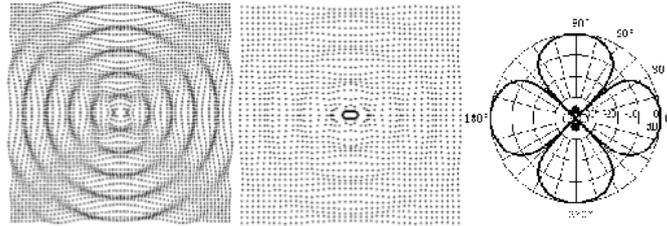
Dependiendo de la naturaleza física del proceso de emisión, la fuente podrá tener una fuerte direccionalidad en la irradiación de las ondas elásticas o no. En las siguientes figuras se detalla la dependencia angular de los distintos tipos de fuentes de EA.



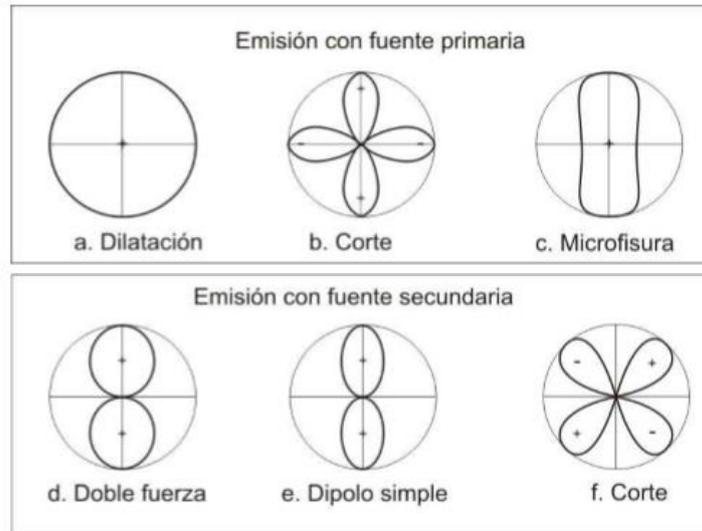
Fuente puntual



Fuente dipolar



Fuente cuadrípolar



Emisión con fuentes primarias y secundarias de EA

4.4 Sensores de emisión acústica

La denominación de “sensor de emisión acústica” corresponde al nombre de aquellos transductores que se utilizan en la detección de señales de emisión acústica en el campo de los END (Ensayo No Destructivo), siendo esa terminología de uso estandarizado [IRAM (2005)].

Estos dispositivos son de fundamental importancia en los experimentos que estudian la EA ya que permiten la detección de las ondas elásticas generadas por las fuentes de EA convirtiéndolas a una tensión eléctrica, la señal de EA, que será acondicionada, registrada y estudiada.

El éxito de los experimentos estará fuertemente condicionado por las características del sensor.

En general en la práctica los sensores están acoplados a la superficie del espécimen estudiado detectando la pequeña variación dinámica del desplazamiento de la superficie, y dando como resultado pequeñas corrientes en los terminales del sensor.

Un transductor ideal debería medir desplazamientos (o velocidades) de la superficie en sus componentes horizontales y verticales, en un punto de la misma, y convertir el desplazamiento en señales eléctricas en un amplio ancho de banda. Se puede hacer una estimación del ancho de banda de una fuente típica de EA.

4.4.1 Tipos de sensores

Los tipos de sensores son muy variados, dependiendo de los principios físicos utilizados para la transducción, así como también de las características funcionales, formas o tamaños.

Los principios físicos utilizados para la detección de ondas elásticas en el rango de la emisión acústica son básicamente la piezoelectricidad para los sensores piezoeléctricos,

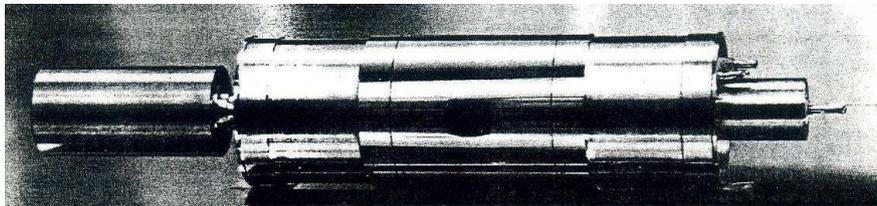
la capacidad variable para los capacitivos y la interferencia óptica para los interferométricos. En la actualidad se agregan otros tipos de métodos de detección como los EMAT's (transductores electromagnéticos - acústicos) que aún no tienen características demasiado favorables en el rango del estudio de la EA, y los sensores MEMS que están comenzando a implementarse.

4.4.1.1 Sensores capacitivos

Los sensores capacitivos son utilizados para la detección de la EA principalmente en laboratorio como patrón de calibración de sensores.

El principio de funcionamiento está basado en la variación de la capacidad de un condensador de placa móvil, producida por la variación de la distancia entre placas. Esta distancia dependerá del desplazamiento de la superficie de la probeta a medir con la que está en contacto. El cambio de la capacidad producirá en un circuito una diferencia de potencial que será la señal de EA.

La ventaja de estos dispositivos respecto de los piezoeléctricos es su mayor ancho de banda, produciendo señales eléctricas que reproducen fielmente el desplazamiento de la superficie del material estudiado. Una desventaja es la menor sensibilidad.



Sensor capacitivo de EA.

Tabla 4.1 Rango de frecuencia de los sensores

Principio de funcionamiento	Sensibilidad de desplazamiento	Rango de frecuencia
Piezoeléctrico resonante	10^{-14} m	0.1 a 0.8 MHz
Piezoeléctrico amortiguado	10^{-13} m	0.1 a 1.2 MHz
Capacitivo	10^{-12} m	0 A 50 MHz
Interferométrico	10^{-10} m	0 a 10 MHz

4.4.1.2 Sensores interferométricos

Esta forma de medir dinámicamente el desplazamiento de la superficie del espécimen estudiado se basa en la medición de variación de distancia por medio de la interferometría láser, esto es midiendo la diferencia de fase producida por la variación del camino óptico, es decir la distancia a la superficie. Las principales ventajas de estos dispositivos es que permiten realizar mediciones a distancia, muy importante en ciertos ambientes industriales como por ejemplo en la detección de defectos en componentes a muy alta temperatura, o en zonas corrosivas o radioactivas. Las desventajas son su sensibilidad y su implementación. Estos dispositivos son costosos y difíciles de implementar para lograr una sensibilidad satisfactoria.

4.4.2 Sensores piezoeléctricos

Los materiales más utilizados para la confección de detectores de ondas elásticas en el rango del ultrasonido son los piezoeléctricos, en particular aquellos del tipo cerámico (PZT o Zirconato Titanato de Plomo), también poco frecuentemente se utilizan polímeros como el PVDF (Polifluoruro de vinilideno).

Tabla N° 4.2. Piezoeléctricos más utilizados, características y usos

Titananato zirconato de plomo		
	Características	Usos
PZT-4	Alto acoplamiento, alta permitividad, buenas propiedades con excitación de alta potencia	Ultrasonido de potencia
PZT-5	Alto acoplamiento, muy alta permitividad, alta compliancia	Ultrasonido y EA en END. Ultrasonido en diagnósticos.
PZT-6B	Muy alto factor de calidad mecánico, buena estabilidad	Filtros para ondas elásticas
PZT-7A	Baja permitividad	Líneas ultrasónicas de retardo
PZT-8	Muy buenas propiedades con alta excitación eléctrica	Transductores ultrasónicos de alta potencia
Niobatos		
Pb (NbO ₃) ₂	Baja permitividad, muy factor de calidad mecánico	END y diagnostico medico
NaK(NbO ₃) ₂	Baja compliancia (alta velocidad de la onda)	Líneas de retardo
Titanato de bario		
	Bajo punto de Curie	Transductores ultrasónicos en general

La piezoelectricidad se produce en esos materiales por la deformación causada por la tensión mecánica aplicada por la onda. La deformación produce un reordenamiento de cargas en la estructura del piezoeléctrico generando una diferencia de potencial eléctrico. La salida eléctrica del transductor ($V(x,t)$) es la resultante de la convolución entre el desplazamiento superficial de la superficie ($Y(x,t)$) con una función respuesta del transductor ($T(t)$).

Estos sensores tienen ventajas y desventajas que en un balance, hasta el día de la fecha, los convierten en los más elegidos en el campo de la aplicación de la EA con fines industriales. Entre las principales ventajas podemos destacar la altísima sensibilidad, bajo costo y fácil implementación. Respecto de las desventajas, la fundamental es la imposibilidad de obtener un ancho de banda lo suficientemente amplio que permita estudiar ciertos fenómenos con los sensores convencionales de uso masivo. Otra limitación de los piezoeléctricos es la temperatura de trabajo a la cual se los puede poner en contacto, ya que están condicionados por la temperatura de Curie la cual no pueden sobrepasar para evitar la pérdida de sus propiedades.

4.4.2.1 Sensibilidad en amplitud y frecuencia de los sensores piezoeléctricos

La detección de las ondas elásticas generadas por las fuentes de EA estará condicionada a la sensibilidad del sensor en la amplitud del desplazamiento y en las frecuencias

características. Si el frente de onda que llega al sensor contiene aquellas componentes de frecuencia dentro del ancho de banda, aparecerá una diferencia de potencial entre las caras del sensor, que deberá ser mayor que el ruido para ser considerada como señal de EA. Se ha visto en la Tabla N° 4.1 que los sensores piezoeléctricos son los más sensibles en el desplazamiento pero no en ancho de banda.

Esto condiciona el rango de aplicación de la EA en la industria a una escala en frecuencia de entre 30 kHz y 2 MHz (típicamente 1 MHz máximo), recordando que los sensores de EA son sensores de ultrasonido. Un condicionamiento extra para los sensores es que la atenuación de la onda en el material crece rápidamente con la frecuencia como ya se ha visto anteriormente.

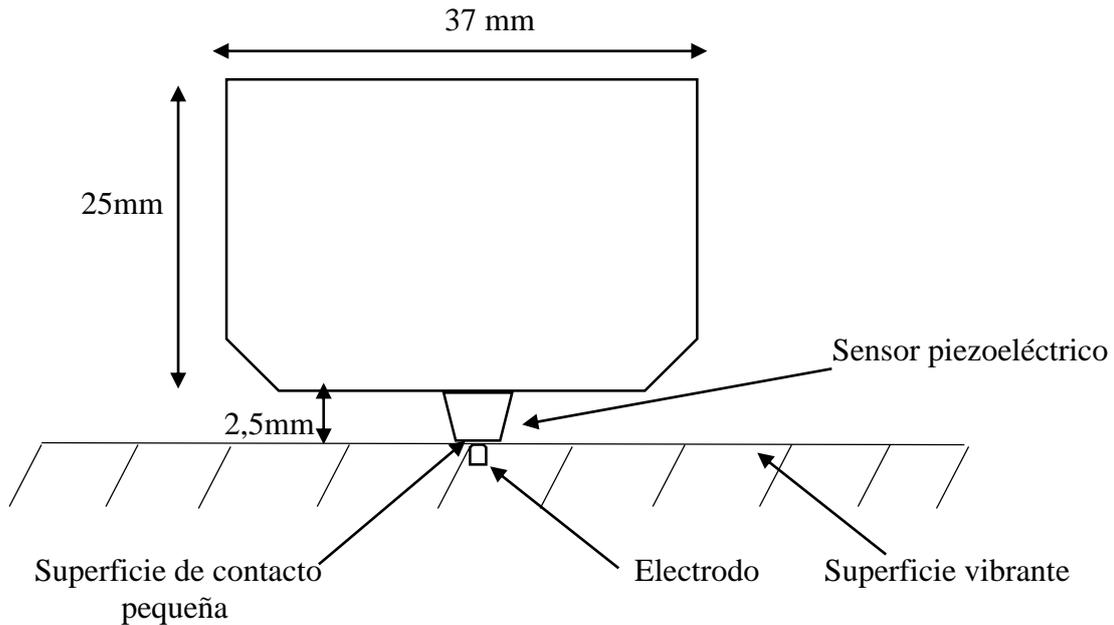


Fig. 4.3. Diagrama del Sensor NBS

4.4.2.2 Influencia del espesor y el diámetro del piezoeléctrico. Rango de frecuencia y efecto apertura.

El elemento piezoeléctrico que se utiliza en los sensores tiene generalmente forma de disco con un diámetro y un espesor definido, siendo estas dimensiones las características que definen su función transferencia, para un dado material.

El espesor estará relacionado con la frecuencia fundamental de resonancia y con los sucesivos armónicos. De esta forma en determinadas frecuencias la respuesta eléctrica para una dada velocidad de la superficie será máxima condicionando la respuesta del piezoelemento.

Un mayor diámetro del piezoeléctrico está relacionado con una mejor sensibilidad, por tal motivo en general los sensores de uso industrial son de diámetros de entre 10 y 20 mm.

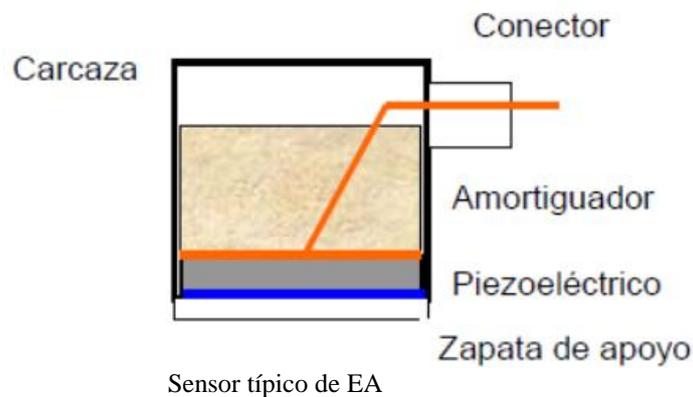
4.4.2.3 Selección de Modos

El desplazamiento a medir tiene tres direcciones por lo que se puede descomponer en una dirección perpendicular a la superficie y dos en el plano de la misma. En general los sensores comerciales de EA están diseñados para responder en la componente normal. Aunque las ondas que se propaguen sean compresivas o de corte generalmente tienen

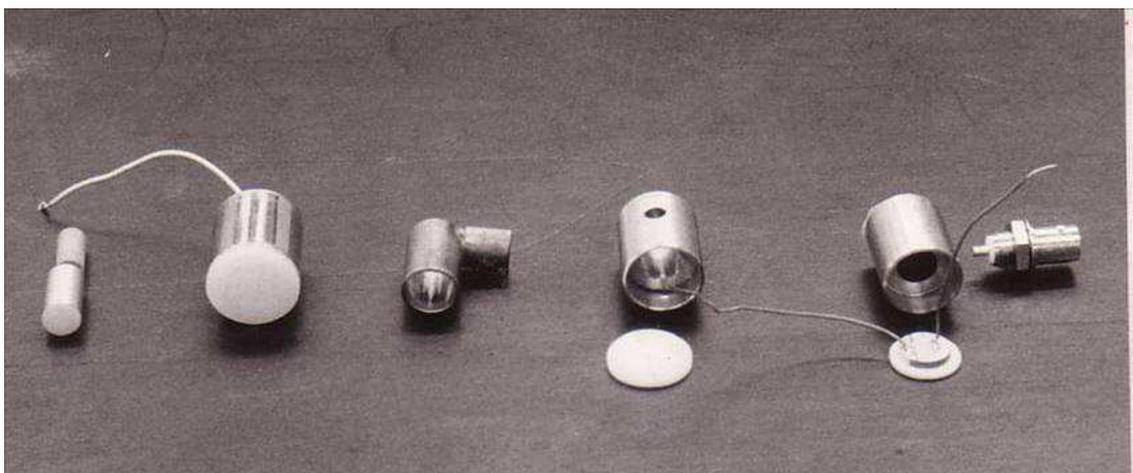
una componente normal a la superficie que será detectada. También los piezoeléctricos pueden fabricarse para seleccionar solo las ondas transversales, por ejemplo cristales de cuarzo cortados en determinadas direcciones.

4.4.2.4 Diseño y construcción de sensores piezoeléctricos

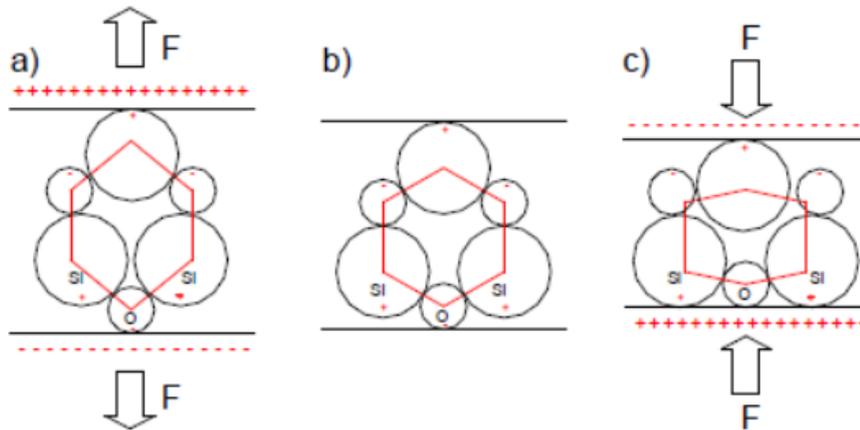
El diagrama observado en la Figura representa la configuración de un sensor típico de EA basado en un elemento piezoeléctrico, siendo el más utilizado el PZT. En general el sensor está basado en un cilindro metálico de acero inoxidable que le provee aislamiento para las ondas electromagnéticas, rigidez física y la conexión de uno de los polos del piezoelemento, que se sitúa en su base por sobre un disco de separación. El otro polo del sensor va por un cable desde el piezoelemento hasta el centro de un conector. La conexión del piezoeléctrico puede ser de modo normal o diferencial, siendo este último muy útil para la reducción de ruido eléctrico.



Sobre el cristal se coloca una capa denominada “backing”, que puede ser por ejemplo una mezcla de epoxi y partículas de tungsteno, cuyo fin es atenuar las ondas que se propagan en la cara superior, opuesta a la probeta, por dispersión y absorción. Este “backing” puede ser diseñado para alterar también la dependencia en frecuencia del espesor del piezoeléctrico haciéndola más plana, o de mayor ancho de banda.



Construcción de sensores de EA



Acción del piezoeléctrico

En las señales detectadas por estos dispositivos aparece la impronta de la frecuencia característica de oscilación del cristal utilizado. Breckenridge y Proctor han desarrollado sensores a partir de pequeños piezoeléctricos cónicos, que mejoran ampliamente la respuesta en frecuencia, pero en desmedro de la sensibilidad. Estos sensores de banda ultra ancha denominados sensores NBS por su lugar de procedencia (National Bureau of Standards, nombre anterior del NIST de EEUU.), muestran una gran ventaja que es una baja influencia del efecto apertura pero con la desventaja de captar una menor cantidad de energía de la onda por su muy pequeña área.

• TIPOS DE SENSORES

En los catálogos de sensores comerciales se puede observar las distintas clases disponibles. La clasificación más relevante es entre banda ancha y sintonizado. Hay otras categorías en función de sus posibles aplicaciones, tamaño, tipo de conexión o rango de temperatura.

- Sensores de Banda Ancha

Trabajan en un amplio rango de frecuencia, típicamente en una porción del espectro entre 100 kHz y 1 MHz. Algunos cubren la totalidad del intervalo y otros tienen un rango más limitado (aunque ancho) p. ej. Entre 300 y 700kHz. Son de alta fidelidad y en general se utilizan para investigaciones de laboratorio. Son necesarios si se pretende estudiar el espectro de frecuencias de la señal (Fourier o Wavelets). Permiten detectar un mayor número de modos de ondas. Son los más apropiados para estudiar las fuentes de EA.

- Sensores sintonizados o resonantes

Estos sensores explotan la máxima sensibilidad de los piezoeléctricos con frecuencias de trabajo cercanas a la resonancia. Los rangos de frecuencia pueden ser variados, muy cortos o largos, y se caracterizan por la frecuencia del pico de sensibilidad. Son de menor costo y algunos de estos son los más usados en mediciones en planta y para requerimientos generales. Por ejemplo los resonantes en 150 kHz se usan en la evaluación de tanques metálicos. El rango típico de temperatura de los sensores comerciales de esta clase está entre -70 y 180 °C.

- Sensores Diferenciales

Están preparados para conectarse a un pre-amplificador diferencial con el fin de eliminar el ruido de modo común. En general, se comercializan tanto los modelos de banda ancha como los sintonizados. Respecto de su instalación debe tenerse en cuenta que el preamplificador debe estar preparado para este tipo de configuración. Otra cosa que debe tenerse en cuenta en la operación es el cable (si no viene provisto con el

sensor), que deberá ser un coaxial diferencial. Estos sensores al ser más inmunes al ruido permiten trabajar con umbrales más bajos.

- Sensores con Preamplificador integrado

En general en una amplia gama de frecuencias y tipos de sensores se integra en el encapsulado de estos un preamplificador integrado, en general con la ganancia más utilizada que es de 40 dB. Estos sensores suelen ser de diámetros y alto más grandes que los convencionales.

- Sensores Miniatura

Se usan en casos en los que el tamaño o el peso sean críticos para su colocación. Tienen ventajas respecto del efecto apertura, pero en general tendrán menor sensibilidad. Los diámetros pueden ser desde los 3 hasta los 10 mm típicamente y peso menor que los 10g. Los rangos de frecuencia son variados (banda ancha y sintonizados).

- Sensores Resistentes a la alta temperatura

Como se ha visto previamente los sensores estándar de EA no resisten temperaturas más altas que la de Curie de los PZT, que está entre los 300 - 400 °C. Sin embargo, existen en el mercado distintos modelos de sensores que resisten temperaturas de hasta aproximadamente 500 °C. Estos trabajan en un rango frecuencia relativamente amplia. Permiten evitar el uso de guías de onda y se pueden utilizar en componentes industriales a alta temperatura como calderas.

- Sensores Rodantes

Para ciertas aplicaciones en END puede ser útil la existencia de sensores de EA móviles.

Algunos de estos sensores trabajan sin acoplante, utilizado en el contacto entre el sensor y el componente a evaluar un material que permite una correcta adaptación de impedancias.

- Sensores Sumergibles

Son totalmente sellados y pueden utilizarse a profundidades, en plantas off shore, en tanques de almacenamiento, etc. Los hay sintonizados en distintas frecuencias típicas de uso industrial y con preamplificadores integrados.- Sensores de Baja frecuencia

Se utilizan en rangos de frecuencia desde 5 kHz hasta 30-40kHz. Se utilizan principalmente en la detección de pérdidas.

- Sensores en aire

Hay sensores en aire que trabajan desde 20kHz a 40kHz, y su característica particular es su mejor acoplamiento de impedancia con el aire. Estos sensores son una clase particular de los de baja frecuencia. Se utilizan para detección de pérdidas y control de procesos. Permiten medir áreas extensas con buena sensibilidad.

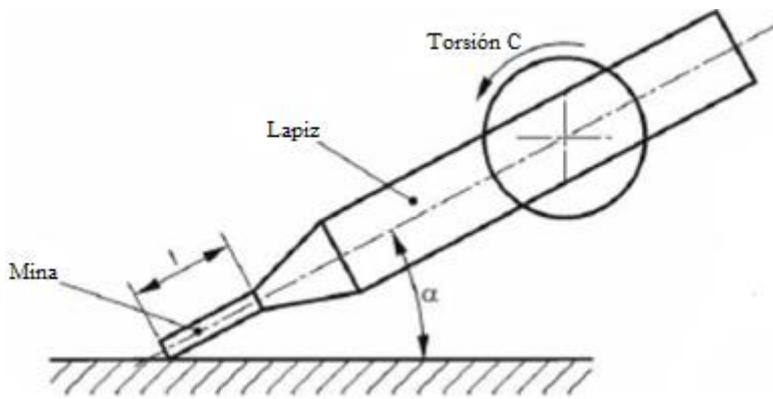
4.4.2.5 Calibración de los sensores

Para la correcta cuantificación de los resultados de la EA los sensores de EA deberán estar calibrados. Para ello, varias organizaciones mundiales que generan normas y códigos tales como la International Organization for Standardization (ISO) o la American Society for Testing and Materials (ASTM) han hecho lo propio para el caso de los sensores de EA.

La calibración de sensores puede realizarse de maneras primaria y secundaria, es decir a partir de mediciones absolutas o de mediciones relativas a las absolutas. Para la calibración primaria el método más antiguo y más usado es aquel creado en el NIST de EEUU.

Otra calibración primaria es la “recíproca”, en la cual se utilizan las respuestas como emisor y receptor de los sensores a calibrar. La excitación en este método es eléctrica aunque es necesario conocer la función transferencia mecánica o función de Green para

la transmisión de ondas de EA desde la fuente hasta el receptor, la cual es la representación en el dominio de la frecuencia de la solución por la teoría de elasticidad. Los rangos de medición de los patrones de calibración primaria en las condiciones de las normas son desde los 10 kHz y generalmente entre los 100 kHz y 1 MHz. La calibración secundaria, a partir de sensores calibrados de manera primaria, se obtiene por diversos procedimientos normalizados. Hay diferentes normas y procedimientos de calibración secundaria tales como las ASTM E 1781 y otras pruebas que pueden evaluar la reproducibilidad de la respuesta del sensor como las indicadas en la ASTM E 976, entre las cuales se define el método de Hsu Nielsen. Los métodos propuestos en la ASTM E 976 son comparativos y relativos. Esta norma no permite una calibración absoluta sino solo permite determinar el buen funcionamiento del sensor.



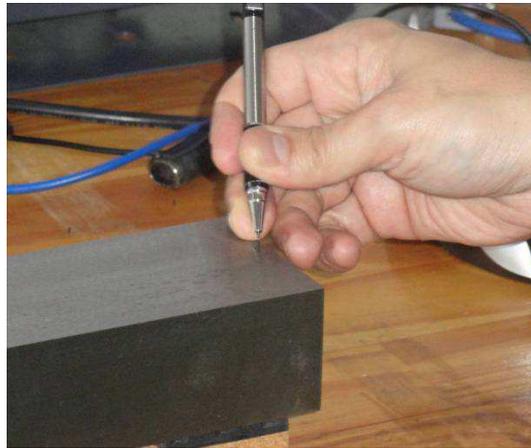
Fuente de Hsu Nielsen. (Norma IRAM NM302)

Donde:

$$\alpha=30^{\circ}$$

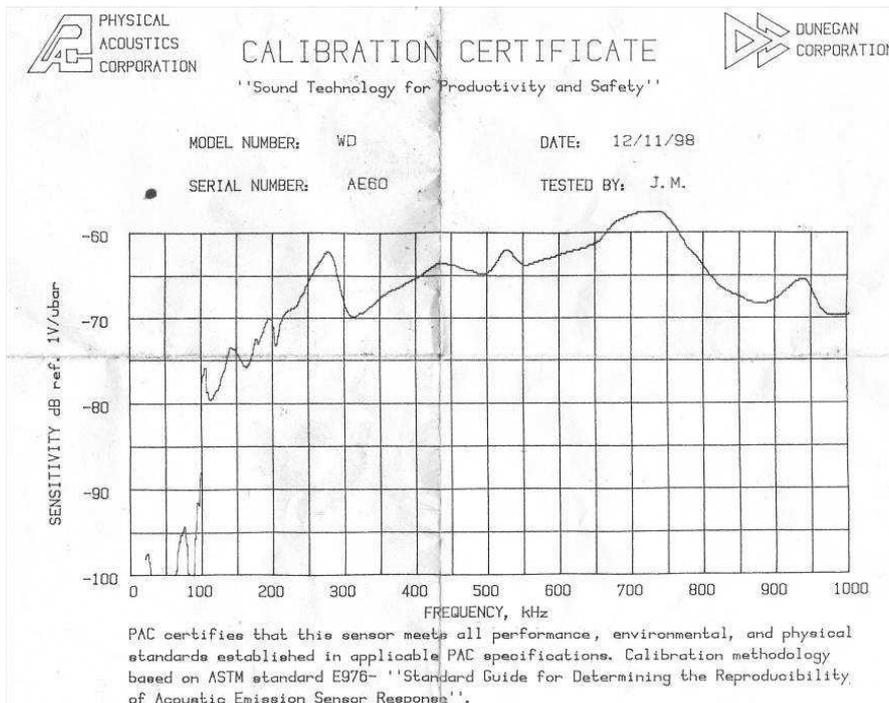
$$\varnothing=0,5 \text{ mm (o } 0,3\text{mm)}$$

$$L=3\text{mm}\pm 0,5\text{mm}$$



Aplicación de la Fuente de Hsu Nielsen. (Norma IRAM NM302)

En la Figura se puede observar la curva de calibración de un sensor de Banda Ancha obtenida según la metodología determinada en la norma ASTM E976 que determina la reproducibilidad de la respuesta de un sensor de EA.



Certificado con curva de calibración de un sensor comercial de banda ancha según la metodología ASTM E976.

4.4.2.6 Complementos para aplicaciones en campo

- Fijación de los sensores

La fijación de los sensores es un punto importante. En general en grandes estructuras de metales ferromagnéticos los sensores se fijan mediante dispositivos magnéticos. También pueden utilizarse adhesivos, bandas elásticas, y otras soluciones dependiendo del componente a ensayar.



Ejemplo de fijación de sensor con cinta aislante

En la colocación de los sensores restan discutir dos temas importantes. Por un lado entre el sensor y el material a medir debe colocarse un acoplante acústico (se desarrolla en el tema siguiente). La capa de acoplante debe ser lo más delgada y repetible posible. Por tal motivo en superficies muy desparejas, con restos de pinturas o capas de óxido discontinuas, de ser viable se recomendaría mejorar la superficie de apoyo del sensor para garantizar que todos apoyan igual. Igualmente un mal acople se evidenciará en la prueba de los distintos canales del equipo previa a la medición. Otro punto a tener en

cuenta es para el caso de superficies que no son planas, se recomienda que el sensor se coloque con su eje de rotación perpendicular a la tangente de la superficie, para lograr la máxima transferencia de energía.

4.5 Instrumentación de EA. Sistemas de EA

Se dará un ejemplo de la influencia de la frecuencia en las mediciones de EA. En ensayos industriales de EA en estructuras metálicas, para la detección de fisuras activas suelen utilizarse sensores de frecuencia de resonancia en el rango entre (100 – 300) kHz, asegurando así una propagación de la onda de algunos metros, pudiéndose de esta manera aplicar técnicas de detección y localización de fuentes de EA. Por el contrario si el ensayo se realiza en piezas de hormigón o roca (materiales muy heterogéneos) en los cuales la atenuación es mayor, para lograr un similar alcance de la onda (desde la fuente al detector) la frecuencia de los sensores necesariamente deberá ser menor, usándose típicamente entre 30 y 50 kHz para estos materiales, dado que como se ha visto la atenuación crece con la frecuencia.

Para conceptualizar rápidamente la estructura de un sistema de EA se puede observar el esquema de la Fig. 4.4, el cual corresponde a un canal de EA, que consiste en la cadena que forman el sensor, el preamplificador y el equipo de EA, el cual también permite la medición de parámetros externos, como por ejemplo: carga, desplazamiento o temperatura. Un sistema de EA puede tener tantos canales como sea necesario. Una vez que la señal de EA es detectada y convertida en señal eléctrica por el sensor, y amplificada por un preamplificador, llega a un equipo que la procesará y registrará. Históricamente los comienzos de la EA, coinciden con el apogeo de la era analógica. En función de la información a manejar, la señal era amplificada y luego se extraían parámetros obtenidos mediante circuitos electrónicos que calculaban principalmente el valor RMS, la cantidad de cruces por cero o por el umbral de la señal, o la amplitud máxima. También en algunos casos se podían registrar fragmentos de la forma de onda de la señal en los primeros osciloscopios digitales (referencias). En la actualidad los equipos comerciales permiten los siguientes modos de adquisición:

- Parámetros característicos de EA.
- Formas de onda.
- Señal de EA en modo de streaming.

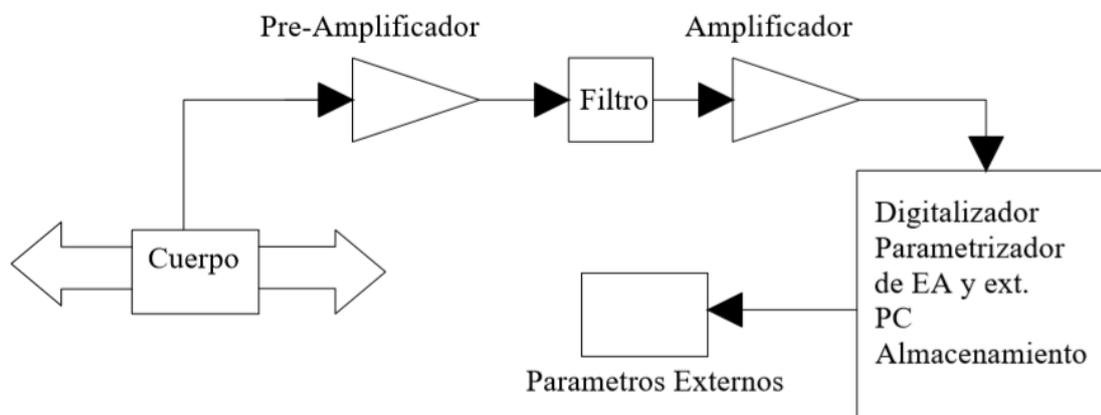


Fig. 4.4 Esquema de un sistema de EA de un canal

A continuación se detallarán cada uno de los componentes del sistema de EA.

4.5.1 Sensores de EA

Este tema fue desarrollado en la sección previa.

4.5.2 Acoplante

Cuando se adhieren los sensores a un espécimen a examinar, en general metálico y más generalmente sólido, queda una capa de aire entre ambos componentes que conlleva un salto de impedancia acústica muy grande, el gap sensor-aire-probeta provocará que una parte importante de la energía que debería captarse por el sensor se refleje en la interfase probeta-aire y no sea transmitida al sensor por lo que será débilmente detectada. Por tal motivo se coloca una sustancia que actúa de acoplante o adaptadora de la impedancia acústica entre el sensor y la superficie del espécimen. La sustancia utilizada como acoplante deberá cumplir ciertas exigencias que son: permanecer en su función durante un lapso mucho mayor que el tiempo del ensayo, constituirse en una capa lo más delgada posible para evitar efectos indeseados en la señal, no producir alteración ni daño al espécimen, no alterarse en sus propiedades a la temperatura de trabajo, no emitir ruido. Entre las sustancias utilizadas para este fin se pueden mencionar: la grasa, el aceite, la glicerina, el agua, el cemento dental, etc. En la tabla 4.3 se muestran la densidad, la velocidad de propagación de ondas y la impedancia acústica para algunas de estas sustancias.

Tabla N° 4.3. Densidad, velocidad de propagación de ondas e impedancia acústica para algunas sustancias

Sustancia	Densidad (ρ) en 10^3 kg/m^3	Velocidad ondas longitudinales en m/s	Velocidad ondas transversales en m/s	IMPEDANCIA ACUSTICA en $10^5 \text{ Kg/m}^2 \cdot \text{s}$ ($Z=\rho C_L$)
Aceite (SAE 20 a 30)	0,89-0,961	1,74	-	1,5-1,7
Agua destilada (20° C)	1	1,483	-	1,48
Alcohol etílico (20°C)	1,26	1,92	-	2,4
Glicerina (20° C)	0,79	1,17	-	0,92
Aire (20° C)	0,0012	0,33	-	0,00043

Sustancia	Densidad (ρ) en 10^3 kg/m^3	Velocidad ondas longitudinales en m/s	Velocidad ondas transversales en m/s	IMPEDANCIA ACUSTICA ($Z=\rho C_L$) en $10^5 \text{ Kg/m}^2 \cdot \text{s}$
Acero	7,85	5,82	3,19	45,7
Acero inox. austenítico	8,03	5,66	3,12	45,5
Acero inox. martensítico	7,67	7,39	2,99	56,7
Aluminio	2,71	6,32	3,08	17,1
Latón	8,6	3,83	2,05	33
Metal duro	11-15	6,8-7,3	4,0-4,7	75-110
Níquel	8,9	5,63	2,96	50
Plomo	10,9	2,6	0,81	23,6
Cuarzo	2,65	5,76	-	15,3
Teflón	2,2	1,35	-	3,0
Plexiglás	1,18	2,73	1,43	3,2

4.5.3 Preamplificadores

Las señales de EA proporcionadas al sistema electrónico por el sensor tienen dos características que deben resolverse en las proximidades del mismo. Una es la adaptación de impedancias entre el sensor y la línea de transmisión de la señal, que puede tener muchos metros de longitud. Por otro lado la muy baja amplitud de la señal eléctrica transmitida. Si la extensión del cable de interconexión al equipo es grande, la

señal sufrirá una atenuación que producirá la pérdida de la información por una baja relación señal ruido.

Por tal motivo, próximo al sensor, en general a una distancia no mayor que 150 cm, se coloca un preamplificador, que permite adaptar impedancias y amplificar localmente la señal de EA. Típicamente los preamplificadores tienen una ganancia fija de 40 dB, es decir una amplificación de 100 veces. Otros pueden modificar su ganancia en pasos, a valores de 0 dB, 20 dB, 40 dB o 60 dB. Dado que el preamplificador estará lejos del equipo de EA, este le proveerá alimentación mediante una tensión continua que por lo general es de 24 V o 28 V (según el fabricante), por el mismo cable coaxial por el que se recoge la señal de EA.

La entrada del preamplificador también debe estar preparada para eliminar tensiones altas, generadas por el cristal piezoeléctrico del sensor, cuando es involuntariamente golpeado.

Con el objeto de disminuir el nivel de ruido y ganar en practicidad existen sensores con el preamplificador incluido. En ese caso, el nivel de ruido disminuye aproximadamente a la mitad, respecto a la configuración convencional. Generalmente los preamplificadores integrados comerciales poseen una ganancia fija de 40 dB.



Preamplificadores de EA de distintos fabricantes, a y b con entrada diferencial y c y d con entradas simples y diferenciales

4.5.4 Equipo de EA. Amplificador. Parametrizador. Digitalizador.

La etapa siguiente al preamplificador es lo que se suele denominar “equipo de EA”, el cual suele estar en una unidad física independiente.

Básicamente se pueden describir las siguientes etapas que normalmente tiene un equipo de EA:

- Alimentación de los preamplificadores.
- Amplificación.
- Filtrado en amplitud (umbral).
- Filtrado en frecuencia.
- Conversión analógica digital.

- Detección de fuentes de EA.
- Parametrización analógica.
- Parametrización digital.
- Adquisición de la señal.
- Tratamiento de los parámetros mediante algoritmos.
- Localización de fuentes.

La etapa cero de un equipo de EA es la alimentación de los preamplificadores de los sensores. La primera etapa, la de amplificación, suele ser indispensable para el estudio de procesos de EA de muy baja amplitud, en los cuales los preamplificadores no son suficientes para lograr un voltaje aceptable para el procesamiento de la señal. Las características de un amplificador de EA deben permitir el manejo de señales en un amplio rango de frecuencias (desde algunas decenas de kHz hasta algunos MHz). Valores típicos de la amplificación de esta etapa pueden ir desde 0 dB hasta 60 dB. Iniciando el procesamiento de la señal el primer punto a tener en cuenta es lo que se conoce como umbral o filtrado en amplitud. El operador debe fijar un nivel de tensión (o umbral), y luego las señales que lo sobrepasan son calificadas como señales de EA. Si el umbral fuera tan bajo como el ruido, se estaría contabilizando al ruido como señales de EA y por el contrario si se elevara mucho estas podrían perderse. La siguiente etapa consiste en un conjunto de filtros analógicos pasa alto y pasa bajo, que permiten recortar el ancho de la banda. Esto puede servir por ejemplo para eliminar ruidos sintonizados fuera de las frecuencias de estudio de la señal. Los equipos de EA previos a la era digital realizaban la parametrización, detección y localización de la señal de manera analógica. La mayoría de los equipos de EA que se comercializan en la actualidad digitalizan la señal para su posterior parametrización, adquisición y procesamiento. La conversión analógica-digital típicamente se realiza con una resolución en voltaje que va desde los 8 hasta los 18 bits y con tasas de muestreo temporal variables desde cientos de kHz hasta decenas de MHz, eligiéndose los modelos de equipos, así como los ajustes del mismo en función de las frecuencias a medir. A partir de características de la señal tomada se produce la detección de la actividad de las fuentes de EA en el material examinado. Luego en el equipo se procesa la señal de manera tal que se puedan hallar los parámetros característicos de la misma. En general, los equipos comerciales muestran una uniformidad en el tipo de parámetros disponibles. El proceso físico de la emisión de ondas elásticas es denominado evento de EA, por lo tanto un evento de EA podrá observarse como “hits” o golpes en cada uno de los canales del equipo. Cada vez que la onda elástica llegue a un sensor y tenga una amplitud mayor que el umbral se define que se ha registrado un “hit” o golpe en ese canal. Estas señales eléctricas se corresponden a las ondas de EA producidas por la fuente de EA, que han viajado a través del material estudiado y golpeado los sensores.

4.5.4.1 Adquisición de formas de onda (“waveforms”)

Además de la parametrización, algunos equipos permiten la adquisición de la señal, en un formato que se denomina “forma de onda” (en inglés “waveform”). Esta se realiza generalmente una vez que la señal supera el umbral, entonces para cada canal del equipo, además de tomarse los parámetros, se guarda un registro digital de una porción de la señal que típicamente tiene una duración de entre algunos milisegundos hasta casi un segundo, dependiendo de la tasa de muestreo y del tamaño del número de muestras. Estas ondas pueden almacenarse, dependiendo del modo de captura, como archivos correspondientes a cada hit. El tamaño de los archivos dependerá del equipo, y el tiempo muestreado será inversamente proporcional a su tasa de muestreo, si es por ejemplo de 5 millones de muestras por segundo y el archivo tiene 15000 puntos se

adquirirán 3 milisegundos de señal. Generalmente este procedimiento requiere más recursos de hardware que la parametrización.

4.5.4.2 Adquisición de la señal completa o “Streaming”

Otro modo de adquisición es el modo de digitalización y almacenamiento continuo a tiempo real o “streaming”, en el cual la señal adquirida se envía directamente a disco rígido, permitiendo la medición de la señal completa (no solo los hits) desde el inicio hasta el fin del ensayo. En este caso generalmente se puede prescindir de un umbral. Estas señales guardan toda la información de la EA existente en el ensayo. Las limitaciones de esta forma de adquisición son la frecuencia de muestreo y el tamaño del sitio de almacenamiento que limitan el ancho de banda y la duración de la señal medida, respectivamente. Entre las ventajas de este método es la posibilidad de eliminar un factor de subjetividad que es el umbral. La desventaja de este método es la gran cantidad de información almacenada y su muy costoso procesamiento desde el punto de vista del manejo de los archivos de tamaños descomunales, con mayoría de información espuria.

4.5.5 Modelo de la EA a partir de la convolución

Las tres etapas mencionadas anteriormente, generación, propagación y detección, en las que se separó el fenómeno de EA, más la suposición de linealidad, permiten modelar el proceso a través de una serie de operaciones de convolución.

$$V(t) = T(t) * [G(t) * M(t)]$$

La variable $V(t)$ es la magnitud del potencial eléctrico (generado por la onda elástica) a la salida del sensor, $M(t)$ es una función representativa de la fuente de EA, $G(t)$ es la función de Green elastodinámica del medio y $T(t)$ es la respuesta del sistema de detección al impulso. En algunos casos particulares el análisis del proceso inverso permite caracterizar la fuente de EA midiendo los voltajes generados en los sensores.

4.5.6 Fuentes de ruido que afectan las mediciones de EA

La clasificación de los tipos de ruido que pueden encontrarse presentes durante la realización de mediciones de la EA es arbitraria, y suele hacerse de distintas maneras. Una forma de definirla es a partir de la naturaleza física del tipo de onda que se suma a la señal producida por la fuente de EA que se quiere caracterizar, esto es por ejemplo si el ruido es eléctrico/electromagnético o mecánico. Otros autores proponen categorizarlos a partir de dividir los tipos de ruido en aquellos producidos en el sistema de medición de los ambientales. A continuación se combinan ambos criterios.

Ruidos producidos por el sistema de medición

Dentro de los posibles ruidos producidos por el sistema de medición podemos citar

Ruidos electromagnéticos como:

- Ruido blanco de la señal eléctrica, generado por los componentes electrónicos del sistema de medición, tanto en el preamplificador como en el equipo de EA.
- Ruido eléctrico de conmutadores (“relays”) y monitores de PC.
- Ruido de radiofrecuencia de la transmisión de la señal (p.ej. sensores inalámbricos).
- Ruidos mecánicos (ondas elásticas) dentro del equipo
- Conmutadores (“relays”), monitores de PC, ventiladores, piezas móviles, etc.

Se supone que en los diseños modernos todos estos ruidos han sido minimizados por los fabricantes de los sistemas de medición, llevándolos a valores despreciables frente a las demás fuentes involucradas en la medición.

Ruidos ambientales

Dentro de los posibles ruidos ambientales podríamos citar tanto para mediciones en planta, de componentes resguardados o a la intemperie, así como para mediciones en laboratorio:

Ruidos electromagnéticos de:

- Interruptores eléctricos, motores, soldadoras, máquinas eléctricas en general.
- Tubos fluorescentes.
- Fuentes de alimentación conmutadas.
- Radiotransmisores: estaciones de radio (principalmente en la banda de frecuencia de AM), radares, equipos de comunicación en su amplio rango, etc.
- Descargas atmosféricas.

Nota: las fuentes de las primeras tres categorías, una vez detectadas, podrían ser evitadas anulando el funcionamiento de las mismas. Las fuentes de las siguientes categorías son imposibles de anular.

Ruidos mecánicos (sonido y ultrasonido) de:

- Motores y máquinas trabajando en la planta o en el laboratorio.
- Fricción de los soportes del componente o pieza a estudiar.
- Fricción de los cables de los sensores, manqueras, y otros colgantes que estuvieran en contacto con el componente a medir.
- Fricción metal contra metal (p.ej. tornillos sin fin, rodamientos, engranajes, otras piezas móviles de la misma máquina etc.).
- Golpes de objetos materiales cercanos sobre el componente o sobre otros componentes a distancia cercana (cables, conectores, piedras, etc.) movidas por la máquina o factores externos (p.ej. viento).
- Golpes sobre el componente por fenómenos climáticos (lluvia, granizo, etc.).
- Cavitación, pérdidas de fluido, flujo, golpe de partículas transportadas por el fluido. Ruido por bombas y válvulas. (En recipientes o tuberías con fluidos).

4.5.7 Tratamiento del ruido en los ensayos de EA

Como se ha visto, las posibles fuentes de ruido en un ensayo de EA son múltiples y de variadas consecuencias en general perjudiciales. Por esta razón, lo que se busca a priori es tratar de reducirlas hasta eliminarlas antes de la toma de datos. Caso contrario, de no poder evitarse, el ruido puede filtrarse en un análisis posterior al ensayo. Al primero de los procedimientos podemos llamarlo como “Precaución”, al segundo de “Discriminación”. De manera terminante el ruido debe ser eliminado antes de analizar los datos medidos, ya que podría producir conclusiones erróneas.

4.5.7.1 Métodos de precaución del ruido ambiental

Para evitar que el ruido ambiental produzca un efecto nocivo en las mediciones, puede operarse en la zona del ensayo aminorando las fuentes de ruido. Hay dos procedimientos que pueden ayudar mucho que son el aislamiento mecánico, y el eléctrico. También dentro de lo posible se pueden apagar equipos u otras fuentes de ruido como se mencionó previamente.

4.5.7.1.1 Aislamiento de ruidos mecánicos

Puede realizarse utilizando materiales altamente atenuantes (o amortiguadores) para las ondas mecánicas tales como plástico, goma, madera, etc. De esta manera se puede interrumpir el contacto entre metales que actúan como guías de onda para el ruido que está en el rango de frecuencia de las señales de EA. Otra manera de usar los materiales atenuantes puede ser en los componentes funcionales de los equipos mecánicos involucrados en la medición, por ejemplo el ruido de una bomba de presurización de una estructura puede disminuirse uniendo la bomba y la estructura por un flexible de goma.

También pueden construirse barreras para fuentes de ruido como golpes de piedras, lluvia, etc.

4.5.7.1.2 Aislamiento de ruidos eléctricos

La primera forma de aislamiento de los ruidos eléctricos es la aplicación del concepto de jaula de Faraday. Se rodean por superficies conductoras a los elementos sensibles a la detección de REM (Ruido Electromagnético) y se conectan a una buena tierra. Entonces de esa manera se aislará muy eficientemente el sistema, evitando perturbaciones externas. Dentro de este criterio esta la utilización de cables coaxiales con sus correspondientes conectores.

Es importante corroborar de antemano que la tierra a la que se conectarán los equipos involucrados en el ensayo de EA es correcta, y se encuentra según norma, aun antes de instalar los equipos.

Como parte de la precaución de este tipo de ruido se puede mencionar también la utilización de transductores diferenciales que permitirán evitar toda una gama de fuentes de ruido. Otra precaución podría ser la colocación de filtros de ruido de línea.

4.5.7.2 Filtrado por hardware de las señales de EA

El filtrado podrá ser en amplitud y en frecuencia. El primero se trata con el umbral. El segundo con filtros en frecuencia como los pasa bajos, pasa alto y pasabanda.

4.5.7.2.1 Prevención del ruido por umbral

El primer paso para prevenir el ruido es definir un umbral de detección por medio de un voltaje en un circuito electrónico a la entrada del equipo de EA que habilita el registro de la señal cuando esta es mayor que dicho umbral. Si el ruido no supera el umbral de detección este no será medido por el equipo de EA, aunque pueden existir fuentes de ruido que estén por encima de este y sean registradas.

4.5.7.2.2 Prevención del ruido mediante la aplicación de filtros en frecuencia

- Filtros físicos

El filtrado en frecuencia de la señal puede efectuarse por “hardware”, es decir colocando filtros físicos en el preamplificador o en la entrada del equipo de EA, o por software a partir de filtrado digital de las señales (correspondiente a la etapa de discriminación).

De esta manera se puede eliminar o disminuir el ruido ambiental que afecta las mediciones. Colocando los filtros en la etapa del preamplificador, se filtrará ruido proveniente de la medición, pero no aquel que pudiera entrar al sistema por el largo cable que puede conectar el pre al equipo. Por esta razón se colocan también filtros a la entrada del equipo de EA. Estos filtros pueden ser pasa bajos para eliminar los ruidos de alta frecuencia.

También se pueden colocar filtros pasa alto para eliminar los ruidos de baja frecuencia. También se pueden colocar filtros pasabanda que contemplen ambas situaciones.

- Filtros paramétricos

Existe otra manera de prevención del ruido mediante la aplicación de filtros sobre condiciones de los parámetros de la señal de EA estudiada. En los equipos de EA actuales se pueden fijar criterios avanzados de filtrado sobre la amplitud, energía, rise time, etc. Si se conoce como debería ser el comportamiento de estos frente al proceso estudiado y frente a los ruidos conocidos se puede programar la eliminación de las señales adquiridas que no cumplan los requisitos pedidos.

4.5.7.3 Métodos de discriminación

4.5.7.3.1 Utilización de sensores guarda

Los “guardas” son sensores ubicados en posiciones estratégicas con el criterio que si resultan ser los primeros golpeados, indican que la señal no proviene de la zona de interés adonde se quiere medir, sino de alguna fuente espuria.

4.5.7.3.2 Filtros digitales

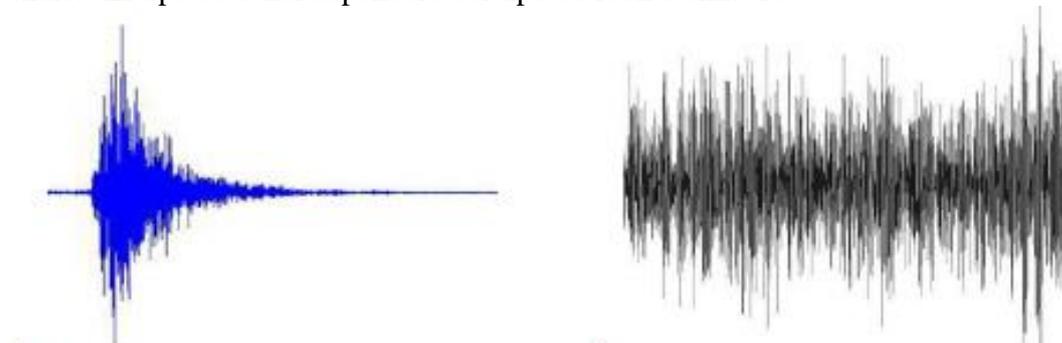
Estos filtros pueden correrse posteriormente a la medición y forman parte del software de análisis y procesamiento de las señales medidas. Si en el análisis se detecta algún tipo de ruido que hubiera pasado los filtros físicos y pudiera afectar el estudio de las señales, queda una última opción de filtrado en frecuencia que es mediante funciones matemáticas sobre las señales digitalizadas.

4.6 Señales de EA

Esta parte del trabajo tratará sobre el análisis que generalmente se realiza de las señales de EA. Según se trabaje con los parámetros o con la señal digitalizada es conveniente dividir la explicación en dos partes, por un lado el estudio de los parámetros y por otro, el análisis de las formas de onda, es decir la señal digitalizada.

4.6.1 Señales tipo explosión y las señales de tipo continuo

Como se discutió en la introducción las señales de EA generalmente se clasifican en: señales transitorias de tipo explosión y señales de tipo continuo (Fig. 6.1). Las primeras tienen comienzo y final, y por lo tanto una duración definida, dependiente de la fuente y del medio. Las otras durarán mientras el proceso que las genere esté activo, y en general estarán constituidas por un número muy grande de señales transitorias [Ono (2005)]. En los procesos que generan la EA pueden superponerse ambos tipos de señales. El tipo de señal dependerá del tipo de fuente emisora.



Señales de EA. Tipo Explosión / Tipo Continua

4.6.2 Estudio de los parámetros

Como se ha visto anteriormente, en general se habla de dos tipos de señales de EA; una continua y una tipo explosión que contiene una importante cantidad de componentes armónicos. En muchos casos no se justifica digitalizar y estudiar la onda de EA, y solo basta con parametrizarla, perdiendo información, pero ganando tiempo de procesamiento de los datos.

En principio el primer parámetro que se debe fijar en general es el umbral, a partir del cual están definidos los demás. Según norma se definen:

- El umbral de detección de EA: Nivel de tensión que debe sobrepasarse para que una señal de emisión acústica sea detectada y procesada.
- El umbral de tensión: Nivel de tensión de un comparador electrónico tal que las señales con amplitudes mayores que este nivel serán reconocidas. El umbral de tensión puede ser ajustable, fijo o automáticamente flotante. .
- El umbral flotante: Cualquier umbral con una amplitud establecida por una medición de tiempo promedio de la señal de entrada.

Los parámetros característicos de la EA están típicamente definidos para señales tipo explosión y algunos pueden extenderse a las señales continuas. En la descripción de los parámetros que se realiza a continuación se explicitará esa posibilidad y también la dependencia con el umbral. Definidos los parámetros:

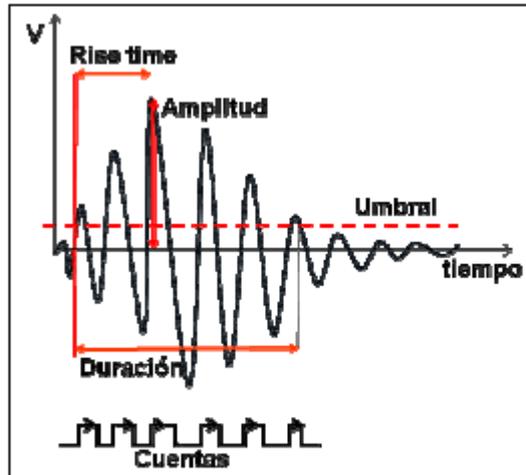
- Tiempo de ocurrencia (“hit time”): El “tiempo de llegada” o de “ocurrencia” o de “arribo” de la señal es el tiempo al cual se considera que comienza el hit. Esto ocurre cuando la señal supera el umbral, por lo cual dependerá de su valor.
- Amplitud máxima o “amplitud”: Es el valor máximo de la amplitud de la señal de EA. Este valor está relacionado con la magnitud de la fuente y propiedades del material. En general se expresa en dBEA dado que la variación en mV es de varios órdenes. Ha sido uno de los primeros parámetros utilizados para estudiar los fenómenos de EA. También este parámetro es uno de los pocos útiles en la descripción de señales de tipo continuo. No depende del umbral (si lo supera). La definición de los dB de EA, llamados dBEA es particular para este método, y está referida a una señal de 1μV en el sensor de EA. Un dBEA se define como:

$$dBea = 20 \log \left[\frac{Vs}{1\mu V} \right]$$

Donde Vs es el voltaje medido a la salida del sensor.

- Duración: La duración es el tiempo transcurrido desde que la señal cruza por primera vez el umbral hasta que lo hace por última vez. Depende de la magnitud de la fuente, del tipo y forma del espécimen, de las características del sensor utilizado y del valor del umbral. También depende de la reverberancia del material Tiempo de subida (“rise time”): Es el tiempo desde que la señal cruza el umbral hasta que alcanza su amplitud máxima. Está condicionado por la dispersión de la onda en su viaje entre la fuente y el sensor. Depende del umbral. Da una idea del tiempo de actividad de la fuente. Puede ser útil para filtrar ruido. Tiene estrecha relación con el período de actividad de la fuente.
- Número de Cuentas (“ring down counting”): Es la cantidad de veces que la señal cruza el umbral. Históricamente fue uno de los primeros parámetros de EA por su facilidad de implementación electrónica. Depende del umbral y está relacionado con la amplitud.

- Energía MARSE: Es el área medida bajo la envolvente de la señal rectificada (“Measured Area under Rectified Signal Envelope”). Esta parametrización no depende del umbral pero si de la amplitud y la duración de la señal. La energía MARSE es ampliamente utilizada en la implementación de la EA como método de END.



Parámetros que caracterizan a un evento de EA tipo Burst

- Valor cuadrático medio o RMS (“Root Mean Square”): Dada la aleatoriedad de la ocurrencia de la EA, para describir una emisión no periódica se debe utilizar algún parámetro que pueda relacionarse con la energía contenida en la señal. Este es por ejemplo el valor RMS de la señal de EA, que se calcula mediante la ecuación:

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} [V(t)]^2 dt}$$

Donde V es el voltaje medido. Está relacionada con la energía media. Sirve para analizar las señales de EA de tipo continua.

Energía eléctrica (o absoluta): se define como

$$Ec = \frac{1}{R} \int [V(t)]^2 dt$$

Siendo V voltaje a la salida del sensor y R una resistencia de referencia.

- Los parámetros referidos al voltaje energía o potencia de la señal en general son valores relativos y no absolutos, ya que no se han tenido en cuenta en la medición ni las pérdidas en el transductor ni la atenuación del material.
- Frecuencia media (FM): Este parámetro se define como el cociente entre el número de cuentas y la duración de cada hit. La frecuencia media da una idea de la cantidad de cruces de la señal por el umbral por unidad de tiempo (ciclos por segundo), lo que puede relacionarse primitivamente con una frecuencia asociada a la onda de EA, no en un sentido estricto sino como una aproximación.
- Potencia media (PM): Este parámetro que en realidad debería denominarse potencia MARSE media, fue creado con el fin de independizar el parámetro energía MARSE de la duración del hit, para poder utilizarlo indistintamente tanto en señales continuas como en señales tipo explosión (con inicio y fin). De esta manera, la PM se define como el cociente entre la energía MARSE y la duración del hit.

Representación de los parámetros

Una vez que los parámetros son medidos, se almacenan en el equipo de EA como archivos de datos, de los cuales en general se pueden extraer las listas de los parámetros para cada hit del ensayo como archivos “.txt”. Posteriormente estos datos pueden analizarse con algoritmos en programas de procesamiento matemático, y con software específico provisto por los fabricantes de equipos. En la mayoría de los equipos, los parámetros medidos también pueden graficarse mientras se van registrando o luego de la medición. Durante el transcurso del ensayo se puede monitorizar los principales parámetros medidos mediante la lista de parámetros en función del tiempo, mediante el método gráfico, o por medio de ambas, en una pantalla.

Tabla N° 4.4 Parámetros característicos de las señales de EA

CARACTERÍSTICA	RESOLUCIÓN	UNIDADES	RANGO
Tiempo del hit	0,250	Microsegundos	0-407 días
Amplitud	1 dB	1 dB	10-100 dB
Energía (PAC)	1 cuenta	10 μ V.s/cuenta	0-65535
Numero de cuentas	1 cuenta	cuentas	0-65535 cuentas
Tiempo de subida	1 μ s	microsegundos	0-65,5 ms
Duración	1 μ s	microsegundos	0-1000 ms
Energía absoluta	1 cuenta	9,31 x 10 ⁻²² Joules	2,61.10 ⁻⁸ J
Fuerza de la señal	1 cuenta	3,05 pV.s	0-1,31.10 ⁸ pV.s
Cuentas hasta el pico	1 cuenta	cuentas	0-32768 cuentas
Potencia parcial	1 cuenta	% de la potencia total	0-100 %
RMS	0,0002V	V	0-6 V
ASL	1 dB	1 dB	0-100 dB
Umbral	1 dB	1 dB	14-99 dB

4.6.3 Estudio de las formas de onda

Como se ha mencionado anteriormente, una posibilidad de estudio de la EA puede realizarse a partir del análisis de las formas de onda. Esto significa explorar un fragmento de la señal de EA que en general es adquirida a partir de que la onda eléctrica supere un umbral prefijado en el equipo con el que se realizan las mediciones. Si bien en el pasado se han utilizado métodos analógicos de adquisición, en esta sección solo se hará referencia a estudios de la señal a partir de su conversión a formato digital. De esta manera para la adquisición de la forma de onda dependiendo de los análisis que se pretendan realizar se recomienda que se satisfaga el criterio de Nyquist, es decir que se tomen más de dos puntos por ciclo. Una vez que la onda eléctrica genera una respuesta del sensor que supera el umbral esta se adquiere y se almacena en una PC. Nuevamente en este estudio se puede discriminar entre los tipos de EA continua o tipo explosión. En general las señales de característica continua suelen variar poco su amplitud y por lo tanto el final de la adquisición no será por extinguirse la señal correspondiente a un determinado hit como ocurre en las señales tipo explosión, sino que la señal se medirá hasta un tiempo de finalización impuesto por el operador del ensayo, o por el tamaño del buffer de almacenamiento, o por la finalización de la actividad de la fuente de EA continua. Las señales pueden ser estudiadas en el dominio temporal o en el dominio de frecuencias.

4.6.3.1 Estudio de las formas de onda en el dominio temporal

La información más importante de la señal está determinada por el valor de la amplitud de la señal generada por el sensor, la cual está relacionada con la energía de los procesos que actúan como fuentes de EA. La distribución de la amplitud dará idea de la dinámica del proceso estudiado, es decir de la distribución de la energía de las fuentes. Dada la forma de onda, se puede obtener información importante del promedio de las amplitudes, del promedio de las amplitudes al cuadrado y de la dispersión de la amplitud.

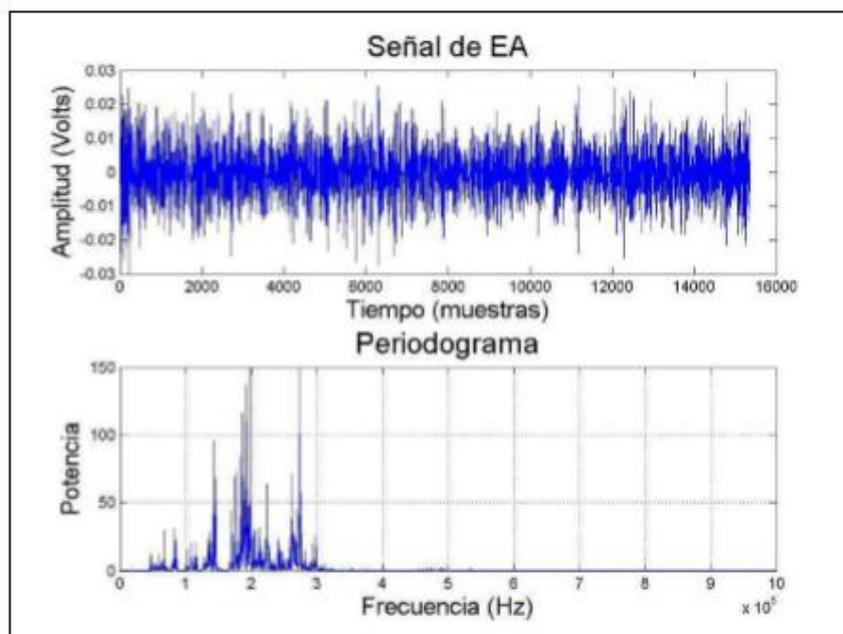
4.6.3.2 Estudio de las formas de onda en el dominio de la frecuencia y en el dominio tiempo frecuencia. Análisis espectral

- En el dominio de la frecuencia

Además de los parámetros mencionados, calculados o medidos por el equipo de EA, y de las señales en el tiempo, mucha información de los mecanismos de las fuentes de EA puede obtenerse del estudio de las formas de onda en el dominio de la frecuencia. El proceso de emisión y la energía emitida como ondas elásticas pueden estudiarse a partir del análisis del espectro de frecuencias de las señales. El espectro de una señal, o forma de onda de EA, depende de los mismos parámetros que la señal temporal, es decir la combinación de dipolos, el comportamiento temporal de la fuente y la distancia de la fuente al detector.

En el análisis espectral en el dominio de la frecuencia, para señales estacionarias o pseudo-estacionarias, la herramienta más utilizada en general es la transformada rápida de Fourier (FFT). Algunos posibles estudios basados en la aplicación de la FFT a señales de EA estudian:

- Amplitud de los picos dominantes en el espectro
- Potencia espectral en rangos de frecuencia específicos.
- Características estadísticas de los espectros de potencia.
- Frecuencia del pico más alto del espectro.



Señal de EA y períodograma por FFT

-En el dominio tiempo - frecuencia

En el dominio tiempo-frecuencia, para señales no estacionarias se suele aplicar la transformada de Fourier de tiempo corto (o STFT), y en los últimos años se ha generalizado la utilización de una nueva descomposición de la señal a partir de la Transformada Onditas (TO) o “wavelets”. Estas onditas permiten (al igual que la STFT) calcular y graficar la potencia de una señal en función de la frecuencia y el tiempo. La descomposición en onditas, en lugar de hacerse en función de ondas armónicas como en Fourier, se hace a partir de unas funciones denominadas onditas madres, que deben cumplir ciertas condiciones particulares para formar una base de descomposición

A continuación se hará una breve descripción de la herramienta que utilizaremos en el proyecto para la caracterización de las señales de EA en el espectro tiempo-frecuencia:

- Transformada de Fourier de tiempo corto (STFT)

La STFT o “transformada de Gabor” fue la primera técnica tiempo frecuencia utilizada para el análisis de señales de EA en maquinado. Utiliza una ventana que se va deslizando a lo largo del eje del tiempo para caracterizar los cambios en el espectro de frecuencia para distintos intervalos de tiempo. Los coeficientes espectrales se calculan para los datos incluidos en la ventana móvil para cada posición de esta.

4.7 Comparación con otros métodos de medición

El método de la Emisión Acústica difiere de otros métodos no destructivos en dos aspectos principalmente.

En primer lugar, la energía que se detecta se libera del interior del material que se está inspeccionando, a diferencia de otros en los cuales es necesario inducir una energía en los materiales, por ejemplo rayos X, rayos gamma, ultrasonidos, energía térmica o microondas.

En segundo lugar, mediante la técnica de Emisión Acústica se pueden detectar procesos dinámicos (movimientos) asociados con la integridad estructural como el crecimiento de grietas o la deformación plástica, mientras que los métodos convencionales de ensayos no destructivos sólo permiten detectar discontinuidades geométricas.

Otras ventajas de la EA respecto de otros ensayos no destructivos

1. Con un solo ensayo se pueden detectar y evaluar la importancia de discontinuidades en la totalidad de una estructura.
2. Permite la detección de fuentes, dependiendo de las propiedades de los materiales, hasta varios metros de distancia.
3. Se puede localizar el defecto a partir de la diferencia del tiempo de llegada de las señales de EA a los transductores.
4. Permite detectar algunas discontinuidades inaccesibles a otros métodos de END.
5. Algunos ensayos se pueden realizar en servicio, ya que la EA requiere poco o ningún tiempo de inactividad.
6. Se puede emplear para impedir tanto como para evitar el fallo catastrófico de un sistema como para conocer la tensión máxima a la que se puede someter una estructura o componente.
7. Al ser un ensayo no-direccional no tiene mucha importancia la posición relativa entre los sensores y las discontinuidades a detectar.

Tabla N° 4.5 Comparación con otros métodos de medición

Características	Emisión Acústica	Otros Métodos
Descubrimiento rápido y temprano de los defectos	Si	No
Detecta el movimiento del defecto	Si	No
Detecta la forma del defecto	No	Si
Detecta la disposición de posibles defectos	Si	No
Requiere someter la pieza a esfuerzos	Si	No
Repetitividad del ensayo	Cada ensayo en único	Repetitivos
Sensibilidad al tipo de material	Alta	Baja
Sensibilidad a la geometría de la pieza	Baja	Alta
Intrusión en el proceso o en la planta	Baja	Alta
Acceso requerido	Solo a los sensores	A toda el área de inspección
Inspección	Toda la pieza a la vez	Por zonas
Sensibilidad a la detección de crecimiento/movimiento de los defectos	Alta	Baja
Permite monitorización global	Si	No
Permite monitorización en tiempo real	Si	No
Se requiere limpieza de la superficie	No	Si
Principales problemas	Ruido, Interpretación de los resultados	Acceso, geometría e Interpretación de los resultados

VENTAJAS

- Inspección en servicio:

La emisión acústica permite evaluar la integridad estructural de elementos como vasijas a presión en línea, bajo las condiciones normales de operación y las experiencias mientras está en uso.

- Inspección de toda la estructura:

Si se determina bien el área donde se fijará el sensor la inspección se puede realizar con un número pequeño de sensores. Esta característica es muy útil en estructuras largas, esferas, intercambiadores de calor en donde el acceso y áreas de inspección son difíciles y requieren demasiado tiempo.

- Permite encontrar defectos significativos:

La Emisión Acústica es utilizada bajo condiciones reales de carga esto permite diferenciar las anomalías que están creciendo y las que son insignificantes estructuralmente. Con otras técnicas, es posible establecer la presencia de una anomalía, pero es difícil determinar sus defectos cuando la estructura está en servicio.

- Permite realizar una medición de la severidad estructural:

Utilizando los procedimientos de inspección y análisis se puede dar una medida de una fuente activa de Emisión Acústica en una estructura. Existen programas informáticos que nos dan parámetros de los datos de Emisión Acústica cuando inspeccionamos la estructura bajo los procedimientos determinados.

- Es un método no-invasivo

Los sensores son instalados en la parte exterior del recipiente. Sólo se necesitan pequeños huecos de acceso para la instalación de los sensores y el resto de aislamiento permanece sin perturbación.

- Datos permanentes

La inspección por Emisión Acústica deja datos guardados en el ordenador. Estos datos están disponibles para hacer futuros análisis y pueden ser usados para futuras referencias y así ser comparados con datos de estructuras similares

DESVENTAJAS

- La señal de EA a la salida de los transductores es la combinación de la onda que proviene de la fuente, de sus modos de propagación y de la respuesta del transductor.
- A veces es difícil diferenciar entre señales características de EA con las señales producidas por el ruido
- Requiere una elevada especialización y destreza de los operarios, especialmente en la fase de análisis de los datos.

CAPITULO 5 - Desarrollo en laboratorio – Análisis de ensayos de Calibración

5.1 Instrumentación utilizada

5.1.1 Descripción del montaje experimental de la cuba de rigidez dieléctrica.

El montaje experimental se llevó a cabo con una cuba realizada según norma IEC 60156, con sus correspondientes medidas y según especificaciones técnicas (Fig. 5.1 y plano 01). La construcción de la misma se estimó en tres semanas. (Ver plano 01). Esta cuba se realizó en dos piezas, la tapa que contiene los electrodos y el depósito que contiene el líquido a ensayar. Estas se unen a través de espigas elásticas utilizadas para sujetar la tapa al depósito y poder retirar la misma en caso de modificar la distancia de separación de los electrodos o ensayar distintos aceites.

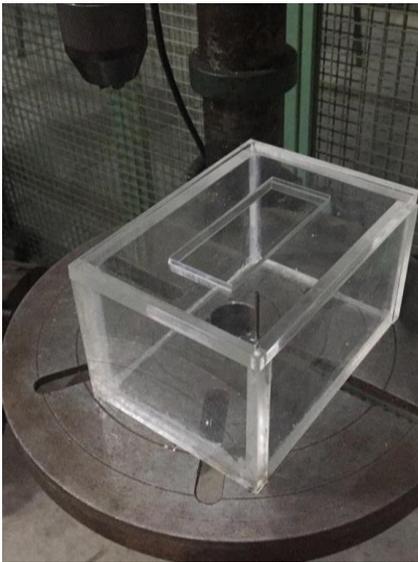
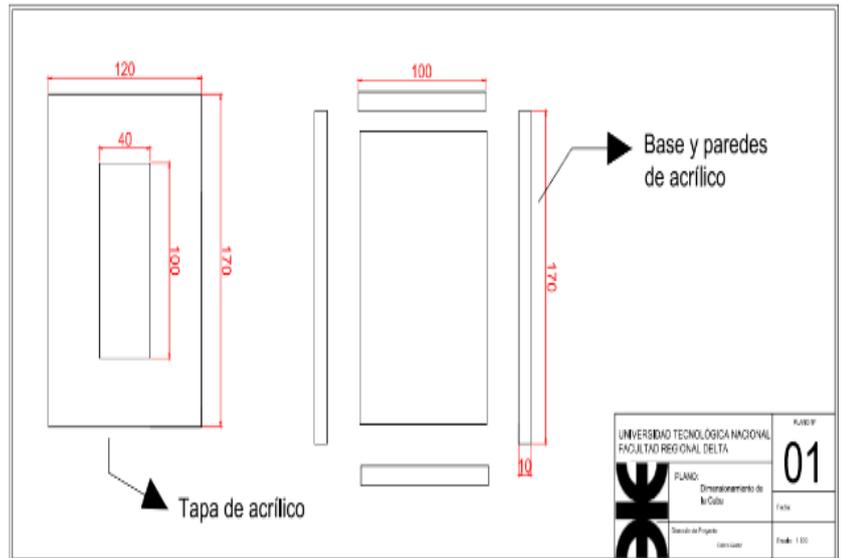


Fig.1 Armado de Cuba



Plano 01

Los electrodos se realizaron de Latón, una aleación de cobre y Zinc, la cual está contemplado por la norma como aleación válida para realizar este tipo de ensayos.

Estos electrodos fueron realizados por el sector de tornería del departamento de Ing. Mecánica de la Facultad Regional Delta en base a los planos constructivos brindados por el grupo de proyecto de Ing. Eléctrica.

Los electrodos se hicieron en piezas separadas con una varilla roscada de manera de poder variar la distancia entre ambos electrodos y así poder modificar la tensión aplicada en los ensayos. Por otro lado el cabezal de la pieza se realizó con una rosca interna de manera de poder roscar la varilla dentro del cabezal (Ver figura 5.2a). Los electrodos fueron pulidos a espejo (Fig. 5.2b) y el periodo de fabricación de los mismos se estimó en 1 mes.



Fig. 5.2 a) Electrodo esférico y perno de fijación



Fig. 5.2b Electrodo pulidos

Posteriormente, estos electrodos se montaron con planchuelas del mismo material quedando como se observa en el plano 03 anexo. Sobre estas planchuelas se hicieron agujeros pasantes y se colocaron tornillo M10 con rosca y contrarosca para sujetar las planchuelas a la tapa de la cuba (Fig. 5.4 y Fig. 5.5). Las planchuelas se limaron para mejor apariencia. El intervalo de tiempo para este elemento fueron 2 semanas. Por otro lado se entregaron las tuercas al tornero las cuales debieron cortarse a la mitad para usarse como tuerca y contratuerca sobre la planchuela. Esta tarea se realizó en 1 semana.



Fig. 5.4 Cuba con planchuelas sujetas a la tapa

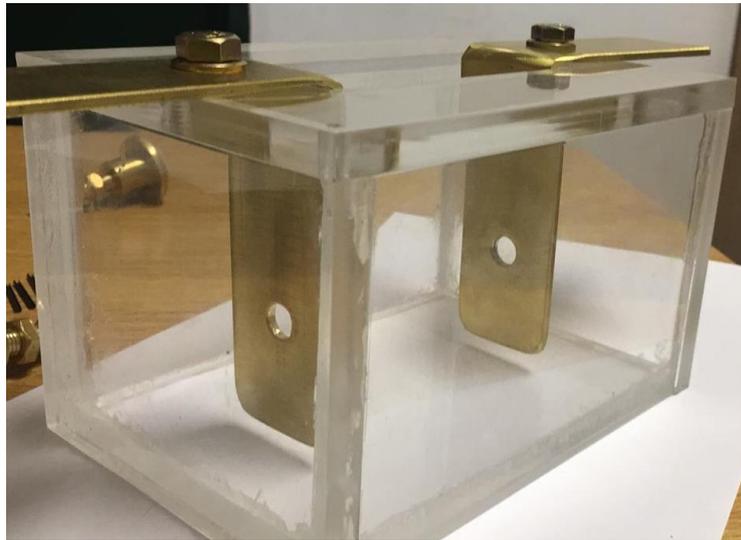


Fig. 5.5 Cuba con planchuelas sujetas a la tapa

Finalizado esto, se procedió a colocar las partes de las cuba y al armado de la misma (Fig. 5.6) ajustando manualmente detalles de montaje como la disposición de un electrodo cuya varilla roscada hacia tope con una de las paredes de la cuba, en el cual se debió sacar 4 hilos de la misma (Fig. 5.7 a y b). Las tareas posteriores al armado de la cuba (defectos, pruebas de pérdidas con líquidos, etc.) llevaron un periodo de tiempo de 2 semanas.



Fig. 5.6 Cuba finalizada donde se observan planchuelas, bornes de conexión, electrodos, tornillos de regulación, etc.

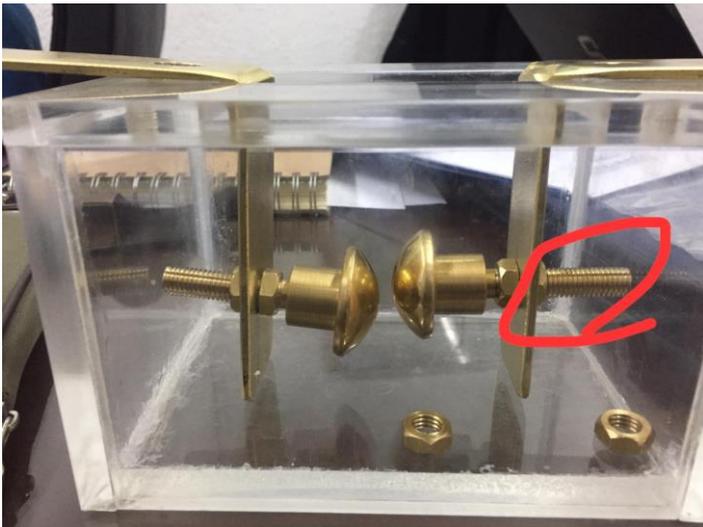


Fig. 5.7 a) Tope de varilla con cuba



Fig. 5.7 b) Corte de hilos de varilla

5.1.2 Equipos y cadena de medición de la EA

Los sensores y equipos de EA fueron proporcionados por el grupo de emisión acústica (GEA) de la Facultad Regional Delta.

A continuación se observa un esquema en bloques de la cadena de medición de EA.

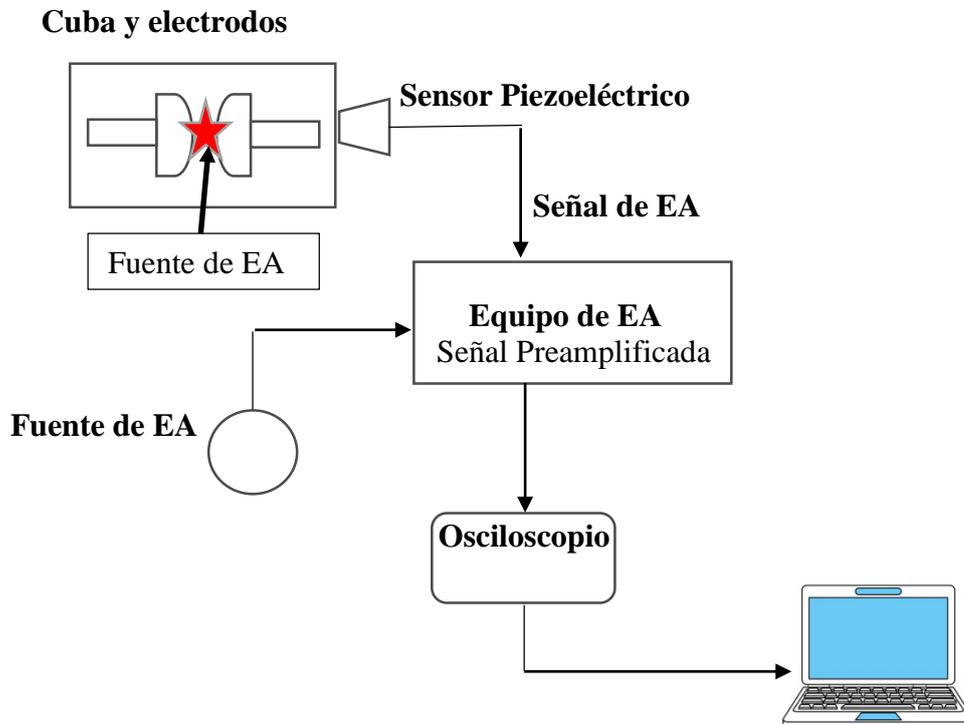


Diagrama en bloque de la cadena de medición de EA

Los equipos del diagrama en bloque de la cadena de EA se detallan a continuación:

- Sensor piezoeléctrico diferencial

El sensor piezoeléctrico diferencial es el encargado de adquirir la señal de presión de EA y convertirla en una señal eléctrica que puede ser transmitida y amplificada por el equipo de EA para luego ser digitalizada.

Se denomina diferencial porque el sensor está constituido por dos piezoeléctricos conectados de tal forma que eliminan el ruido en común. El sensor utilizado en estos ensayos es modelo WB con un rango de frecuencia de operación de 125 – 1000 kHz, tiene un cabezal cilíndrico de acero inoxidable el cual se conecta a la pared de la cuba, un cable de longitud de 1 metro conectado al equipo de EA, conector BNC, rango de temperatura de operación de -65°C a 177°C .



Fig. 5.8 a) Sensor piezoeléctrico diferencial

A continuación se muestra una respuesta en frecuencia del sensor utilizado (Fig. 5.8b). La hoja de datos del sensor utilizado se anexa en el presente trabajo.

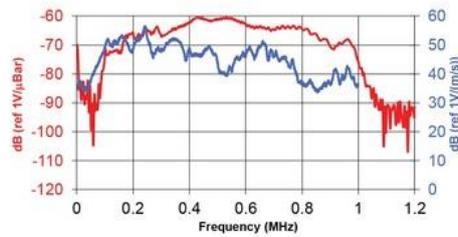


Fig. 5.8 b) Respuesta en frecuencia del sensor

- Equipo de EA

Es el encargado de adaptar las impedancias y preamplificar la señal de EA para que pueda ser transmitida por largas distancias. El nivel de preamplificación puede ser de 10-20-30-40-50 y 60 dB que se seleccionan en forma manual. La señal de EA que proveniente del sensor se retransmiten por cables coaxiales tipo RG58 a distancias de varios metros. El equipo cuenta con una fuente de alimentación de 24 V de continua. También cuenta con dos conectores para sensores, uno diferencial y otro con preamplificador incorporado, para el cual debe brindar una alimentación de 24 VCC por el mismo canal que ingresa a señal de EA. Adicionalmente este equipo cuenta con 2 salidas de señal, una de forma de onda y otra para el valor RMS de la señal de EA integrada en un intervalo de tiempo que puede variarse en 1 -20-40 ms. Este equipo es de fabricación nacional realizado por CNEA. (Fig. 5.9).



Fig. 5.9 Preamplificador y fuente de EA

- Osciloscopio digital.

El equipo utilizado es un osciloscopio digital marco PicoScope Serie 5444D que cuenta con 4 canales analógicas de entradas para señales y un módulo adicional para generar formas de onda arbitrarias. Cuenta con una banda de frecuencia de procesamiento de 200 MHz. Posee hasta 16 bits de resolución y alta tasa de muestreo. Es conectado a la computadora a través de 2 puertos USB.



Fig. 5.10. Osciloscopio digital

- Computadora

La computadora es la encargada de realizar el almacenamiento y el procesamiento de la imagen obtenida del osciloscopio para luego realizar un análisis de la señal obtenida. En este proyecto se utiliza un computadora Lenovo con procesador Intel core i7, sistema operativo Windows 10 de 64 bits y memoria RAM de 8 GB.

5.1.3 Instrumentación del laboratorio

El equipo de DPs utilizado en la práctica con el fin de simular DP y obtener los valores de ruptura de tensión fue un equipo de rigidez dieléctrica modelo RD-40 (Fig. 5.11) cuyo manual se adjunta en el correspondiente trabajo.

A continuación, se realiza un esquema en bloques del equipo de rigidez dieléctrica utilizado.

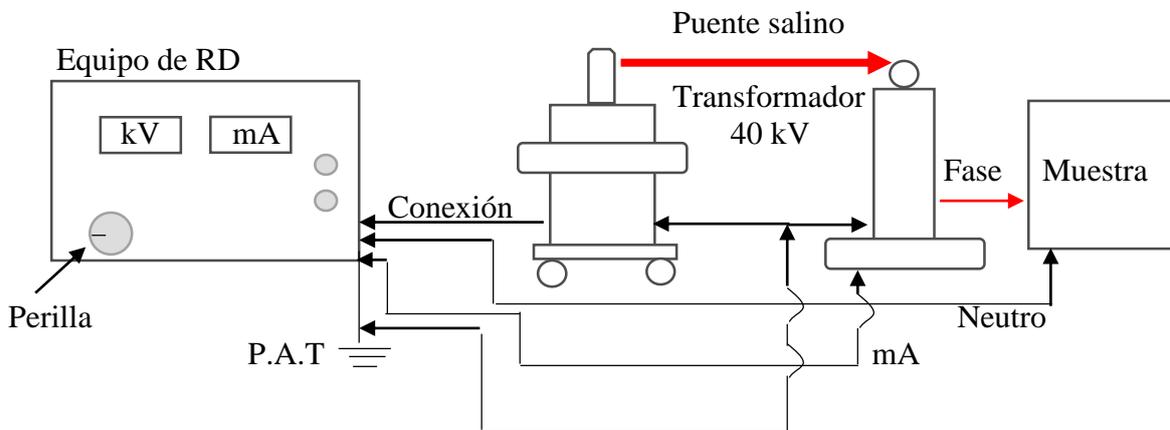


Diagrama en Bloque del equipo de RD

El equipo cuenta con un transformador de tensión (hasta 40 kV) fusibles de 5A de protección, un voltímetro digital cuya escala esta graduada en kV, un miliamperímetro digital cuya escala esta graduada en mA, ambos instrumentos con exactitud $\pm 1\%$ rango y cable directo para puesta a tierra. Además posee un cable (fase) que lleva una solución salina (2 granos de sal gruesa disueltos en 100 mL de agua) que hace conducción y a su vez ofrece una resistencia al circuito al momento del cortocircuito. El barrido de tensión desde cero hasta el valor máximo de tensión del equipo, se realiza por medio de una perilla como se muestra en el diagrama de bloque de equipo de RD.

El equipo cuenta con un botón de STOP en caso de necesitar cortar el ensayo.



Fig. 5.11 Consola de control del Equipo de Rigidez dieléctrica

5.1.4 Descripción del aceite aislante ensayado.

Todos los aceites que se utilizaran para realizar los ensayos son aceites minerales. Los mismos tienen las siguientes características:

- Contienen inhibidor de oxidación.
- Inocuos hacia el metal cobre.
- No corrosivos.
- Punto de inflamación cerca de 160°C.
- Densidad a 15°C comprendida entre 0,85 a 0,90.

Se utilizaran 3 aceites diferentes para realizar los ensayos (Fig. 5.12 a y b). Se presume que el aceite N°1 se encuentra en buenas condiciones. El aceite N°2 se presume que está en malas condiciones y adicionalmente se deteriorará para empeorar sus propiedad y poder obtener un marcada diferencia con el resto de los aceites. Adicionalmente se consiguió 1 litro de aceite (aceite N°3) en buen estado donado por una empresa local de la zona Zarate – Campana. Este cuenta con un estudio, informe y los detalles del estado del mismo, realizado por la empresa Nova Miron la cual certifica que el aceite se encontraba en buen estado y apto para ser utilizado en transformadores como aislante y refrigerante. (Se adjunta en anexos el certificado de calidad de aceite).



Fig. 5.12 a) Aceites N°1 y aceite N°2



Fig. 5.12 b) aceite N°3

5.1.5 Seguridad

Los aspectos de seguridad se deben respetar a través del reglamento de uso de equipos de alta tensión en el laboratorio de eléctrica establece al menos la presencia física de dos responsables al mando del ensayo. Por lo tanto, todos los ensayos fueron realizados con ayuda de personal experimentado (Ingenieros del laboratorio de Eléctrica) y tutor de proyecto adicionalmente.

La cuba realizada para método experimental fue colocada dentro de un recinto perimétrico del cual nadie tenía acceso al momento de energizar el circuito y realizar las prácticas. Los procedimientos adicionales para realizar el ensayo están descriptos en el procedimiento Anexo A del presente proyecto.

Una vez finaliza cada práctica, se utilizaba una pértiga cuyo extremo estaba conectado a tierra a través de un cable de P.A.T, con la cual se tocaba los extremos de cada electrodo de la cuba con el fin de descargar a tierras posible cargas remanentes que quedarán en el circuito. (Fig. 5.13).



Fig. 5.13 Seguridad en Laboratorio

5.1.6 Metodología

La realización de la práctica se hará en un recinto perimétrico puesto dentro del laboratorio de eléctrica de la FRD.

En todo momento de los ensayos, se deberá tener presentes reglas de seguridad del laboratorio y la supervisión de 2 personas capacitadas para utilizar el equipo de RD y realizar las prácticas.

Se contemplará la conexión de todos los equipos determinados en los diagrama de bloques de la cadena de EA y de RD y se procederá a conectar según el Anexo A del presente proyecto. En el mismo anexo A se encontrarán los pasos a seguir para reproducir la práctica en caso que se deban realizar análisis de calidad de aceites dieléctricos para diferentes transformadores dentro del laboratorio de Ingeniería eléctrica.

5.2 Ensayos y registros

5.2.1 Tareas Previas

Previo a cada ensayo a realizar, se deben efectuar diversas tareas de conexión y calibración de equipos. En las tareas de conexión se debe conectar el equipo de rigidez dieléctrica, lo cual implica alimentar el equipo con tensión 220 V y conectar todas las piezas a tierra (Fig. 5.14 a y b) el procedimiento de seguridad para realizar ensayos está establecido en el procedimiento Anexo A del presente proyecto.

La cuba se apoya sobre un taburete (de manera de no apoyarse al piso) y ambos cables de tensión que conectan al electrodo son sujetados con cinta aisladora a las patas del taburete (Ver figuras 5.15 y 5.16 a y b). Esto se hace por la razón del efecto corona, es decir, si cualquiera de los dos cables que conectan a los electrodos se apoyasen sobre el suelo, la impedancia que vería el sistema del cable-suelo sería menor que la impedancia del líquido aislante entre electrodos, de manera que la fuga de corriente se provocaría directamente desde el cable al suelo por ionización del aire y efecto corona. Esto quiere decir que la corriente de fuga se drena por la tierra y no por los electrodos, por lo cual

permite que se eleve la tensión del equipo sin provocar la ruptura del aislante en el valor real, y consecuentemente se tienen valores erróneos de medición.

Los ensayos se realizaron a la noche en el laboratorio de Ingeniería Eléctrica de la FRD y se observó el efecto corona al apoyarse el cable de un electrodo al suelo, viéndose de esta manera un color violeta (Ver figura 5.17) y sintiendo a su vez, un olor a característico a ozono. La cuba se colocó sobre 2 estacas de madera para elevarla por encima del taburete para poder colocar el sensor piezoeléctrico debajo de la misma. Dicho sensor piezoeléctrico se adhirió a la pared inferior de la cuba con 3 vueltas de cinta aisladora. Adicionalmente, se aplicó un acoplante entre la pared de la cuba y el sensor, cuya principal función es disminuir el efecto de cambio de impedancias del medio y permitir obtener una señal de mejor calidad. El acoplante utilizado es Aceitex “súper grasa vaselinada con siliconas ecológicas”.



Fig. 5.14 a) Conexión a tierra de equipo de RD

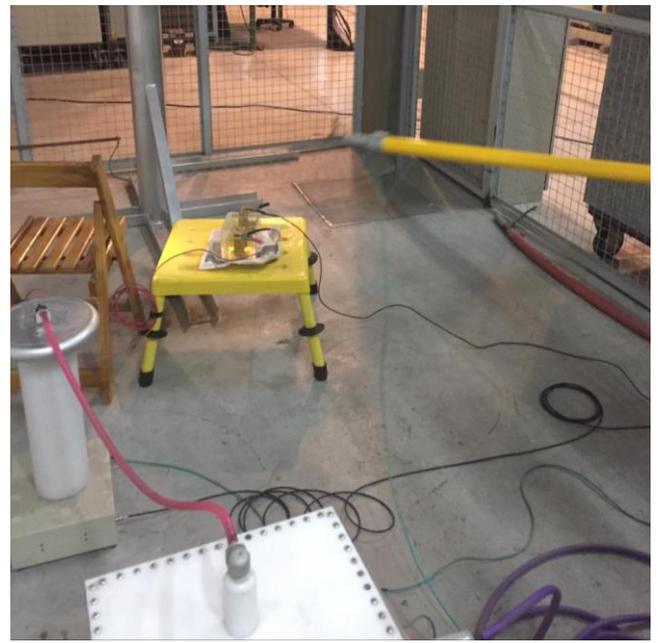


Figura 5.14 b) Tareas previas de conexión

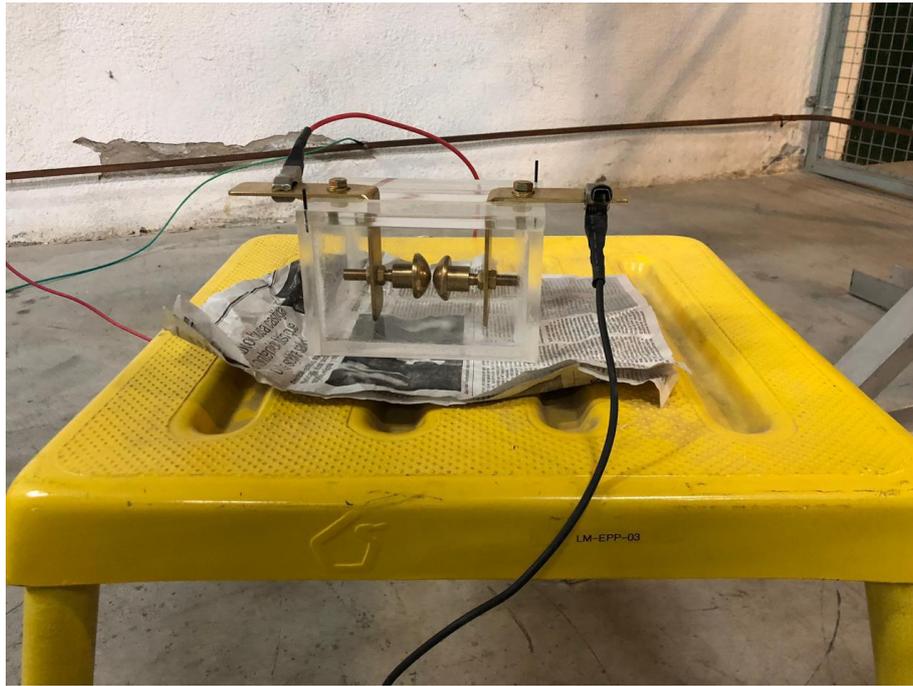


Fig. 5.15 Cuba sobre taburete



Fig. 5.16 a) Cable neutro atado a pata de taburete

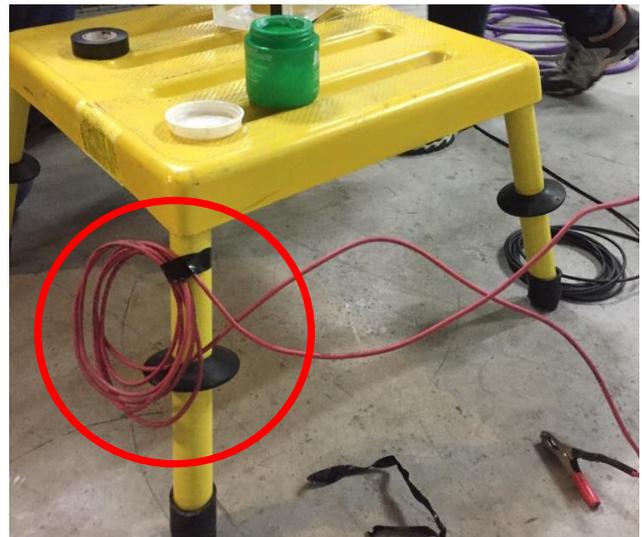


Fig. 5.16 b) Cable vivo atado a pata de taburete



Fig. 5.17 Efecto Corona

Finalizada la conexión de todos los equipos del ensayo por medio del procedimiento descrito en Anexo A, se realizaron las calibraciones del osciloscopio digital a través del método convencional de rotura de mina de lápiz (Ver capítulo 4.4.2.5 “calibración de los sensores”). (Ver figura 5.18). Con dichas calibración se realizó el procedimiento Anexo B del presente proyecto.

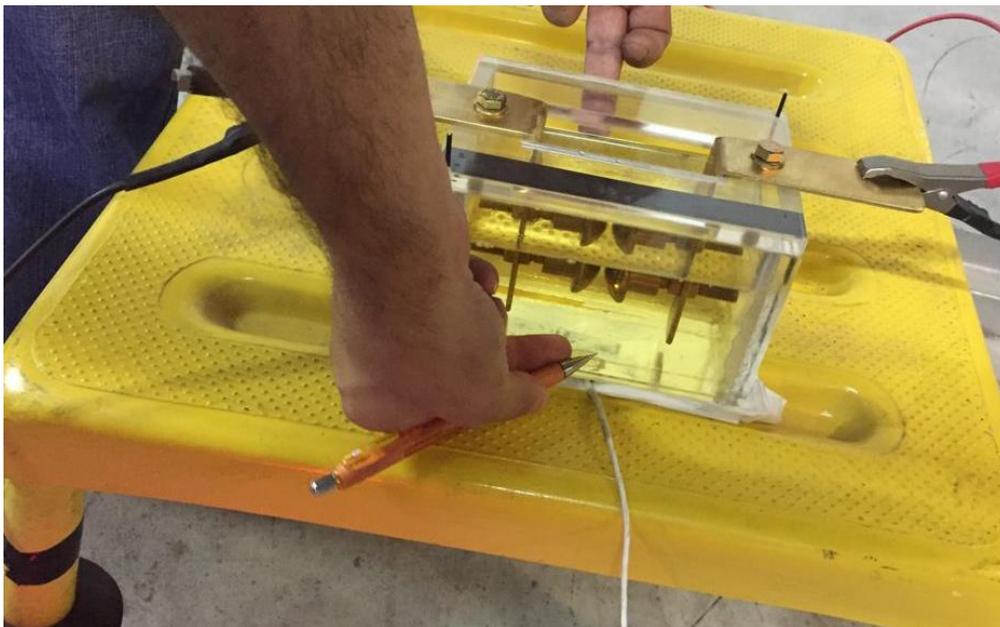


Fig. 5.18 Calibración a través de método de rotura de mina

En caso que alguien desee repetir las practicas efectuadas, podrá hacerlo siguiendo los procedimientos correspondientes según norma internacional de medición de rigidez dieléctrica y normas en laboratorios (Ver procedimiento en anexo A y anexo B).

Los ensayos deberán realizarse con la supervisión de 2 personas físicas capacitadas en el laboratorio siendo lo mismo condición sine qua non para realizar la práctica.

- Consideraciones generales

Durante el encendido y apagado del equipo el sistema de EA detecto estos sucesos a destacar. Como se mencionó en la Tabla N° 4.1 en el capítulo 4, apartado 4.4 del 110

presente proyecto, los sensores piezoeléctricos tienen una sensibilidad de desplazamiento de 10^{-14} m, por lo que al encender y apagar el equipo se puede ver en el osciloscopio (Fig. 5.19 y 5.20) la detección de los mismos posiblemente asociados a un pulso Electromagnético (EM). La escala de voltaje en este caso estaba situada en 500 mV. El umbral se puede observar en cero, por lo que cualquier desplazamiento inferior al del sensor es captado. Estos efectos no son considerados en el presente proyecto.

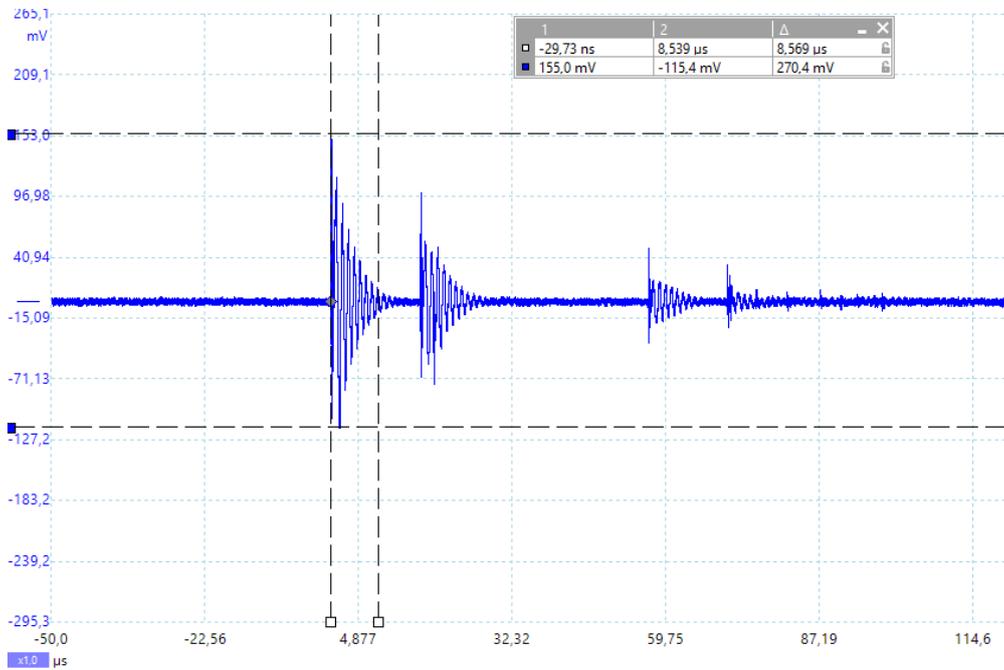


Fig. 5.19 Señal emitida por encendido de equipo de RD

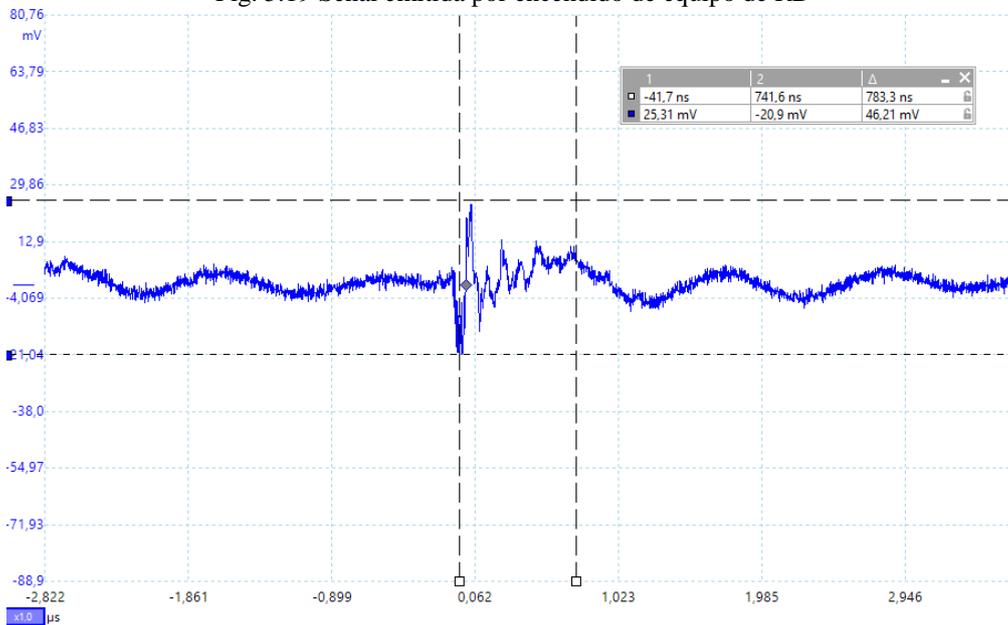


Fig. 5.20 Señal emitida por apagado del equipo de RD

En las Fig. 5.19 y 5.20 se puede observar que la amplitud del encendido cuyo valor no excede un pico de 160 mV y una amplitud de pico a pico de 270,4 mV superior a la del apagado. Adicionalmente se pueden observar los tiempos de duración de las señales, siendo los mismos muy pequeños del orden de los microsegundos (μ s) en el encendido y nanosegundos (ns) en el apagado del equipo.

5.2.2 Ensayo N° 1 - Calibración

El ensayo N°1 de calibración se realizó con aceite N°1 con el único fin de observar y cotejar que el equipo de rigidez dieléctrica del laboratorio de Eléctrica era apropiado y capaz de producir la chispa entre los electrodos con su límite de tensión de salida.

Se realizaron múltiples descargas para obtener diversos valores de ruptura del dieléctrico y tomar un valor promedio de los mismos.

A continuación, se detalla la tabla 5.1 con las mediciones realizadas.

Tabla 5.1. Descargas con aceite N°1

N° Ensayos	Ruptura Aceite N°1 [kV]
1	30,3
2	27,4
3	29,2
4	31
5	29,3
6	34,2
7	33,9
8	20,1
9	28
10	23,8
11	26,3
12	28
13	27,1
14	31,3
15	18,2
16	29,12
17	31
18	32,1
19	28,3
20	31,6
21	36,6
22	34,6
23	30,3
24	28,1
25	31,6
26	27,8
27	33,3
28	34
29	28,7
30	30,1
31	30,2
32	28,3
33	34,3
34	34
35	29,4
36	32,3
Promedio	29,83 kV

Se considera notablemente destacar el concepto de tensión de ruptura del dieléctrico en función de la distancia de los electrodos, ya que la misma no es lineal. Esto quiere decir, por ejemplo, que tomando el hipotético caso de un dieléctrico cuya distancia de separación entre dos electrodos es 1 mm y su valor de ruptura son 20 kV, esto NO implica que si la distancia fuera 2 mm la ruptura se producirá a 40 kV. La variación de tensión de ruptura varía linealmente con el logaritmo de la distancia de los electrodos [47].

En base a la primera medición de calibración se detectaron los siguientes sucesos:

Cuando se producía la descarga se registraba de manera posterior un emisión continua en el osciloscopio de aproximadamente 2 V asociada a un ruido electromagnético. Esto es debido al pulso EM que produce la descarga y el nivel de preamplificación en el que se encontraba el equipo de EA en ese momento (40 dB).

Dicho ruido producía una resonancia en un elemento electrónico de la placa del equipo de EA producto de un campo eléctrico proveniente del transformador del equipo de RD (Fig. 5.21 a y b).

El segundo suceso fue la velocidad de elevación de la perilla del equipo de RD. Según lo establecido por la norma IEC 60156 en el procedimiento Anexo A, en el ensayo de RD se debe aumentar la tensión a una velocidad de 2 kV/s. En nuestro proyecto se intentó seguir esa normativa haciendo uso en todos los casos de la misma persona para girar la perilla. Esto nos permitió no tener distintas velocidades de elevación de tensión, ya que un aspecto muy importante que surgió del proyecto fue la tasa de variabilidad de ruptura de dieléctrico (aceite) en función de velocidad de elevación de tensión. Consideramos de suma importancia esto ya que si distintas personas manejaran la perilla implicaría que no todos los ensayos están en equidad de condiciones.

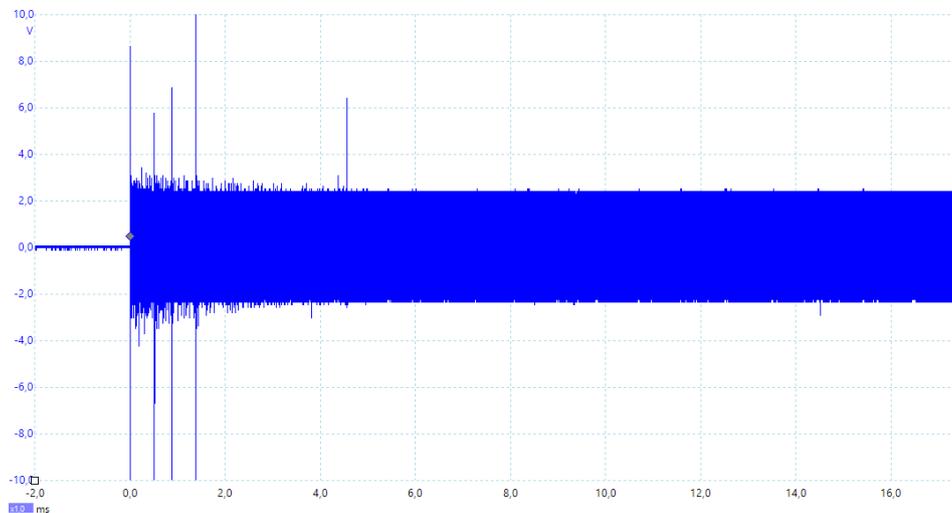


Fig. 5.21 a) Señal de ruido oscilante de 2V de amplitud

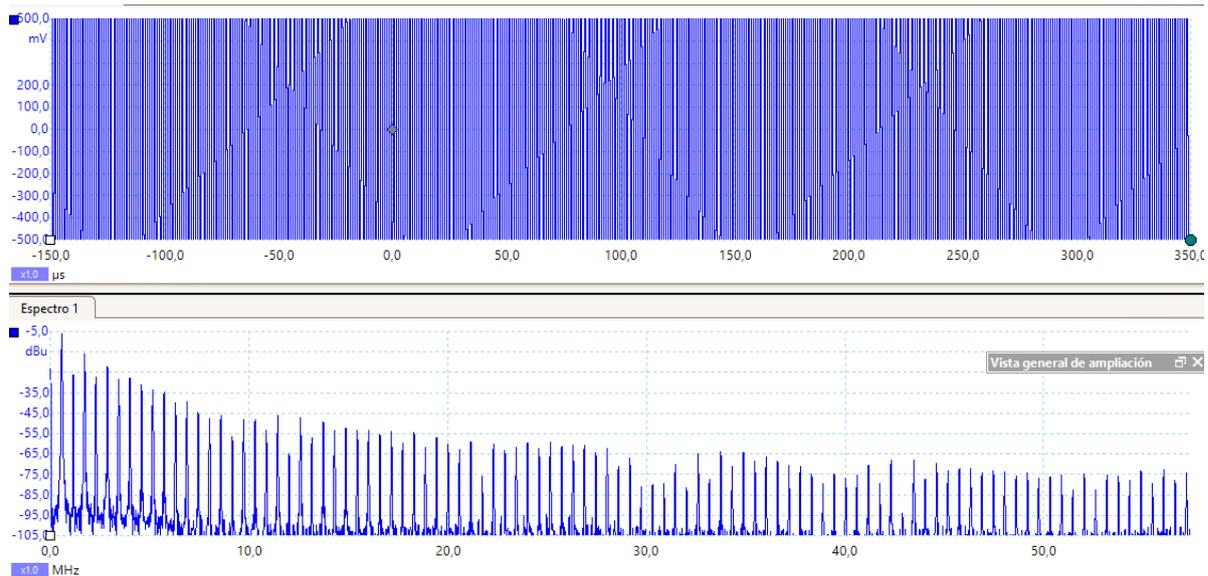


Fig. 5.21 b) Espectro en frecuencias de la señal

Otro aspecto importante a destacar fue la aparición de ruido audible en tensiones próximas a los 30 kV, similar a ruido de efecto corona. Este mismo no provenía de adentro de la cuba sino que, pudo escucharse un sonido en el aire proveniente de la junta entre los conectores pinzas cocodrilo de tensión y la planchuela de los electrodos de la cuba. Las pinzas de tensión sujetan al electrodo en una superficie de contacto únicamente en algunos puntos (Fig. 5.22). Se sugirió que el espacio entre las pinzas y los electrodos provocaba la ionización del aire encontrado en ese espacio y emitía el sonido audible. Esto mismo se podía ver como descargas parciales de baja amplitud detectado por el sistema de EA (Fig. 5.23, 5.24, 5.25), las cuales cesaban cuando se producía la descarga en forma de chispa entre los electrodos debido a la eliminación del voltaje de excitación. En dichas figuras se pueden observar distintas amplitudes de las descargas parciales previas mencionadas. El software en este caso tenía una amplitud de voltaje de 1 V y se colocaron 32 repeticiones para poder captar varias descargas del fenómeno descrito.

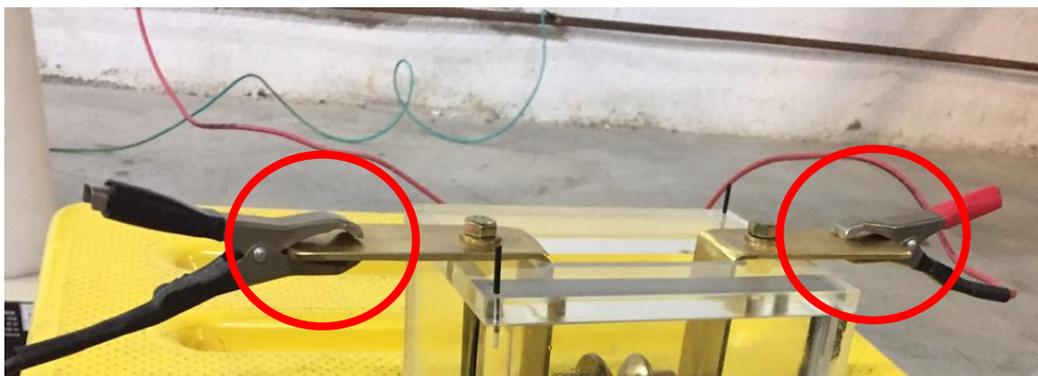


Fig. 5.22 superficie de contacto entre pinzas cocodrilos de tensión y planchuela de electrodos

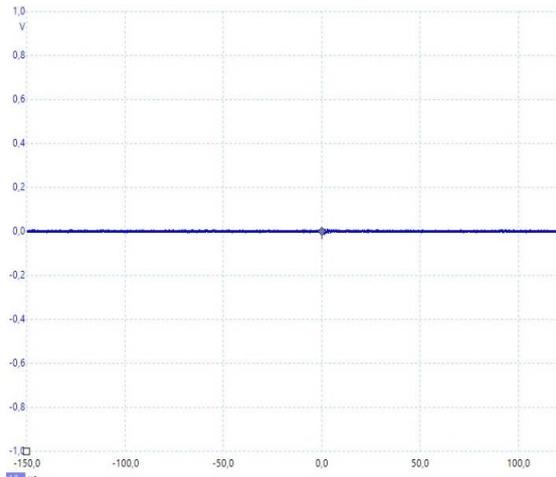


Fig. 5.23 DP previa a la chispa de 27.4 kV

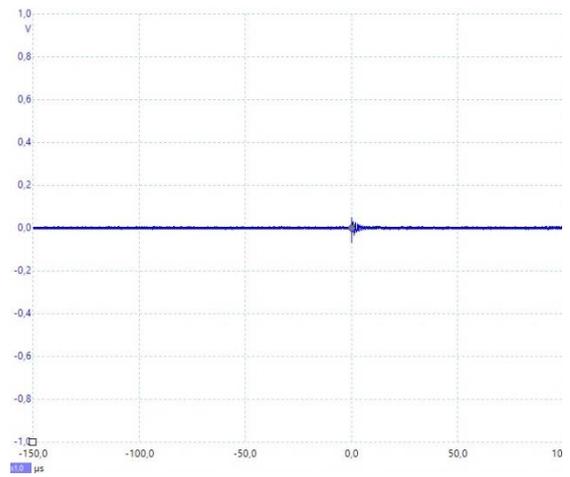


Fig. 5.24 DP previa a la chispa de 29 kV

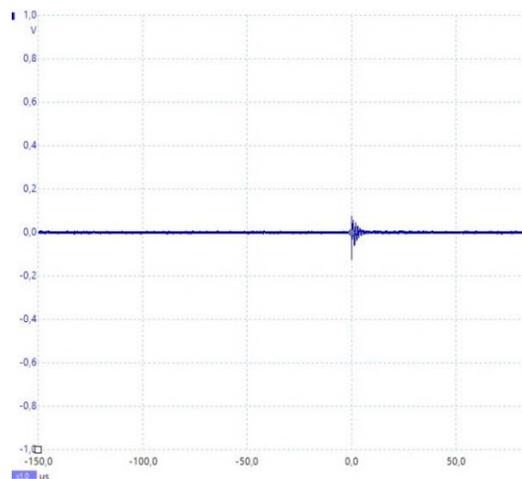


Fig. 5.25 DP previa a la chispa de 29.4 kV

5.2.3 Ensayo N° 2 - Calibración

Para este ensayo se reemplazaron los conectores pinzas cocodrilos de tensión por un tornillo de bronce y arandelas de vuelo ancho para sujetar el cable a la planchuela y de esa manera lograr abarcar mayor superficie de contacto entre conductores y electrodos eliminando los contactos puntuales de las pinzas (Fig. 5.26).

Ambos cables originales del equipo de RD en cuyos extremos estaban las pinzas cocodrilos fueron reemplazados por cables de 4mm^2 de sección (igual a sección original) y terminales de 10 mm. Con esta condición, el sonido arrancaba a escucharse nuevamente cerca de los 30 kV pero abruptamente de menor intensidad que en el caso anterior. Por lo tanto se determinó que la mejora adaptada fue eficiente y ayudo considerablemente a disminuir el efecto corona.



Fig. 5.26 Tornillos y arandelas de vuelo ancho en reemplazo de pinzas

Nuevamente se manifestó el ruido electromagnético obtenido en el primer obstruyendo las mediciones tomadas. Se pudieron obtener 2 archivos de las mediciones realizadas. Dicha señal de ruido se intentó eliminar colocando directamente a tierra el sensor piezoeléctrico a través de la P.A.T del laboratorio de la facultad. La señal de corriente alterna continua de 2 V perduro sin signos de eliminación.

Realizando la modificación de la conexión a tierra del sensor, se observó que la señal de ruido aparecía luego de la emisión de la chispa entre los electrodos (Fig. 5.27 y 5.28). En las figuras 5.27 y 5.28 se puede observar que hay varios picos de tensión máximos en la señal, razón por la cual se comienza a pensar que la chispa tiene una especie de “etapas” hasta producir el cortocircuito que acciona al equipo de RD disminuyendo la tensión a cero.

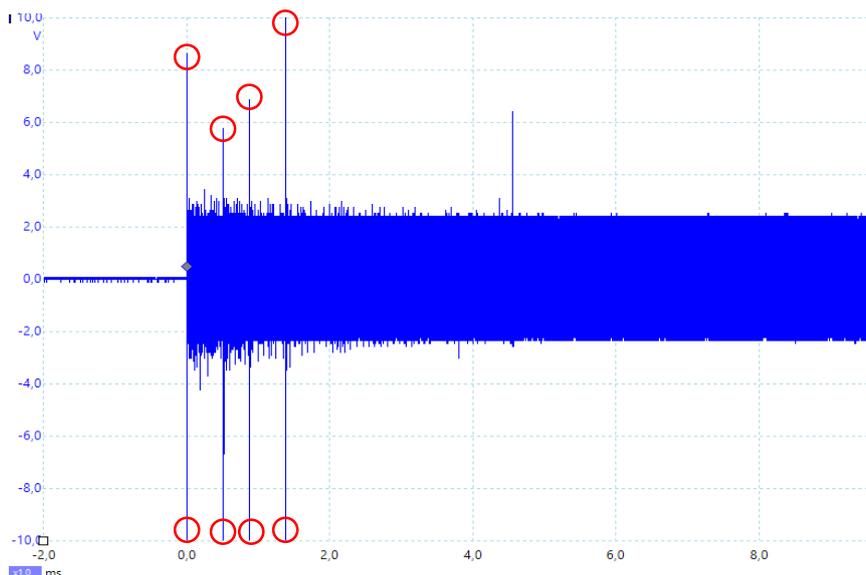


Fig. 5.27 Señales al momento de la ruptura de dieléctrico (25.7 kV)

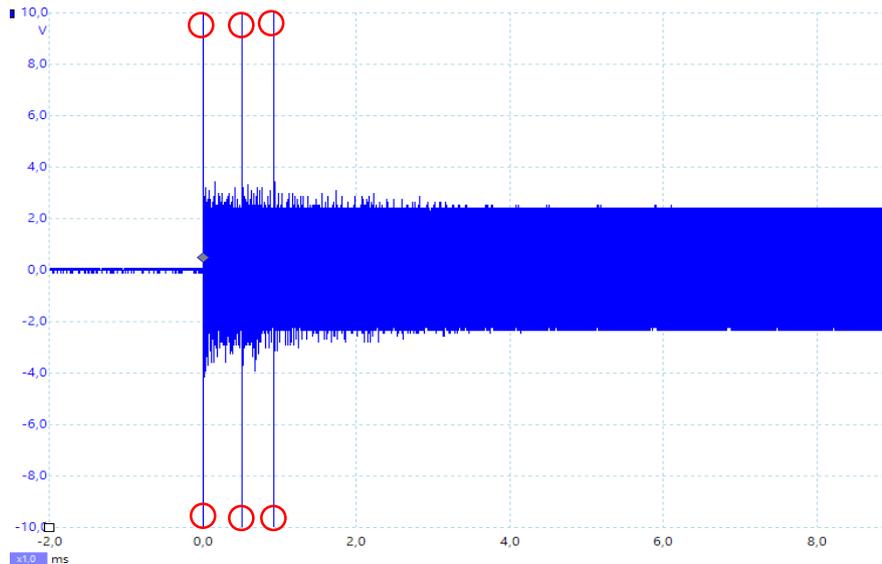


Fig. 5.28 Señales al momento de la ruptura de dieléctrico (29 kV)

5.2.4 Ensayo N° 3 - Calibración

El ensayo de calibración N°3 se trató de eliminar la oscilación que se producía en el equipo luego de la descarga parcial.

En el ensayo de calibración N°3 se colocó el sensor piezoeléctrico suspendido del recinto del laboratorio sin tener contacto directo con la cuba. Esto se realizó para observar si el osciloscopio detectaba el pulso EM de la onda producida por la ruptura del dieléctrico a distancia (Fig. 5.29). El sensor se colocó a una distancia aproximada de 80cm de la cuba.

Tras realizar varias descargas se pudo observar que el sistema de EA detectó la EM de la onda sin estar en contacto directo con cuba, cuestión importante a destacar ya que da indicio que el sensor no necesariamente debe estar en contacto directo con la cuba de un transformador para levantar la señal de la ruptura, sino que podría captarla en principio a una distancia inferior a 1 metro y en base a la potencia del pulso de EM producto de la ruptura dieléctrica.



Fig. 5.29 Sensor y cuba separados aproximadamente 80cm

Adicionalmente se planteó la idea de una jaula de Faraday para envolver el preamplificador del equipo de medición acústica del cual se estimó que era susceptible a estos pulsos EM, ya que al desconectar el sensor del equipo (una vez emitida la chispa entre electrodos) la señal alterna continúa de valor 2V aparecía y no se ausentaba.

Con la jaula de Faraday se tenía como objetivo repudiar todo campo externo producto de la emisión de la chispa o del equipo de RD, basándose en el principio de que el campo interno dentro de la jaula es nulo, razón por la cual de esta manera se aislaba el preamplificador y se podía concluir si el equipo cuestionado era el causante de la señal ruido. Para mayor consideración, se utilizó la jaula de Faraday en el sensor también, de manera de conectar la mayor cantidad de elementos de EA a tierra. Si bien en varios ensayos se anuló por completo el ruido, en algunos valores de tensión elevados se observó nuevamente el ruido obstruyendo la medición.

5.2.5 Ensayo N°4 - Calibración

El ensayo N°4 fue realizado con el aceite N°2 donde se obtuvieron valores de rigidez dieléctrica apenas inferiores al aceite N°1. Esto llevo a realizar modificación para deteriorar el estado del aceite para obtener diferencias bien apreciables. Los valores se detallan a continuación en la tabla 5.2.

Se diluyeron 3.0885 gramos de carbono de coque con 10 gotas de agua para humedecerlo dentro de un recipiente de vidrio que contenía 0,5 L de aceite (Fig. 5.30) con el fin de empeorar la rigidez dieléctrica del aceite usado y volverlo más conductor para obtener una marcada diferencia con el aceite N°1. Este procedimiento fue realizado el Laboratorio de Química de la Facultad Regional Delta. El líquido con el agregado de carbono se mezcló nuevamente con 2 recipientes más que contenían el aceite N°2, dando una densidad equivalente igual a:

$$\frac{3,0885 \text{ gr}}{1,5L} = 2,059 \text{ gr/L}$$



Fig. 5.30 Aceite deteriorado con carbono de coque

Tabla 5.2 Descargas con el aceite N°2

N° Ensayos	Ruptura Aceite N°2 [kV]
1	26,7
2	30,4
3	26
4	32
5	29,2
6	28,3
7	26,4

8	30
9	20,4
10	32,2
11	34,4
12	24,5
13	30
14	33,8
15	33,2
16	32,1
17	30,3
18	32,3
Promedio	29,01 kV

En las mediciones con aceite deteriorado se observó que la RD bajo abruptamente alcanzando valores de tensión de ruptura máximos de 10 kV, verificando así que la presencia de carbono húmedo aumento la conductividad entre los electrodos. Los valores obtenidos se pueden observar en la tabla 5.3.

Tabla 5.3. Descargas en aceite N°2 deteriorado

N° Ensayo	Ruptura de aceite N°2 Deteriorado [kV]
1	6
2	6,7
3	7,8
4	8,6
5	9,8
6	5
Promedio	7,32 kV

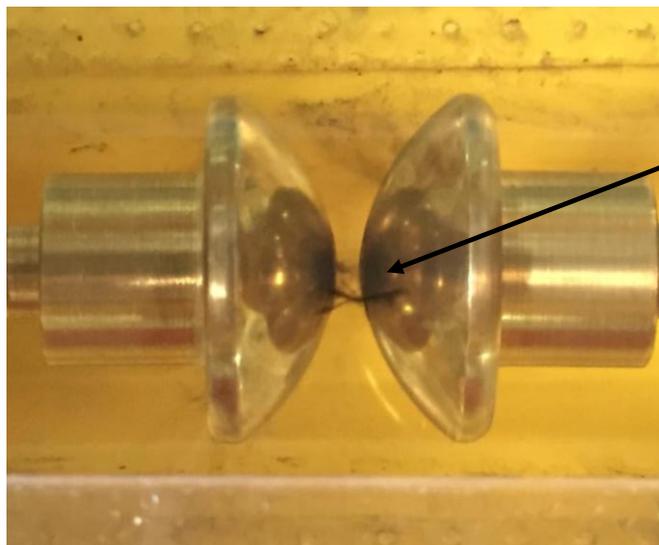
Por otro lado debido a que se escucharon ruidos audibles en las mediciones realizadas, se procedió a barnizar el extremo positivo de la cuba para ganar mayor rigidez dieléctrica y evitar corrientes de fuga al aire. El barnizado se realizó con barniz sintético para exterior.

5.2.6 Ensayo N°5 -Calibración

En el ensayo N°5 se barnizó la placa del electrodo positivo para brindarle mayor rigidez dieléctrica.

El equipo de EA se llevó a arreglar a CNEA para eliminar el ruido de la señal que obstruía las mediciones. El problema se solucionó y el ruido se ausento exitosamente en las mediciones realizadas. Se dejó únicamente 1 estado de preamplificación de 10 dB.

En todos los ensayos se observó deposición de carbono (Fig. 5.31) al producirse la ruptura del aceite aislante y emisión de burbuja posterior a la ruptura del dieléctrico (Fig. 5.32 a y b).



Carbono formado luego de la descarga

Fig. 5.31 Deposición de carbono entre electrodos



Fig. 5.32 a) Liberación de Burbuja posterior a DP



Fig. 5.32 b) Acumulación superficial de Burbuja posterior a DP

Adicionalmente se midió la temperatura de todos los ensayos con la pistola termográfica del laboratorio de CIDEA de la Facultad Regional Delta, y se observó una muy leve variación de temperatura producto de la descarga entre electrodos.

Adicionalmente se encontraron puntos calientes en el sistema que se muestran en las figuras 5.33 a, b, c y d.

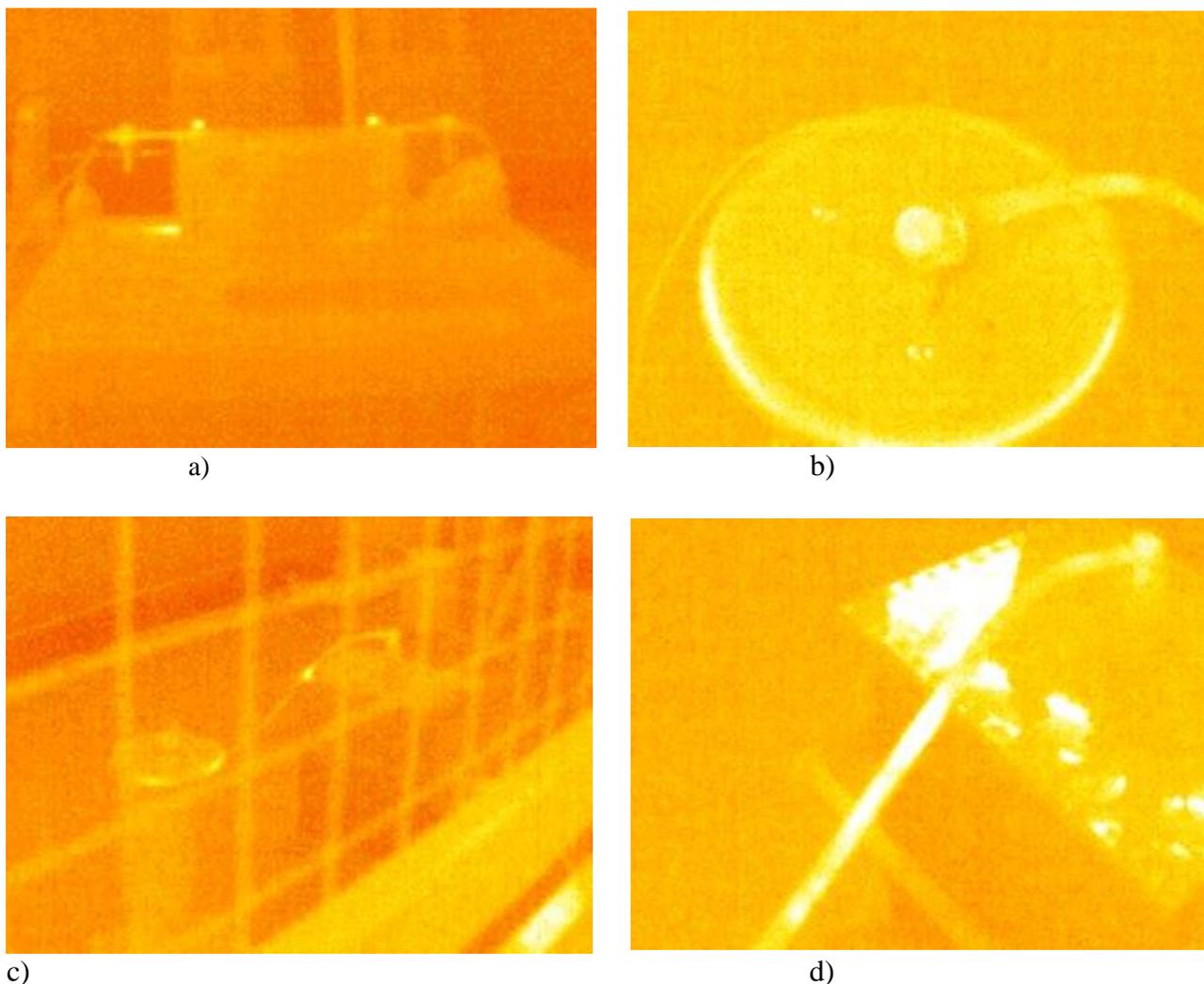


Fig. 5.33 a, b, c y d. Puntos calientes por pistola termográfica

En la tabla 5.4 se puede observar la temperatura de los ensayos realizados con aceite N°1.

Tabla 5.4 Análisis de descargas parciales y temperatura

N° Ensayo	Revuelto	Descarga previa	kV Ruptura	mA	Temperatura [°C]
1	Si	No	15,5	3,2	26,7
2	Si	No	22,2	4,9	26,2
3	Si	No	15,8	3,5	26,6
4	Si	No	24,1	7,1	27
5	Si	No	17,7	2,9	26,7
6	Si	No	21,2	5,0	26,8
1	Si	No	13,9	5,5	26,9
2	Si	No	17,5	4,7	26,8
3	Si	No	21,7	5,1	26,6
4	Si	No	19,8	6,6	26,9
5	Si	No	29,2	7,2	27,2
6	Si	No	22,6	4,9	27,2

En conclusión se determinó que la variación de temperatura producto de la descarga en un gran volumen de aceite no debería influir de manera notoria en los valores de rigidez dieléctrica del aceite, debido a que la variación de temperatura no supera 1°C luego de la descarga.

CAPITULO 6 - Análisis de Resultados de ensayos bajo norma IEC 156 y ASTM 1816.

6.1 Ensayo N°6

Se realizaron todos los ensayos con las condiciones del procedimiento Anexo A del presente proyecto y según Normas IEC 60156 y ASTM d1816.

A continuación se muestra la tabla 6.1 donde se muestran los ensayos realizados. En la misma se tiene que RA: Ruptura de Aceite; DP ac: descarga parcial en aceite; DP aire: descarga parcial en aire.

Tabla 6.1. Ensayos según procedimiento Anexo A

Grupo	N° Ensayo	RA	DP ac	DP aire	kV ruptura	mA	Temp. Día [°C]
B1	1			X	>43	-	24,3
	2			X	>43	-	24,3
	3			X	>43	-	24,3
	4			X	>43	-	24,3
	5			X	>43	-	24,3
B2	6	X		X	30,5	8,5	25,2
	7	X		X	30,3	7,4	25,2
	8	X		X	30	6,8	25,2
	9	X		X	35	7,8	25,2
	10	X		X	30	6,7	25,2
I1	11	X	X		19	3	24,3
	12	X			14,5	3,8	24,3
	13	X	X		24,7	5,9	24,3
	14	X			14,3	2,3	24,3
	15	X			19,3	5,3	24,3
I2	16	X			22,3	4,8	24,3
	17	X			17,9	3	24,3
	18	X			20,3	3,8	24,3
	19	X			28,3	6,3	24,3
	20	X			21	4,6	24,3
I3	21	X			21	2,6	25,2
	22	X			13,3	4,7	25,2
	23	X			25,3	5,1	25,2
	24	X			25,4	7,6	25,2
	25	X			16,4	3	25,2
I4	26	X			28	3,5	25,2
	27	X			26,5	5,2	25,2
	28	X			19,6	3,6	25,2
	29	X			23,5	5	25,2
	30	X			21,6	2,6	25,2
M1	31		X		9	2,1	25
	32	X			14,1	4,5	25
	33	X	X		14,1	2,4	25
	34	X	X		11	4	25
	35	X	X		12,8	3	25
	36	X			13	1,9	25

M2	37	X			12,4	3,7	25
	38	X	X		13,9	4,2	25
	39	X			13,6	4	25
	40	X			14,3	4,9	25

Los grupos B son el aceite N°3 de buena calidad, certificado por Nova Mirón como apto para utilizarse como aislante en transformadores.

Los grupos I son el aceite N°1, el cual tiene dudoso estado dieléctrico y se verificara si el mismo es o no apto para utilizarse como aislante en transformadores.

Los grupos M son el aceite N°2 deteriorado. El deterioro se realizó con carbono de coque disolviendo 3,0885 gr en 1.5 L de aceite. Luego se dejó decantar el carbono y se filtró el aceite para eliminar los sedimentos.

6.2 Cálculo del valor de Rigidez Dieléctrica

El procedimiento para el cálculo del valor de RD según norma ASTM d-1816 descrito en el procedimiento A es el siguiente:

$$\bar{X} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 X_i \quad ; \quad S = \sqrt{\frac{1}{4} [\sum_{i=1}^5 X_i^2 - 5\bar{X}^2]}$$

Siendo,

\bar{X} = Valor promedio de las tensiones

S = Desvió estándar

Ejemplo de cálculo para el grupo I1:

$$\bar{X} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 X_i$$

$$\bar{X} = \frac{1}{5} x(19 + 14,5 + 24,7 + 14,3 + 19,3)$$

$$\boxed{\bar{X} = 18,36 \text{ kV}}$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{4} \left[\sum_{i=1}^5 X_i^2 - 5\bar{X}^2 \right]}$$

$$\boxed{S = 4,268 \text{ kV}}$$

Se realiza el cociente entre S y \bar{X}

$$\frac{S}{\bar{X}} = 0,232$$

Según norma ASTM d-1816 el valor del cociente entre S y \bar{X} no debe ser superior a 0.1, por lo que debieron realizarse cinco ensayos adicionales (grupo I2) con el mismo procedimiento y tomar como valor de rigidez dieléctrica el promedio de las diez mediciones.

$$\bar{X} = \frac{1}{10} \sum_i^{10} X_i$$

$$\bar{X} = 20,16 \text{ kV}$$

Una vez obtenido el valor de rigidez dieléctrica, se procede a calcular el valor de rigidez dieléctrica en [kV/cm] según calculo y gráficos de procedimiento Anexo A:

$$\xi = k \times U$$

Expresándose ξ en kV/cm y U en kV.

La distancia entre electrodo es $a = 2,5\text{mm}$ por lo que del grafico se obtiene un factor $k = 4$. Se realiza la cuenta para obtener el valor de rigidez dieléctrica.

$$\xi = 4 \times 20,16 = 80,64 \text{ kV/cm}$$

Se realizó el mismo procedimiento para el grupo I3:

$$\bar{X} = 20,3 \text{ kV}$$

$$S = 5,379 \text{ kV}$$

$$\frac{S}{\bar{X}} = 0,265$$

Se toman 5 ensayos adicionales (grupo I4) con el mismo procedimiento y se determina como valor de rigidez dieléctrica el promedio de las diez mediciones.

$$\bar{X} = 22,07 \text{ kV}$$

Una vez obtenido el valor de rigidez dieléctrica, se procede a calcular el valor de rigidez dieléctrica en [kV/cm] según calculo y gráficos de procedimiento Anexo A:

$$\xi = 4 \times 22,07 = 88,28 \text{ kV/cm}$$

Para grupo B1 no hubo ruptura de dieléctrico, por lo que la rigidez dieléctrica es >43 kV.

Para el grupo B2 se obtuvieron los siguientes valores:

$$\bar{X} = 31,16 \text{ kV}$$

$$S = 2,16 \text{ kV}$$

$$\frac{S}{\bar{X}} = 0,069$$

Este valor de rigidez dieléctrica es aceptable según el criterio adoptado por la norma. Se procede a calcular el valor de rigidez dieléctrica en [kV/cm] según calculo y gráficos de procedimiento Anexo A:

$$\xi = 4 \times 31,16 = 124,64 \text{ kV/cm}$$

Para el grupo M1 se obtuvieron los siguientes valores:

$\bar{X} = 12,2 \text{ kV}$	$S = 2,195 \text{ kV}$
$\frac{S}{\bar{X}} = 0,18$	

Se toman 5 ensayos adicionales (grupo M2) con el mismo procedimiento y se determina como valor de rigidez dieléctrica el promedio de las diez mediciones.

$\bar{X} = 12,82 \text{ kV}$

Se procede a calcular el valor de rigidez dieléctrica en [kV/cm] según calculo y gráficos de procedimiento Anexo A:

$$\xi = 4 \times 12,82 = 51,28 \text{ kV/cm}$$

A continuación, en la tabla 6.2 se muestran y se comparan los resultados obtenidos.

Tabla 6.2. Valores promedios de RD para las tres calidades de aceite.

Grupos	Rigidez Dieléctrica [kV/cm]
B	124,64
I	88,28
M	51,82

Según el libro materiales eléctricos [47] se establece un límite de 80 kV/cm como límite inferior de aislación de un aceite. Por lo que el aceite N°1 del grupo I, resultado encontrarse al límite de sus valores normales y se entiende que el aceite estaría apenas sobre el límite de los valores fijados para un aceite en buenas condiciones.

Para el aceite N°2 deteriorado, del grupo M, el valor de RD es muy inferior al que establece el libro materiales eléctricos como valor apto para uso como dieléctrico. Esto quiere decir que de utilizarse este aceite como aislante en transformadores provocara a corto plazo una falla de aislación producto de descargas parciales en el aceite y consecuentemente la salida de funcionamiento del transformador.

El aceite N°3, grupo B, arroja valores cercanos a los que debe tener un aceite en buen estado, por lo que está apto para utilizarse como aislante en transformadores. Esto confirma los datos entregados por el análisis de la empresa que certificó que este aceite está apto para usarse como aislante.

6.3 Análisis de las señales de EA del sistema

Se presentan las señales adquiridas por el sistema de medición de EA en todas las situaciones ensayadas, con el fin de obtener información y determinar tiempos de duración, amplitud, y demás parámetros característicos de cada una de las emisiones monitoreadas.

Las situaciones ensayadas son: Ruptura de Aceite (RA), Descargas Parciales en aceite (DP ac) y Descargas Parciales en aire (DP aire).

El fenómeno de ruptura de dieléctrico (RA) se considera cuando se produce una gran descarga entre los electrodos de la cuba de RD con un apreciable pasaje de corriente entre ellos. En este punto la condición dieléctrica del aislante está comprometida, es decir, ya no cumple su función. Esto es una emisión de gran energía y produce la salida de servicio del equipo de RD por sobre corriente.

El fenómeno de Descarga Parcial en aceite (DP ac), se considera cuando se produce una descarga entre los electrodos de la cuba de RD sin comprometer la función aislante del aceite. Esto significa que la corriente que circula por los electrodos al momento de la DP ac es de muy bajo amperaje. Esto permite que el equipo de RD siga funcionando y pueda elevar su tensión hasta provocar la ruptura definitiva (RA) del aceite.

El fenómeno de Descarga Parcial en aire (DP aire) se considera cuando se produce una descarga entre los bornes de conexión que no están sumergidos dentro del aceite. En este punto la impedancia de RD del aceite es superior a la del aire tal que no permite pasar corriente por el aceite y produce la descarga al aire.

6.3.1 Discriminación de Ruido base del sistema

Se realiza un análisis de 3 señales arbitrarias capturadas durante los ensayos y se analizará la detección de tramos de la señal antes y después de la señal de ruptura dieléctrica para observar los límites de amplitud en los valores de las señales de ruido base.

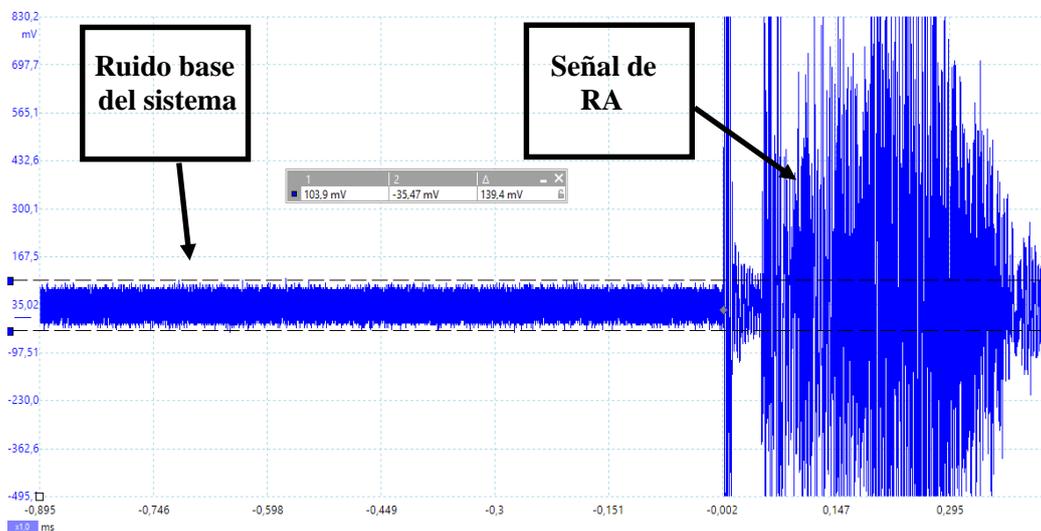


Fig. 6.1 Forma de onda de señal de RA respecto a ruido base

En la Fig. 6.1 se puede observar la forma de onda de la señal RA respecto del ruido base del sistema.

Este ruido base tiene una amplitud de tensión pico a pico de 139,4 mV y es muy inferior a la señal de RA.

Se calcula la relación amplitud - ruido base para establecer una magnitud de cuan mayor es el primero respecto al segundo.

$$R_{Desc.RA} = \frac{Amplitud [mV]}{Ruido base [mV]}$$

$$R_{Desc.RA} = \frac{20000 [mV]}{139,4 [mV]}$$

$R_{Desc.RA} \approx 143$ Veces más grande que el ruido de base del sistema de medición.

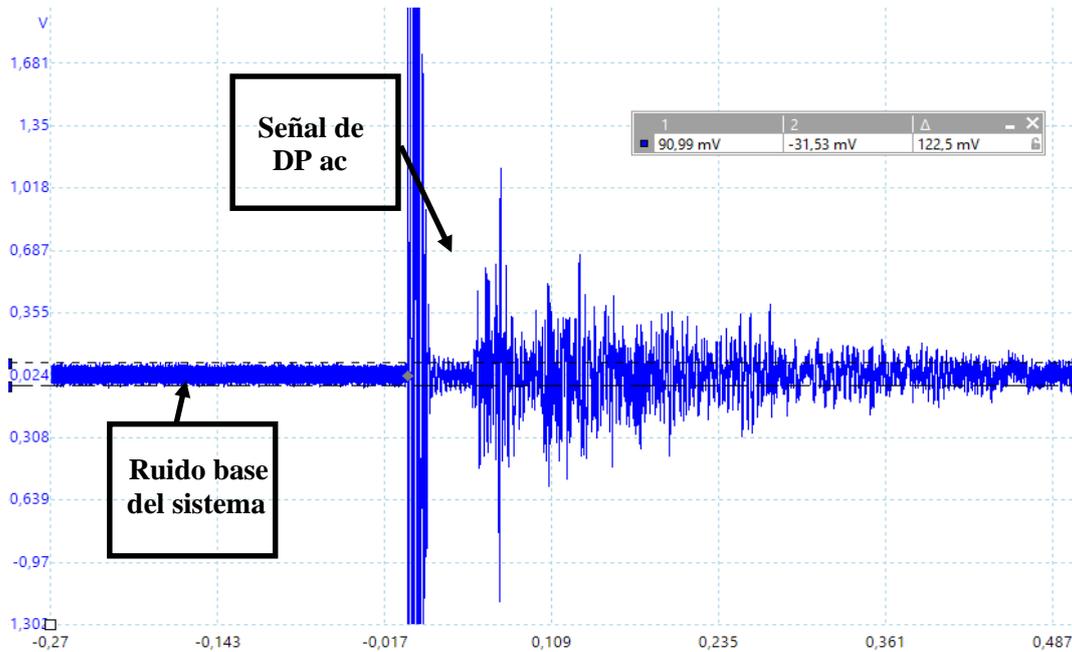


Fig. 6.2 Forma de onda de señal de DP ac respecto a ruido base

En la figura 6.2 se puede observar la forma de onda de la señal DP ac respecto al ruido base del sistema.

Este ruido tiene una amplitud de tensión pico a pico de 122,5 mV.

Se calcula la relación amplitud – ruido base del sistema:

$$R_{DP ac} = \frac{8000 [mV]}{122,5 [mV]}$$

$R_{DP ac} \approx 65$ Veces más grande que el ruido de base del sistema de medición.

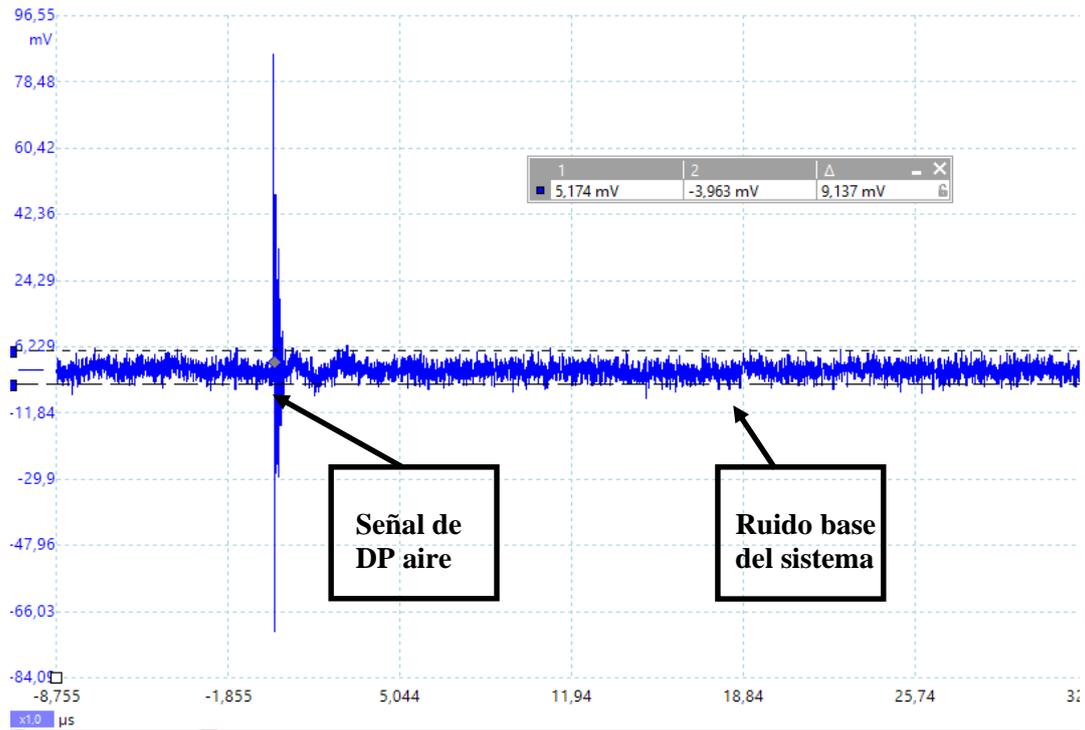


Fig. 6.3 Forma de onda de la señal DP aire respecto a ruido base del sistema.

En la figura 6.3 se puede observar la forma de onda de la señal DP aire respecto del ruido base del sistema.

Este ruido tiene una amplitud de tensión pico a pico de 9,137 mV. Se calcula la relación amplitud – ruido base del sistema:

$$R_{DP\ aire} = \frac{200 [mV]}{9,137 [mV]}$$

$$R_{DP\ aire} \approx 21$$

En el cuadro comparativo 6.3 se muestra una comparación de las señales pico a pico de ruido base del sistema para cada caso en particular citado anteriormente.

Cuadro comparativo 6.3 Voltajes pico a pico de ruido base y relación amplitud /ruido base.

	Voltaje pico a pico [mV]	Relación amplitud / ruido base
RA	139,4	143
DP ac	122,5	65
DP aire	9,137	21

Los valores de ruido de las señales de RA y DP ac son similares y con una banda de voltajes pico a pico comprendido entre 100 mV a 150 mV.

Las señales de DP aire tienen una magnitud mucho menor con banda de voltaje pico a pico comprendida entre 8mV a 15 mV.

La relación amplitud / ruido base del sistema es notoriamente mayor en el caso de RA y DP ac que en DP aire. Esto quiere decir que si se desea medir por ejemplo una DP aire deberá ajustarse la escala adecuadamente para poder observarla, ya que en caso de estar

mal seteada, el fenómeno no podría observarse de manera correcta. Esta diferencia entre los valores de ruido base está relacionada con la escala máxima de amplitud de señales seteada en el osciloscopio y por lo tanto, se atribuye a la cadena de medición. Esto debe ser considerado a la hora de evaluar el tipo de descarga parcial que se desea escuchar y analizar con la cadena de medición establecida.

6.3.2 Análisis de la amplitud de la Señal

Se mostraran señales obtenidas durante los ensayos de distintos grupos de la tabla 6.1, donde se realizara una comparación cuantitativa de las amplitudes de las ondas elásticas producidas por cada tipo o clase de emisión.

Para la Ruptura de Aceite (RA) se mostraran señales arbitrarias de los grupos I y M de la tabla 6.1. (Figs. 6.4, 6.5, 6.6, 6.7 y 6.8).

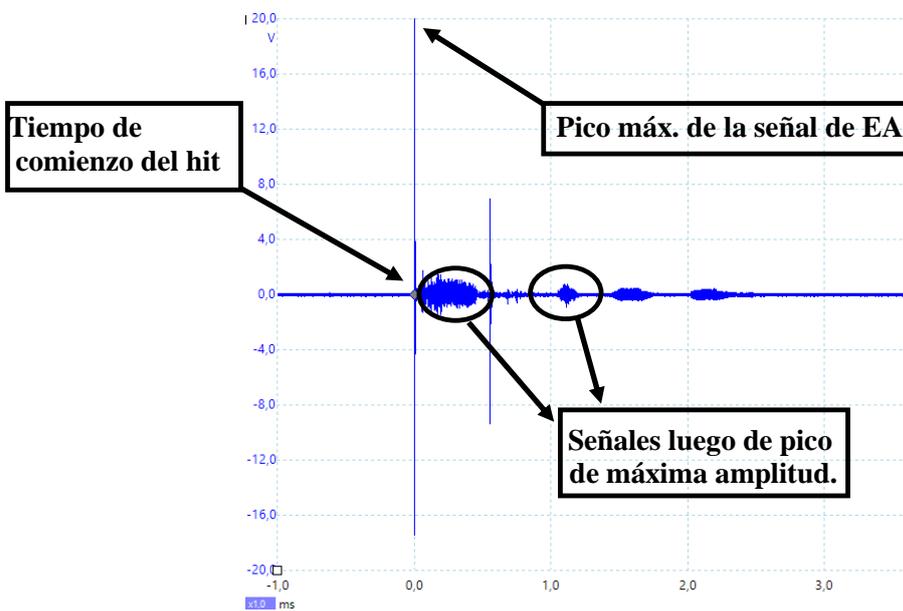


Fig. 6.4 Señal de Amplitud del ensayo N°19, grupo I2 de la tabla 6.1

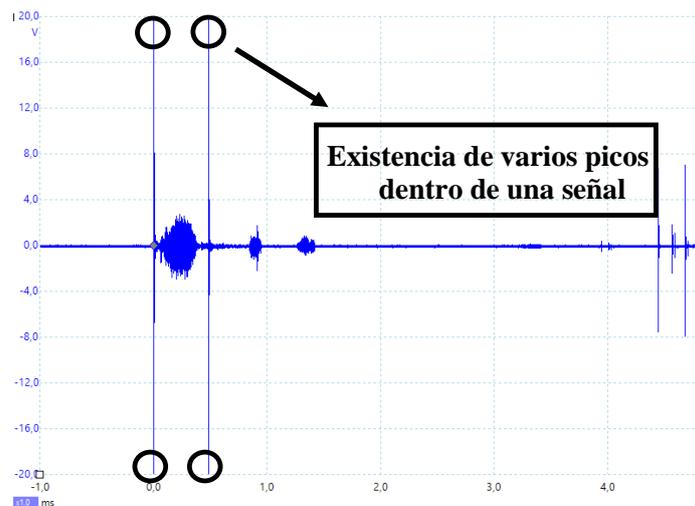


Fig. 6.5 Señal de Amplitud del ensayo N°21, grupo I3 de la tabla 6.1

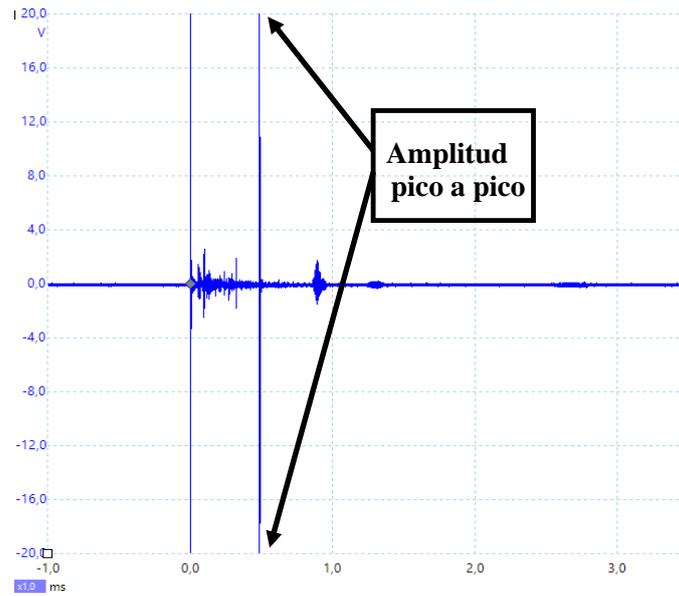


Fig. 6.6 Señal de Amplitud del ensayo N°29, grupo I4 de la tabla 6.1

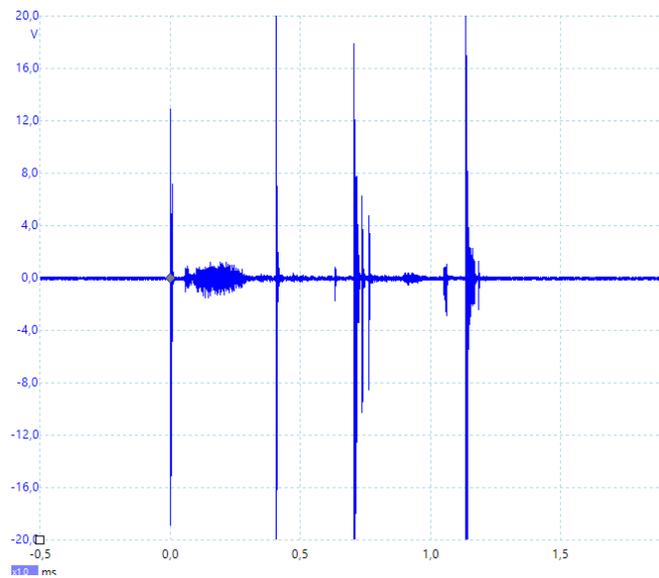


Fig. 6.7 Señal de Amplitud del ensayo N°32, grupo M1 de la tabla 6.1

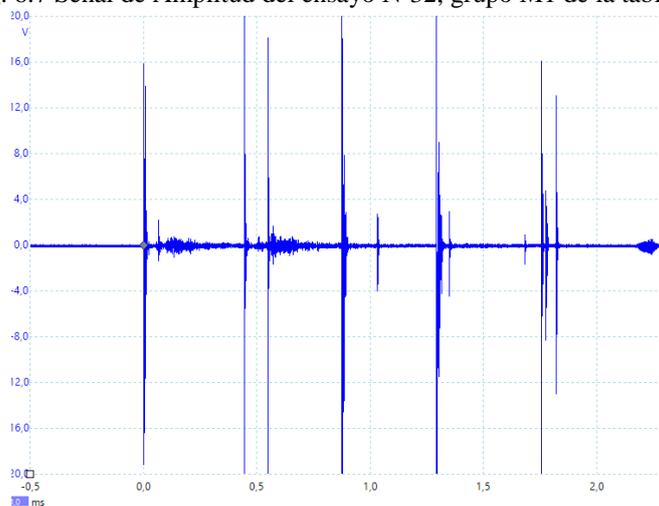


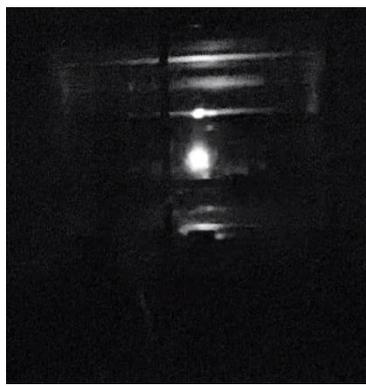
Fig. 6.8 Señal de Amplitud del ensayo N°37, grupo M2 de la tabla 6.1

En todos los casos se observan picos de tensión de la señal que supera los 20 V de amplitud con un tiempo de subida y de bajada de la señal de muy corta duración. Cada una de estas descargas puede tener varios de estos grandes pulsos repetidos en una misma señal.

Adicionalmente se observa una señal posterior a cada pico de tensión máxima. Esta señal posterior es una emisión de mayor duración en el tiempo que el pico de tensión y de mucha menor amplitud. Esta emisión tiene características más continuas y eventualmente pueden estar asociadas a otros sucesos naturalmente diferentes de las señales anteriormente detalladas. Varios ensayos fueron filmados en videos con una cámara alta velocidad con capacidad de grabar 240 fotogramas por segundo (FPS). Esto da un tiempo de 4,16 ms entre cada fotograma que serán mostrados a continuación.



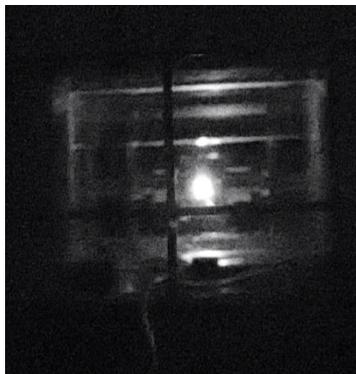
Fotograma 1



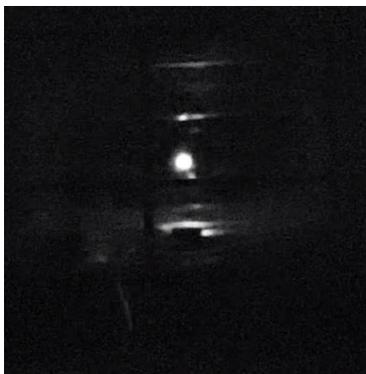
Fotograma 2



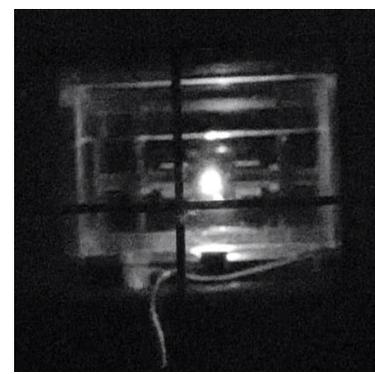
Fotograma 3



Fotograma 4



Fotograma 5



Fotograma 6



Fotograma 7



Fotograma 8



Fotograma 9

Fig. 6.9 Fotogramas de ensayo del grupo B1 de la tabla 6.1.

En la mayoría de los casos se puede observar que la luminosidad del arco no forma una descarga estable en el tiempo, sino que ésta varía en el tiempo. Si bien los tiempos de duración del video no coinciden con los tiempos de emisión de las señales, el fenómeno de la descarga no es estable, sino que tiene máximos y mínimos de intensidad en un corto periodo de duración.

Para la amplitud de DP ac se mostraran las señales del grupo I1 y M1 de la tabla 6.1.

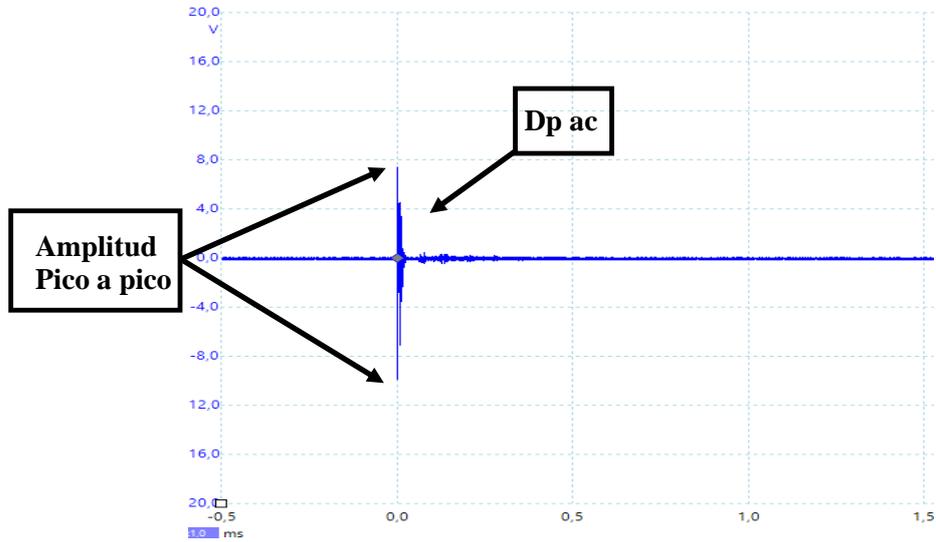


Fig. 6. 11 Señal de Amplitud DP ac del ensayo N°34, grupo M1 de la tabla 6.1

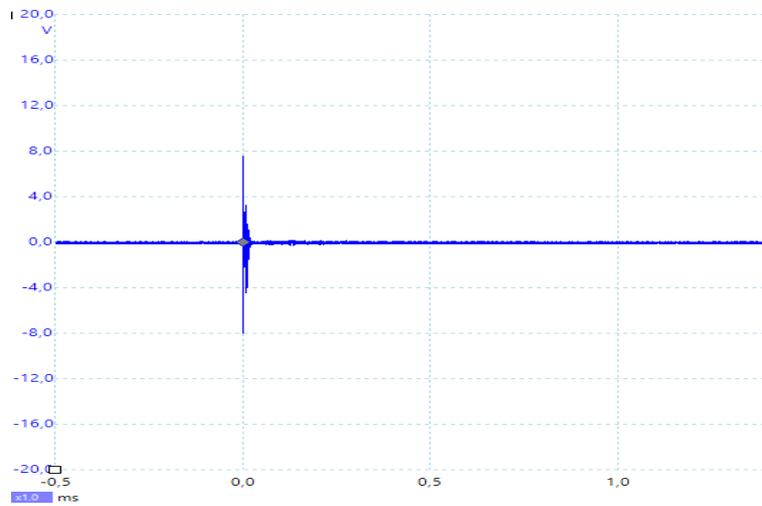


Fig. 6. 12 Señal de Amplitud DP ac del ensayo N°35, grupo M1 de la tabla 6.1

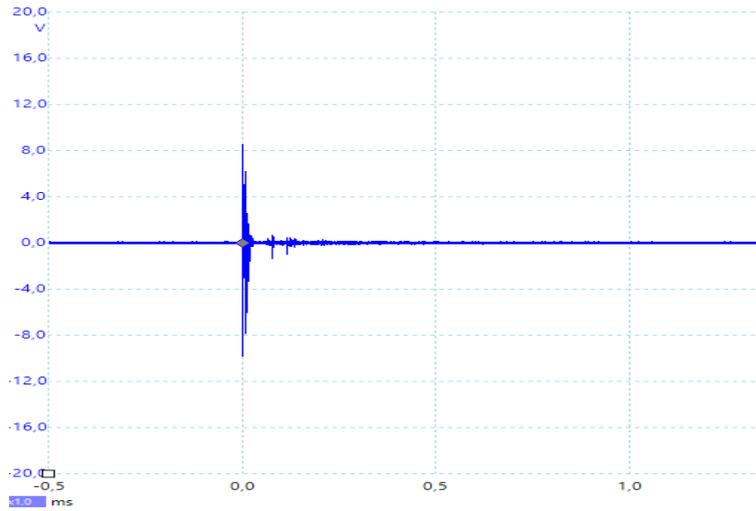


Fig. 6.13 Señal de Amplitud DP ac del ensayo N°38, grupo M2 de la tabla 6.1

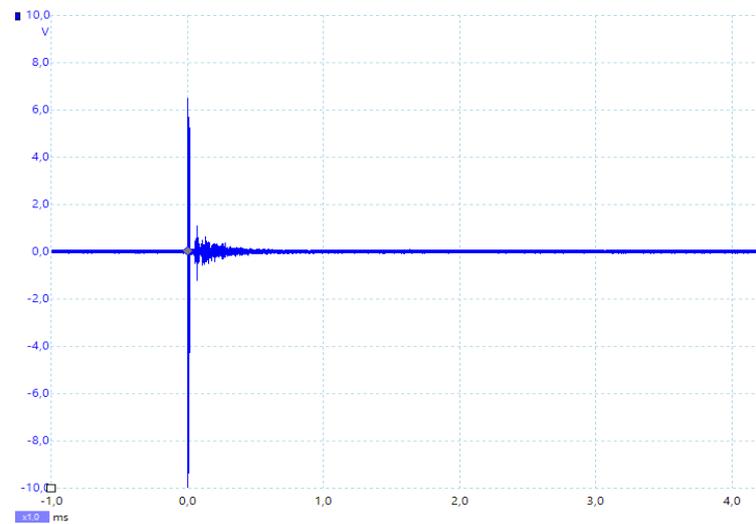


Fig. 6.14 Señal de Amplitud DP ac del ensayo N°11, grupo I1 de la tabla 6.1.

Se puede observar que las señales mostradas de DP ac son de menor amplitud que las señales de RA, con una típica forma de señal tipo explosión. Estas señales tienen un tiempo de subida muy corto y un tiempo de decaimiento más largo. Las señales DP ac no muestran más de un pico de máxima tensión como se apreciaba en las RA.

Para la **DP aire** se mostraran señales del grupo B de la tabla 6.1.

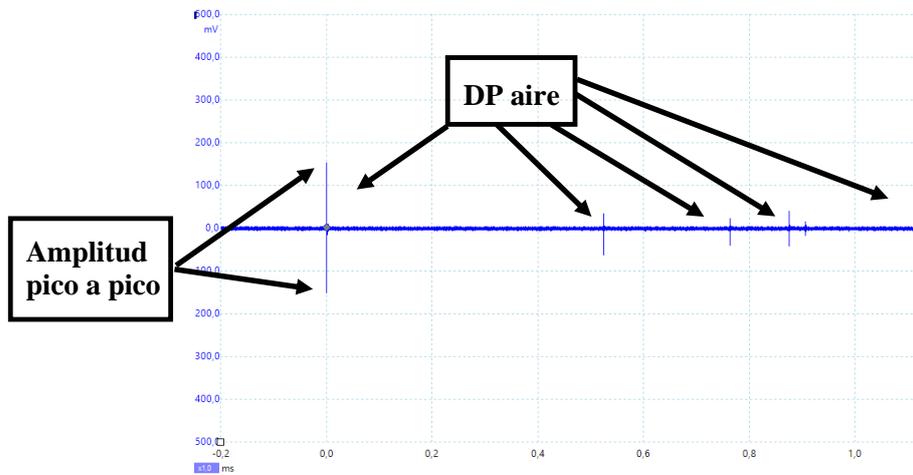


Fig. 6.15 Señal de Amplitud DP aire del ensayo N°4, grupo B1 de la tabla 6.1

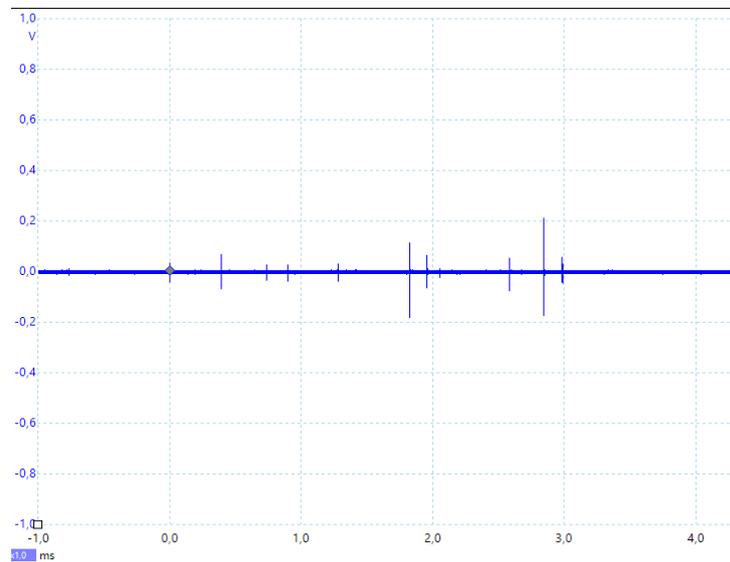


Fig. 6.16 Señal de Amplitud DP aire del ensayo N°5, grupo B1 de la tabla 6.1

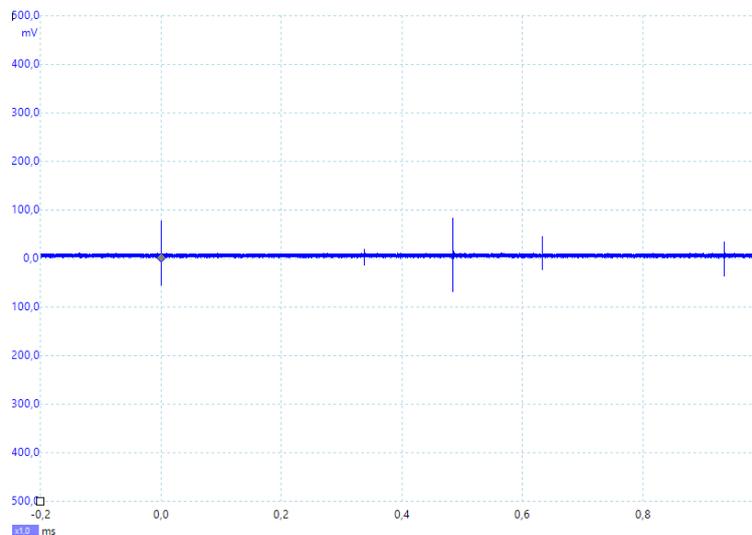


Fig. 6.17 Señal de Amplitud DP aire del ensayo N°7, grupo B2 de la tabla 6.1

En las señales mostradas se puede observar varias descargas de pequeña magnitud y corto tiempo de duración. Dentro del intervalo de medición aparecen gran cantidad de estas señales. Posteriormente se analizará la tasa de emisión de estas descargas ya que son indicativas del nivel de tensión, donde a un nivel mayor de tensión su aparición es más frecuente.

En este tipo de descargas no se observa un fenómeno de emisión posterior a cada hit como se observaba en las señales RA.

Adicionalmente se observa que las señales tienen un tiempo de subida y un tiempo de decaimiento también cortos.

En la tabla 6.4 se sintetiza cada tipo de descarga parcial y se comparan los valores de amplitud máxima para cada una de ellos.

Tabla 6.4 Amplitud de los diferentes tipos de DP.

Tipo de Descarga	Grupo	Ensayo N°	Amplitud máxima [V]	Promedio [V]
DP con RA	I2	19	>20	>20V
DP con RA	I3	21	>20	
DP con RA	I3	22	>20	
DP con RA	I4	29	>20	
DP con RA	M1	32	>20	
DP con RA	M2	37	>20	
DP en aceite	I1	11	10	4V a 16V
DP en aceite	M1	34	9	
DP en aceite	M1	35	8	
DP en aceite	M2	38	9	
DP en aire	B1	4	0,15	< 0,3V
DP en aire	B1	5	0,2	
DP en aire	B2	7	0,1	

Las amplitudes de las señales de RA muestran ser las mayores, mientras que las DPs ac muestran valores intermedios. Finalmente las descargas DP aire son la de menor amplitud debido a que se producen lejos del sensor y son pequeñas descargas que se producen al aire.

A su vez se puede decir que la amplitud de las RA tiene una magnitud de un orden superior respecto a las DP aire. Esto indica que se deberá evaluar la sensibilidad de la cadena de medición en base al tipo de señal que se desea monitorear.

6.3.3 Análisis de duración de la señal de EA

Se analizan señales capturadas durante los ensayos realizados y se determina los tiempos de duración de cada tipo de descarga para caracterizar su comportamiento temporal.

Primeramente se realiza un análisis de la señal de descarga parcial con RA. Para ello, a continuación se muestran ensayos de RA del grupo I de la tala 6.1.

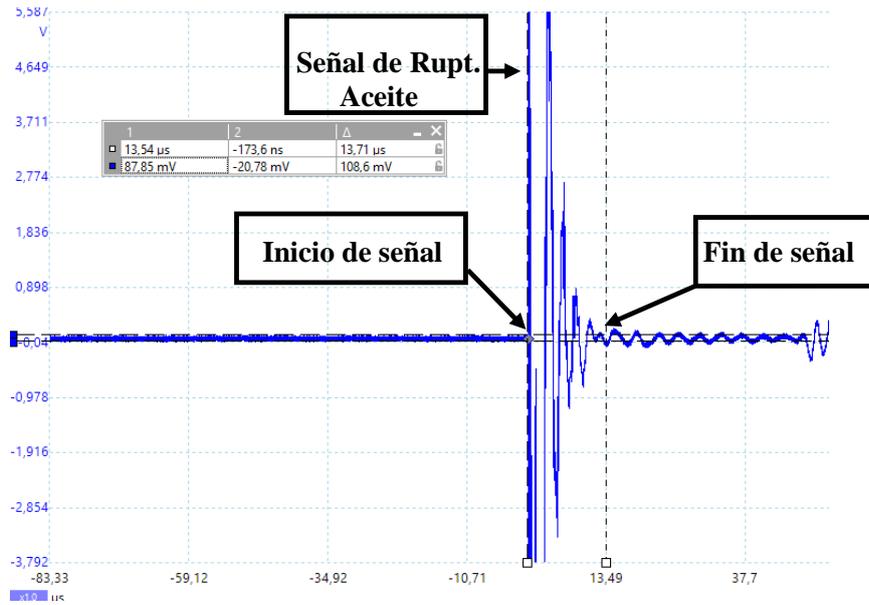


Fig. 6.18. Duración de señal de RA (1^{er} pico máx. de tensión) en ensayo N°11, grupo I1 de la tabla 6.1.

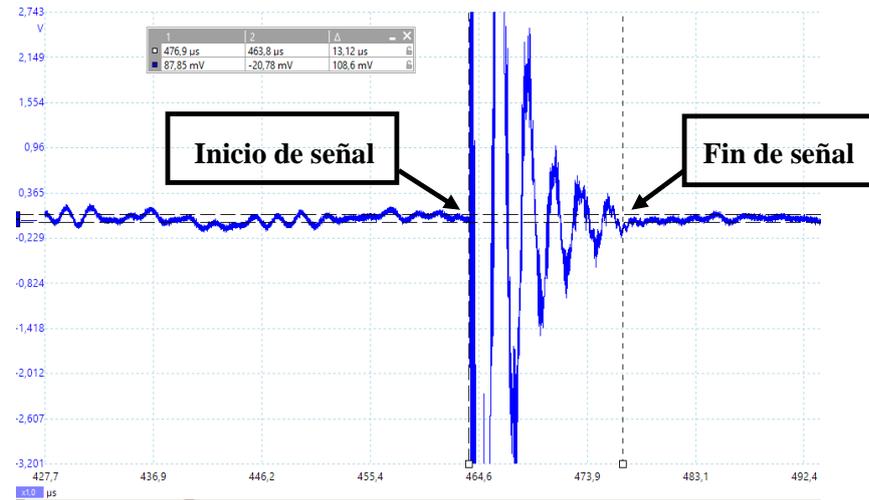


Fig. 6.19. Duración de señal de RA (2^{do} pico máx. de tensión) en ensayo N°11, grupo I1 de la tabla 6.1.

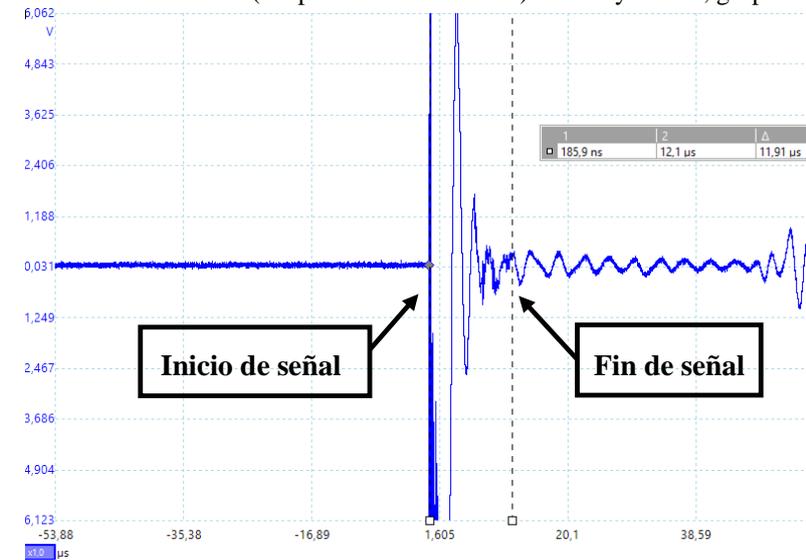


Fig. 6.20 Duración de señal de RA en ensayo N°16, grupo I2 de la tabla 6.1.

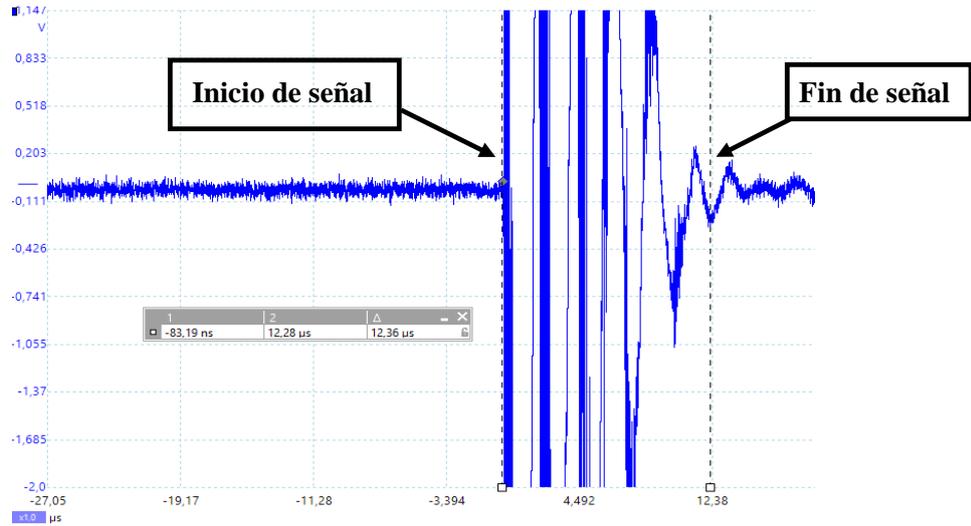


Fig. 6.21 Duración de señal de RA en ensayo N°22, grupo I3 de la tabla 6.1.

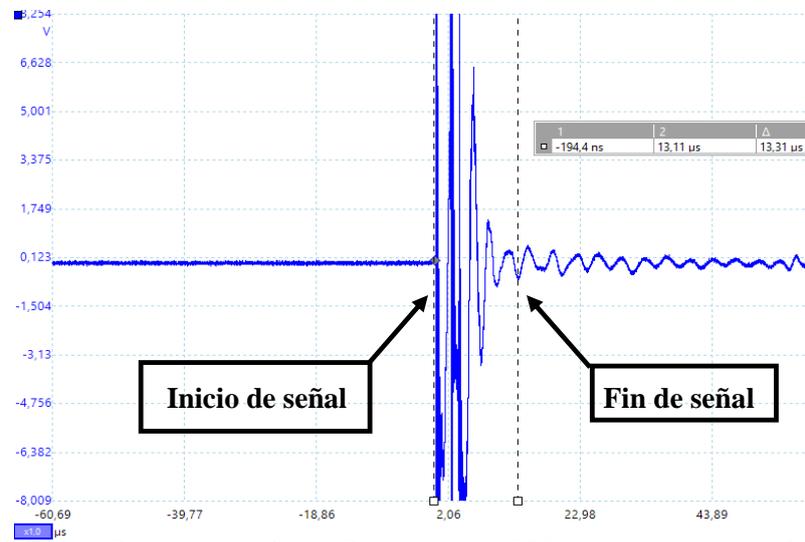


Fig. 6.22 Duración de señal de RA en ensayo N°28, grupo I4 de la tabla 6.1.

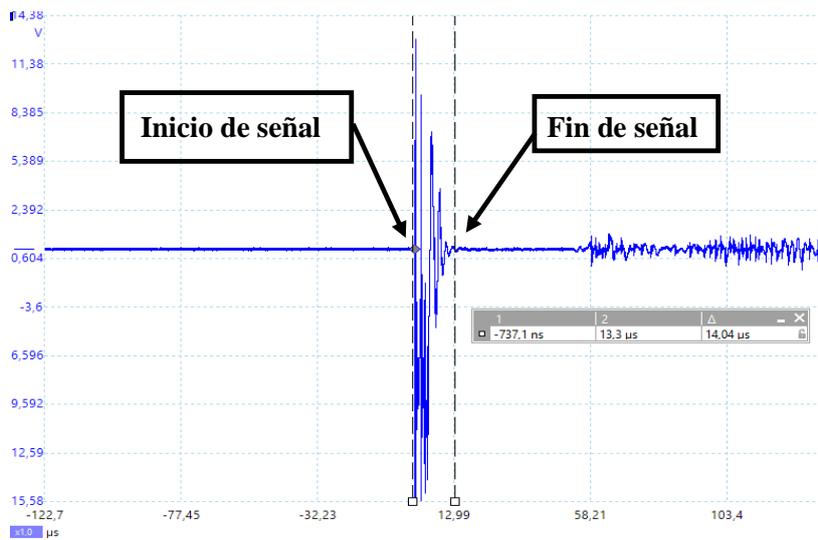


Fig. 6.23 Duración de señal de RA en ensayo N°32, grupo M1 de la tabla 6.1.

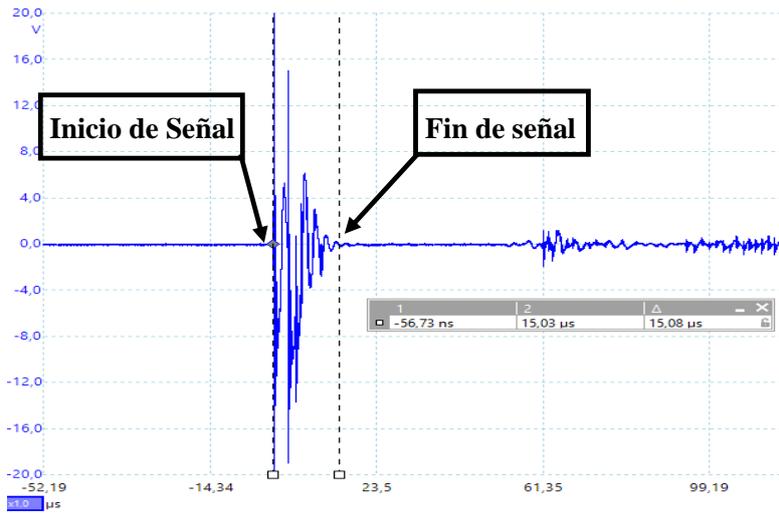


Fig. 6.24 Duración de señal de RA en ensayo N°36, grupo M2 de la tabla 6.1.

Se puede observar que los tiempos de duración de la señales son similares en todos los casos e independiente del aceite donde se produce la ruptura dieléctrica.

Análisis de tiempos característicos de DP ac:

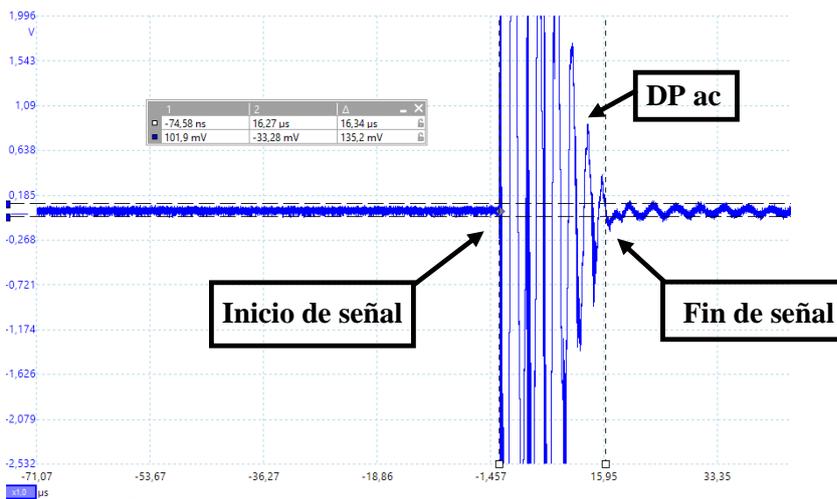


Fig. 6.25 Duración de señal de DP ac en ensayo N°11, grupo I1 de la tabla 6.1.

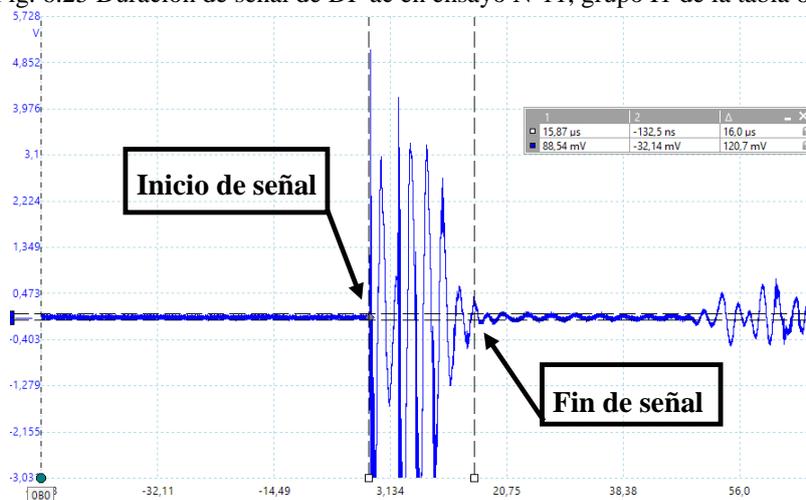


Fig. 6.26 Duración de señal de DP ac en ensayo N°13, grupo I1 de la tabla 6.1.

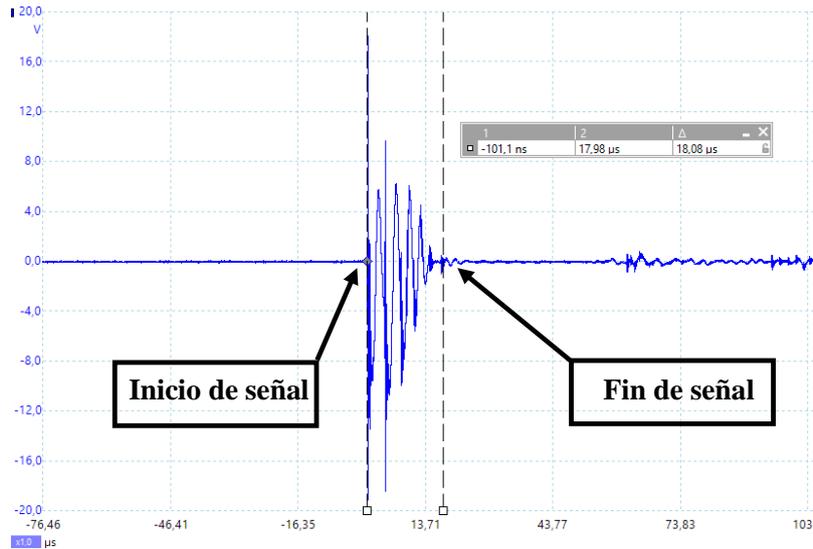


Fig. 6.27 Duración de señal de DP ac en ensayo N°33, grupo M1 de la tabla 6.1.

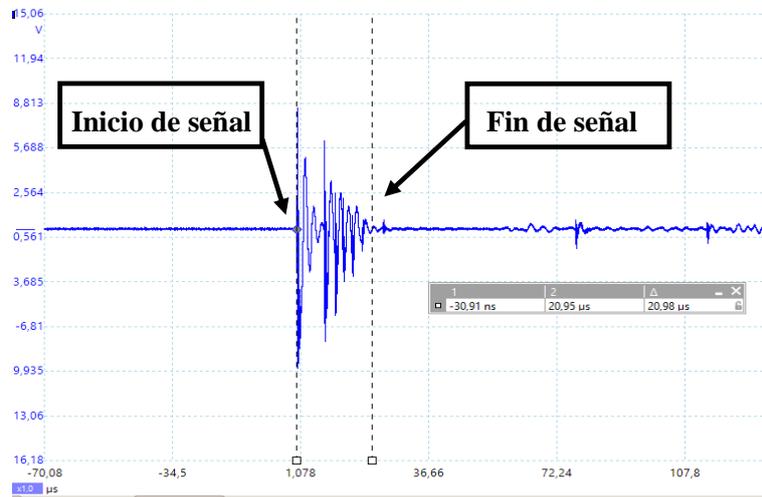


Fig. 6.28 Duración de señal de DP ac en ensayo N°38, grupo M2 de la tabla 6.1.

En las señales mostradas de DP ac se observa que estas son levemente superior en duración que las RA.

Análisis de duración de señales DP aire.

Debido a que el único grupo donde se escucharon este tipo de descargas es el grupo B de la tabla 6.1, se mostraran señales de estos ensayos.

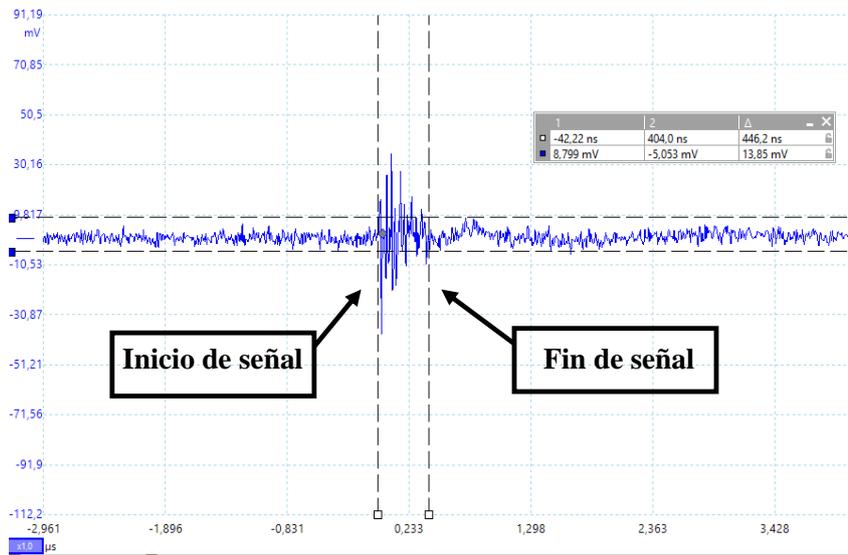


Fig. 6.29 Duración de señal de DP aire en ensayo N°4, grupo B1 de la tabla 6.1

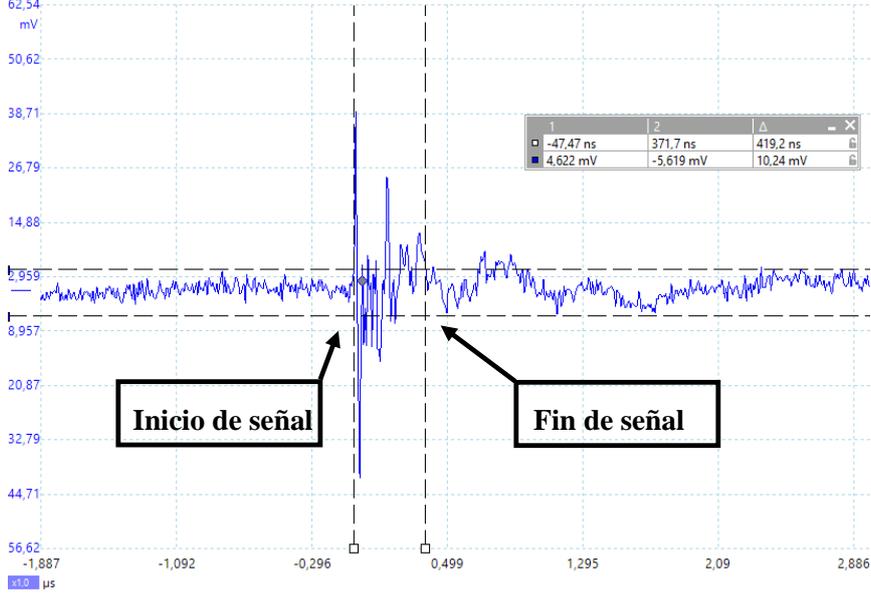


Fig. 6.30 Duración de señal de DP aire en ensayo N°5, grupo B1 de la tabla 6.1

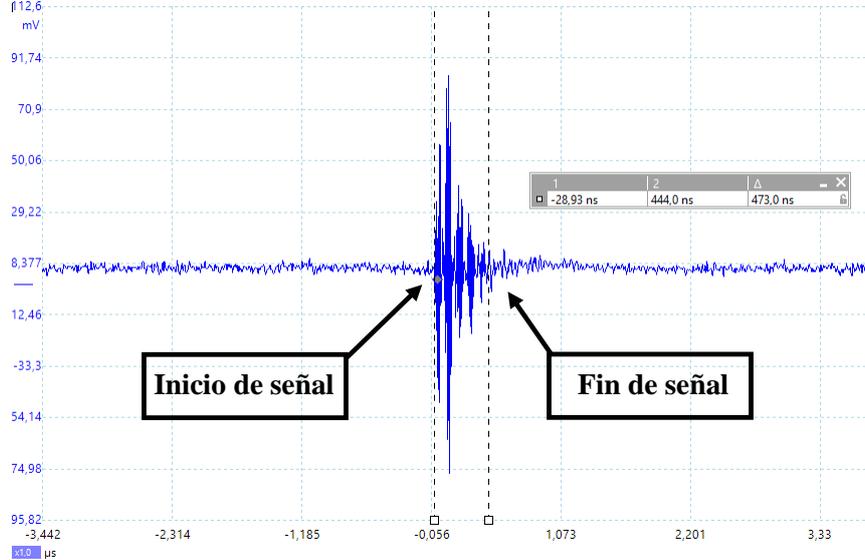


Fig. 6.31 Duración de señal de DP aire en ensayo N°7, grupo B2 de la tabla 6.1

Las DP aire tienen mucho menor duración de señal que los tipos de descargas vistos anteriormente. Esto indica que para apreciar bien los fenómenos de DP aire es necesario configurar adecuadamente la escala de resolución temporal de tiempo, ya que un mal seteo de la misma prestara confusiones de la señales de DP aire con ruido base del sistema u otro fenómeno existente.

A continuación se establece el cuadro comparativo 6.5 donde se analizan los resultados de la medición de tiempos de las señales mostradas.

Cuadro comparativo 6.5. Análisis de tiempo de duración de descargas

Tipo de Descarga	Grupo	Ensayo N°	Tiempo [μ s]	Promedio [μ s]
DP con RA	I1	11	13,71	10 μ s a 16 μ s
DP con RA	I1	12	15,83	
DP con RA	I2	16	11,91	
DP con RA	I3	22	12,36	
DP con RA	I4	28	13,31	
DP con RA	M1	32	14,04	
DP con RA	M2	36	15,08	
DP en aceite	I1	11	16,34	16 μ s a 21 μ s
DP en aceite	I1	13	16	
DP en aceite	M1	33	18,08	
DP en aceite	M2	38	20,96	
DP en aire	B1	4	0,446	< 0,5 μ s
DP en aire	B1	5	0,419	
DP en aire	B2	7	0,473	

Según el cuadro comparativo 6.5 la duración de la señal cuando hay RA oscila en valor de 10 a 16 μ s para cada una de las emisiones registradas. Estas emisiones se pueden repetir más de una vez en la misma descarga, pero individualmente cada una de ellas parecería ser de menor duración que las DP ac las cuales tiene una duración máxima de 21 μ s pero carecen de repetición del suceso.

Adicionalmente se puede observar que los tiempos de duración en los casos de descargas parciales al aire son de mucha menor duración que las anteriores descargas analizadas. En comparación, se puede establecer que los picos de tensión máximos de las DP aire no exceden un tiempo de duración de 0,5 μ s, por lo que estas se pueden distinguir notoriamente de los demás tipos de descargas mencionados aunque su frecuencia de aparición es mucho mayor durante el registro de la señal.

6.4 Análisis del espectro de frecuencias de la EA.

Muchos fenómenos físicos pueden describirse mediante una señal en el dominio del tiempo, es decir, la evolución de la amplitud, voltaje, posición velocidad en función del tiempo. Sin embargo, esta información también puede ser expresada en el dominio de la frecuencia donde se puede apreciar el contenido de frecuencias que componen dicha oscilación en el tiempo y la energía característica del espectro analizado.

En este apartado se realizara un estudio de las frecuencias de algunas de las señales de EA recogidas a través del software Picoscope6 durante los ensayos, y se determinara las frecuencias características para cada tipo de señal.

El ancho de banda del análisis realizado comprenderá desde 60 kHz hasta aproximadamente 800 kHz o 1 MHz. Estas bandas de análisis se establecen en función

del fenómeno y de las características de la cadena de medición (sensor, preamplificador, osciloscopio).

A continuación se muestran los espectros en frecuencias de algunas señales y se analiza su caracterización.

Este análisis es muy limitado en función de las características del software utilizado y de los tipos de señales digitalizadas. En general por cada adquisición se tiene más de una emisión, por lo tanto el espectro obtenido será una resultante de todas estas emisiones durante ese intervalo de tiempo. Por esta razón no se puede realizar un análisis puntual de una sola emisión. Por otro lado como se mencionó anteriormente, estas señales tiene una duración muy corta, desde 0.5 us a 21 us. Teóricamente estas señales pueden ser modeladas como una delta o una respuesta impulsiva, la cual transformada al dominio de las frecuencia, estarán compuesta por todas las frecuencias del espectro. Es decir que tiene un ancho de banda bastante amplio.

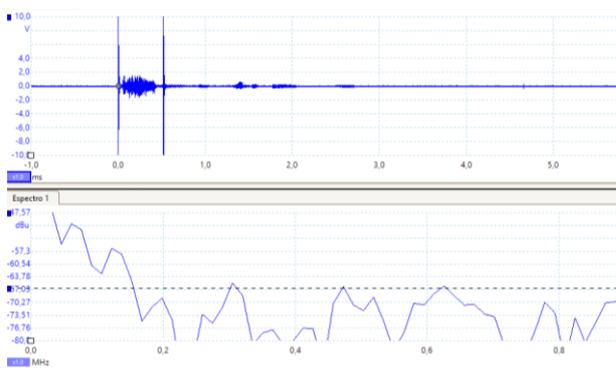


Fig. 6.32 Espectro de frecuencia Ens. N°13

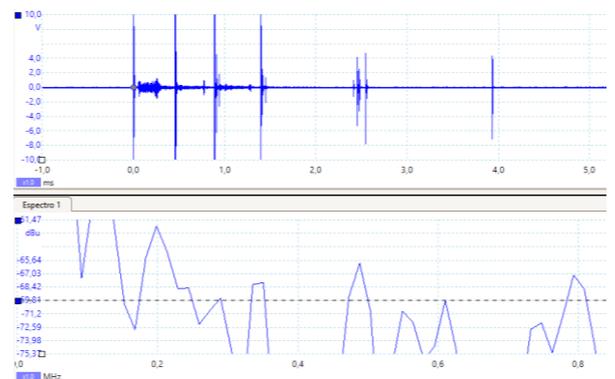


Fig. 6.33 Espectro de frecuencia Ens. N°15

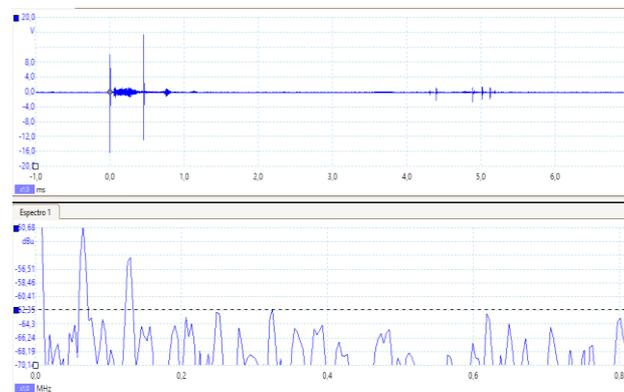


Fig. 6.34 Espectro de frecuencia Ensayo N°17

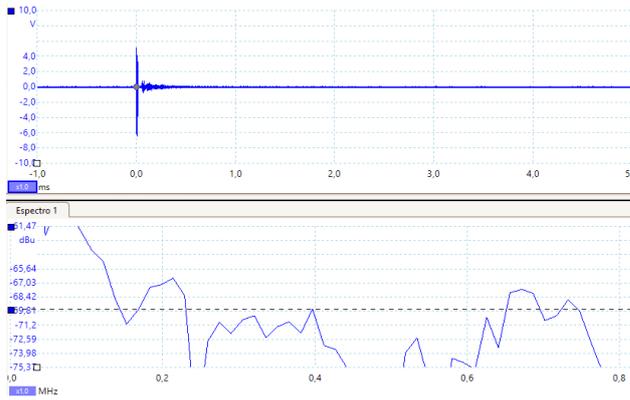


Fig. 6.35 Espectro de frecuencia Ens. N°11(DP ac)

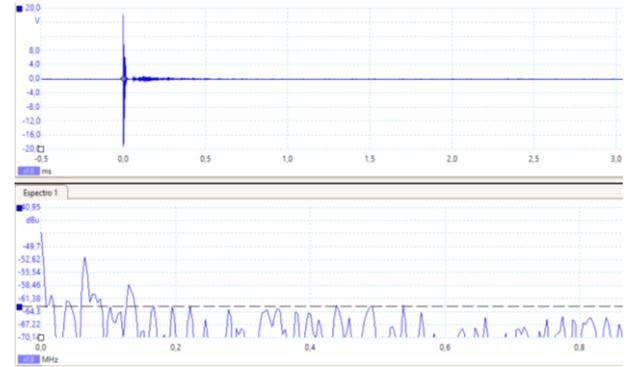


Fig. 6.36 Espectro de frecuencia Ens. N°33, (DP ac)

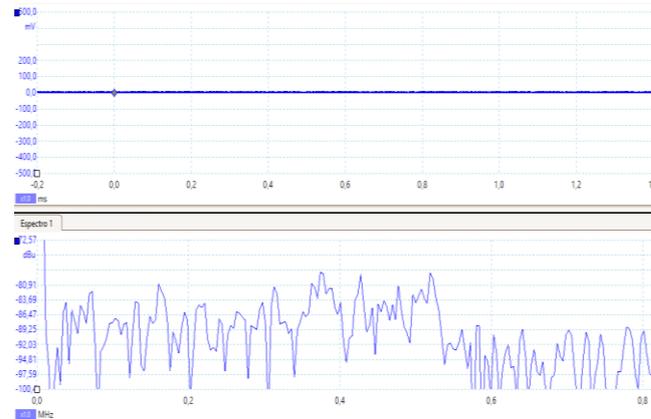


Fig. 6.37 Espectro de frecuencia Ens. N°7 (DP aire)

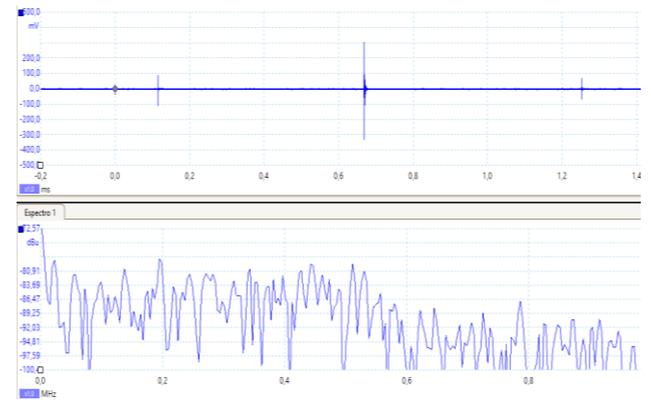


Fig. 6.38 Espectro de frecuencia Ens. N°4 (DP aire)

Todos los espectros de frecuencia observables no presentan frecuencias puntuales o específicas en determinado valor, ni patrones repetitivos entre señales.

Se observa que en los espectros de frecuencia de las señales de los ensayos estudiados la banda inferior de frecuencia tiene valores inferiores a 200 kHz independiente del tipo de fenómeno dado. Por esta razón la utilización de un sensor piezoeléctrico resonante en 150 kHz sería una buena elección a la hora de apreciar mejor la frecuencia característica de la señal y aumentar la relación señal ruido.

Esto se encuentra en concordancia con la norma IEEE C57.127 de método de medición acústico de descargas parciales que mencionan una frecuencia característica para las descargas parciales entre 60 kHz y 150 kHz.

Adicionalmente, la norma menciona que los sensores resonantes en frecuencia de 60 kHz son utilizados en ensayos de laboratorio, pero generalmente las mediciones de campo debido a la presencia de ruidos o ruidos de armónicos que puede existir, se suele utilizar los sensores resonantes en 150 kHz que favorecen las mediciones.

6.5 Tasa de emisión de señales de EA en función del voltaje

En el presente apartado se busca analizar la tasa de emisión de hits en función de la tensión de servicio brindada a la cuba realizando un barrido desde 0 V hasta el máximo del equipo de RD en el aceite en buen estado B1

Cada hit de descarga se da cuando el valor de tensión de la señal supera el umbral de disparo establecido en el osciloscopio. Una vez que comenzó a grabar el osciloscopio, se registran todas las emisiones que se producen durante esa ventana de grabación. De

esta manera toda la toma tiene una misma duración y si durante el barrido en voltaje la cantidad de emisiones por intervalo de grabación aumenta, significa que la tasa de producción de descargas aumentó. Esto permite observar y contabilizar la cantidad de hits por segundo de descargas parciales y establecer una tasa de emisión como se grafica en la fig. 6.39 para el ensayo B1 a partir de la tabla de emisiones presente en el anexo D donde se contabiliza la cantidad de hits por segundo de DP aire mientras se varía el voltaje aplicado.

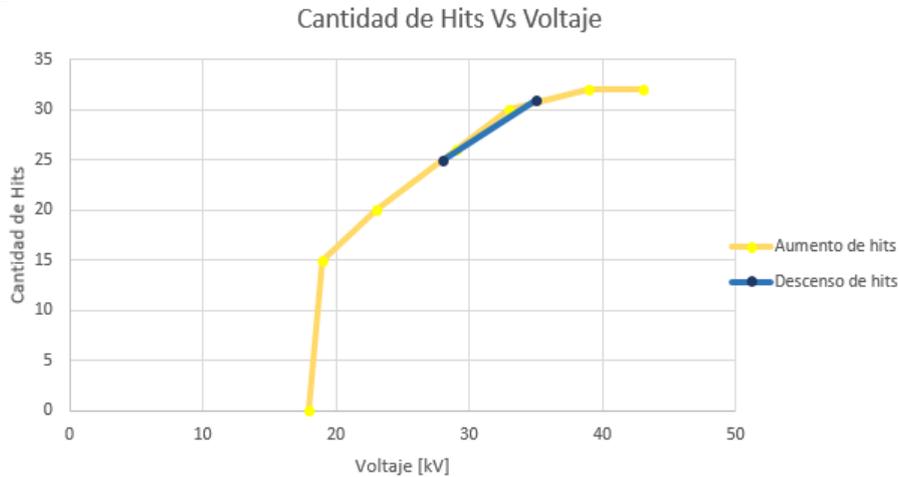


Fig. 6.39. Cantidad de Hits Vs Voltaje.

El ensayo se realizó en 2 tramos, uno ascendente y otro descendente de voltaje. Se puede observar que al aumentar la tensión de servicio del equipo de RD se produce un aumento notorio de la cantidad de hits de DP aire, teniendo su valor máximo de cantidad de hits al alcanzar el valor máximo del equipo de RD. Adicionalmente se observa que una vez alcanzado el valor máximo capaz de proveer el equipo de RD, la tasa de emisión se mantiene constante.

El estudio se repitió efectuando un ensayo con aceite del grupo B2 de la tabla 6.1. Esta vez se realizó el ensayo contabilizando 10 segundos a un valor constante de 20 kV de tensión y luego 10 segundos a un valor constante de 30 kV de tensión. Los resultados se muestran en la tabla 6.8 del anexo D y en la fig. 6.40 se muestra gráficamente la evolución de la emisión en función del tiempo.

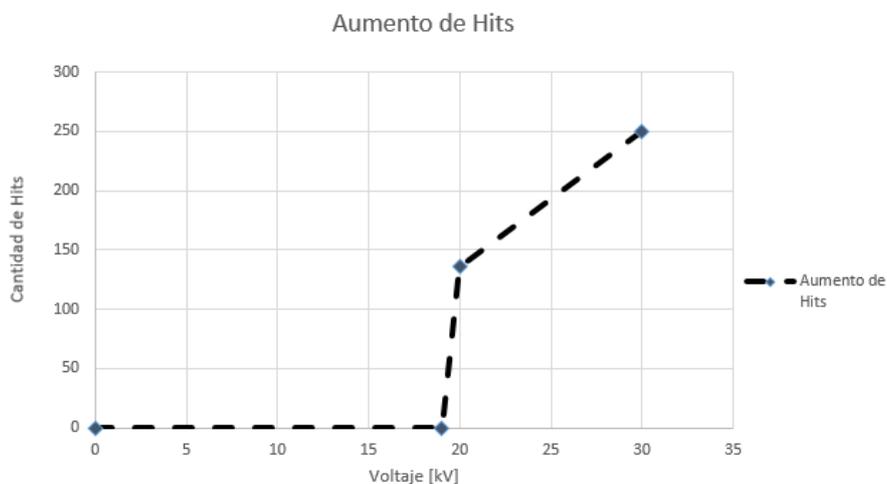


Fig. 6.40. Numero de Hits Vs Voltaje

Inicialmente, como se puede apreciar en la tabla 6.8 no se escuchan DP aire hasta alcanzar los 19 kV. Una vez establecida la tensión en un valor constante de 20 kV se toma la cantidad de hits de DP aire por un periodo de tiempo de 10 segundos. Posteriormente se vuelve a elevar la tensión y se deja a un valor constante de 30 kV por el mismo periodo de tiempo.

Como puede apreciarse en la figura 6.40, la tasa de cantidad de hits aumenta notoriamente como consecuencia del aumento de tensión.

Se considera de gran importancia este estudio realizado ya que en caso de relevar un transformador por medio de la técnica de EA, la tasa de emisión es una variable muy importante a la hora de evaluar el estado del aceite y del transformador en general. Una tasa de emisión alta en zonas aleatorias de todo el transformador puede indicar que el aceite está en un estado defectuoso mientras que una alta tasa de emisión en un mismo lugar de manera localizada, puede indicar un defecto o un deterioro particular de una pieza del transformador.

Paralelamente el análisis de la tasa de EA en función del nivel de carga del transformador puede utilizarse como nivel de referencia para establecer límites de trabajo en transformadores en servicio. De esta manera si a un determinado nivel de carga la tasa de emisión es muy alta, se puede bajar el nivel de trabajo del transformador y prolongar el servicio hasta una salida programada para su reparación.

En caso de tener un transformador sobrecargado, se puede accionar con alternativas preventivas como por ejemplo alimentar parte de la zona que alimenta el transformador en cuestión con otro transformador con menor carga de la zona, o considerar el cambio de transformador por uno de mayor capacidad de potencia que no se utilice con un alto grado de carga, o conectar un transformador adicional en la zona para aliviar al transformador en cuestión, etc.

CAPITULO 7 - Ensayo mediante EA de uno de los transformadores del laboratorio de Ing. Eléctrica UTN-FRD

7.1 Descripción de equipos de medición

El transformador a ser monitoreado es relativamente nuevo (3 años) y se utiliza esporádicamente para realizar ensayos de la carrera de Ing. eléctrica, razón por la cual no se espera obtener descargas parciales relevantes que indiquen un estado deteriorado del equipo.

Dentro del laboratorio de eléctrica, el recinto perimétrico de media tensión cuenta con 2 transformadores trifásicos idénticos de 10 kVA de potencia.

El ensayo se realizó en el transformador número 2 de la celda de media tensión del laboratorio. Las características del transformador se muestran en las figuras 7.1 a y b. Las especificaciones técnicas del mismo se adjuntan al presente proyecto en el anexo E.

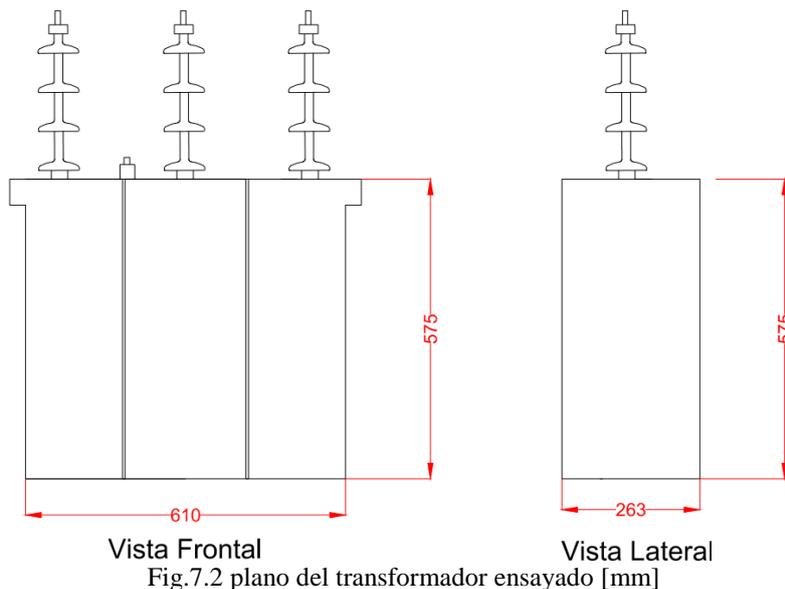


Fig. 7.1 a) Transformador



Fig. 7.1 b) Especificaciones Técnicas del transformador

En la figura 7.2 se detalla un plano de medidas generales transformador ensayado.



Ambos transformadores del recinto se utilizan para simular una línea de media tensión en 13200V y no tienen como función alimentar algún circuito u aparato eléctrico. Esto quiere decir que el transformador trabaja en vacío, ya que al no tener carga a la salida del transformador en el lado de baja tensión, no consume corriente.

Debido a la necesidad de tener una carga apropiada para medir según norma IEEE C57.127, se conectó a la salida del transformador un ventilador de refrigeración de un transformador de potencia que pertenece al laboratorio de eléctrica cuyas características principales se muestran en las figuras 7.3 a y b.



Fig. 7.3 a) Ventilador utilizado como carga

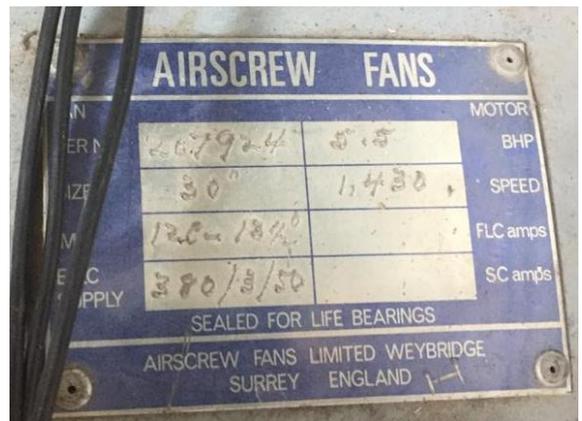


Fig. 7.3 b) Especificaciones del ventilador

Se utilizó un esquema de sistema de arranque directo de un motor que se muestra en la figura 7.4 para el encendido del ventilador.

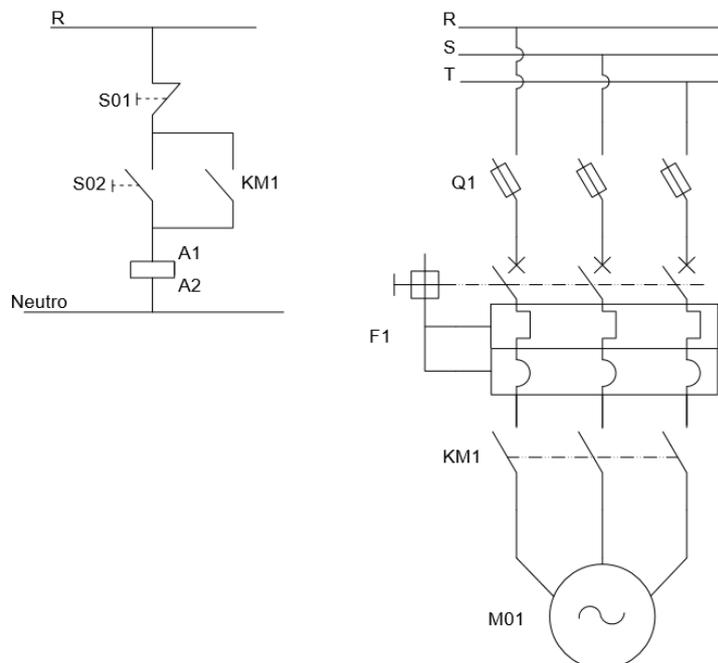


Fig. 7.4. Circuito de comando y circuito de potencia para arranque de ventilador

El unifilar del circuito de comando y circuito de potencia del arranque del ventilador se realizó con simbología de norma europea.

Los fusibles utilizados fueron de 25A, y el interruptor termomagnético utilizado fue un ABB de 20A.

Para la captar, digitalizar y procesar la señal de EA se utilizó el diagrama de bloques de la cadena de EA descrito en 5.1.2 del presente proyecto.

- Colocación del sensor

Según norma IEEE C57.127 establece que los puntos más propensos a sufrir deterioro son debajo de los bushing del transformador. Por esta razón estos puntos son unos de los más importantes para ser monitoreados durante un ensayo de estas características.

El sensor de EA fue colocado en el centro del transformador del lado de alta tensión y debajo del aislador como se observa en la figuras 7.5 a y b.

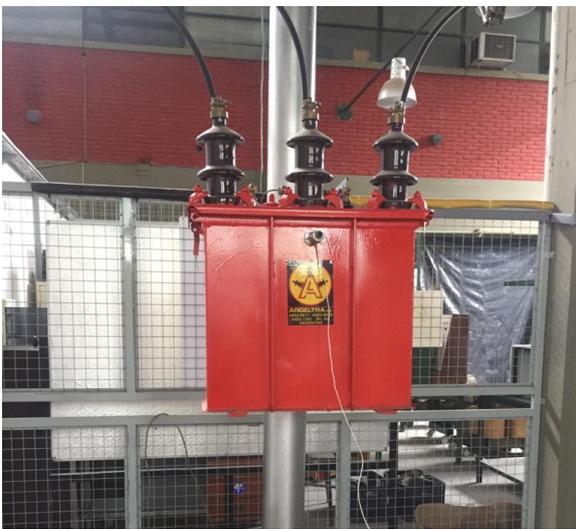


Fig. 7.5 a) Sensor colocado en transformador

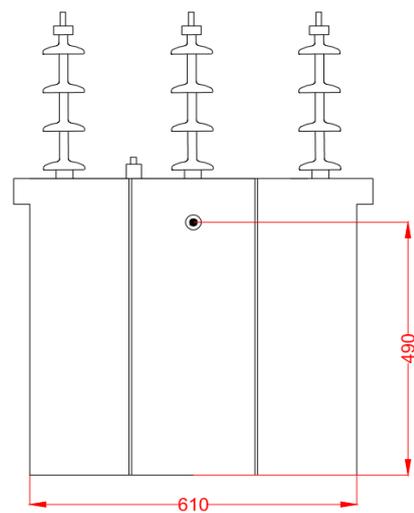


Fig 7.5b) Disposición del sensor

7.2 Memoria de cálculo

Previo a elegir la carga del sistema se realizaron los cálculos para verificar la corriente capaz de suministrar la salida del lado de baja tensión del transformador.

Según la fórmula de potencia aparente trifásica se tiene:

$$S = \sqrt{3} \cdot U \cdot I$$

Siendo,

S= Potencia aparente del transformador [10 kVA]

U= Tensión del lado de baja del transformador [400 V]

I= Corriente del lado de baja del transformador

Se despeja la corriente que se desea averiguar y se reemplazan los valores en la formula.

$$I = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U}$$

$$I = \frac{10.000 \text{ VA}}{\sqrt{3} \cdot 400 \text{ V}}$$

$$I = 14,45 \text{ A}$$

Debido a ese valor de corriente, se eligió un ventilador existente en el laboratorio de eléctrica cuyo consumo no superaba los 9 A de corriente en su forma de conexión en triángulo.

7.3 Calibración

El equipo de medición y la configuración del sistema fue la misma que se utilizó durante el monitoreo de los ensayos de rigidez dieléctrica, a excepción de la preamplificación de la señal que fue incrementada de 10 dB a 30 dB para el presente ensayo. La calibración del sistema de EA se realizó por el método de rotura de mina de lápiz (Hsu Nielsen) explicado en el apartado 4.4.2.5 del presente proyecto. Se rompieron 3 minas de lápiz en distintos lugares del transformador desenergizado para poder posicionar y medir las variables de EA correctamente en el sistema de medición de EA.

La primera rotura de mina de lápiz se realizó al lado del sensor como se observa en la Fig. 7.6 La segunda rotura de mina de lápiz se realizó en la cara posterior del transformador a la misma altura del sensor como se observa en la figura 7.7, y la tercera se realizó en el punto más lejano del transformador al sensor como se muestra en la figura 7.8.

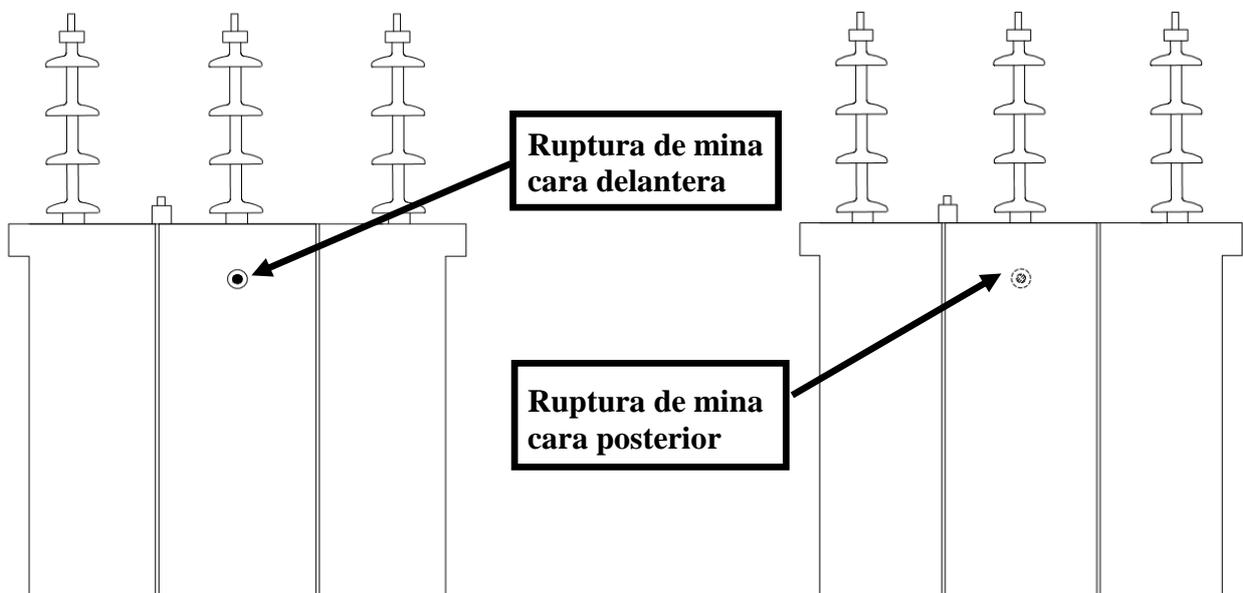


Fig.7.6 Ruptura de mina de lápiz en cara delantera del transformador

Fig.7.7 Ruptura de mina de lápiz en cara posterior del transformador

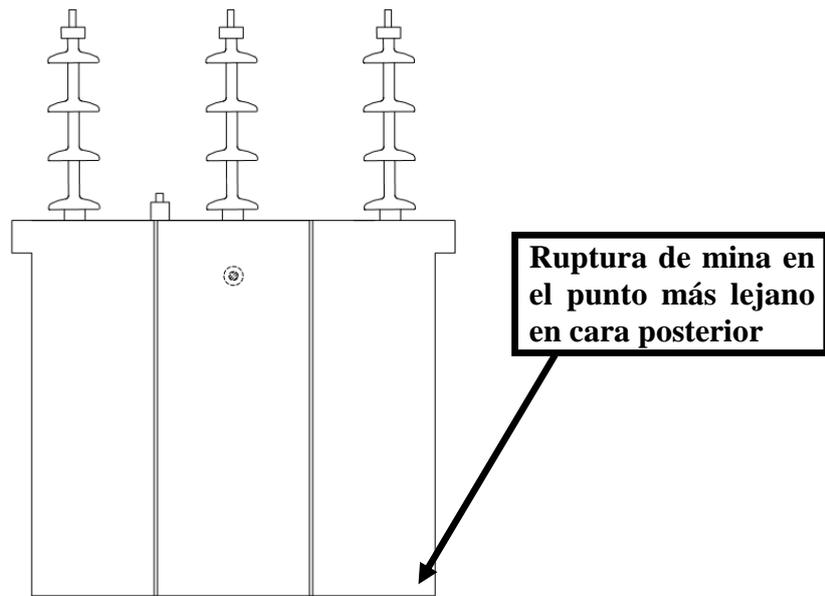


Fig.7.8 Ruptura de mina de lápiz en punto más lejano del transformador al sensor

Las señales de EA que se obtuvieron en todos los casos descritos anteriormente se muestran en las figuras 7.9, 7.10 y 7.11.

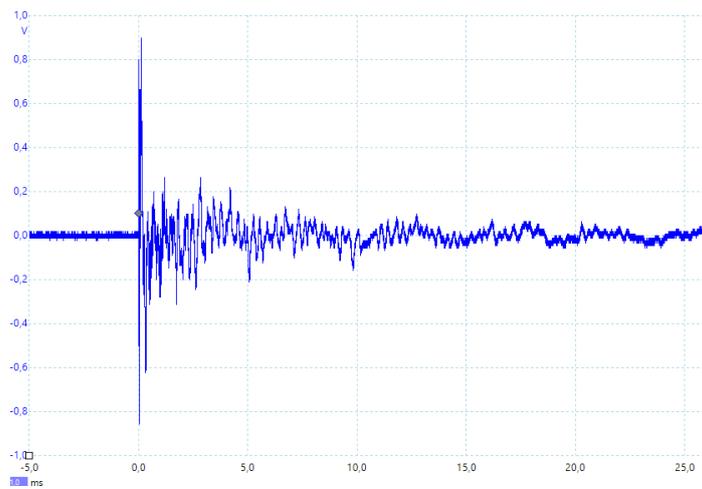


Fig. 7.9. Señal de EA de rotura de mina al lado del sensor.

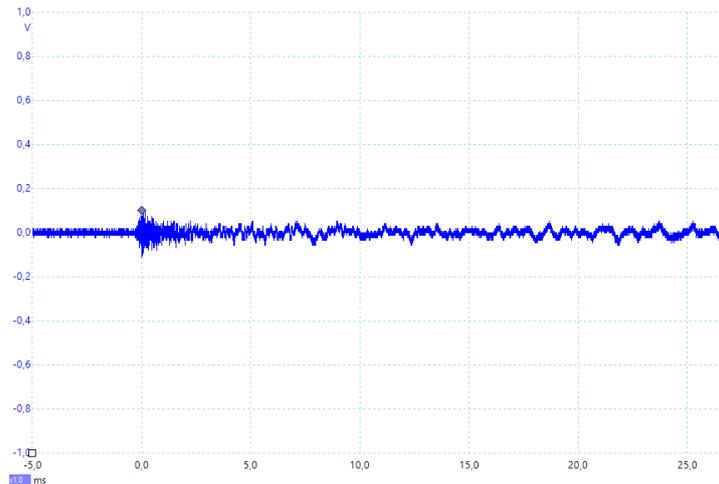


Fig. 7.10. Señal de EA de rotura de mina en la cara posterior del transformador y altura del sensor.

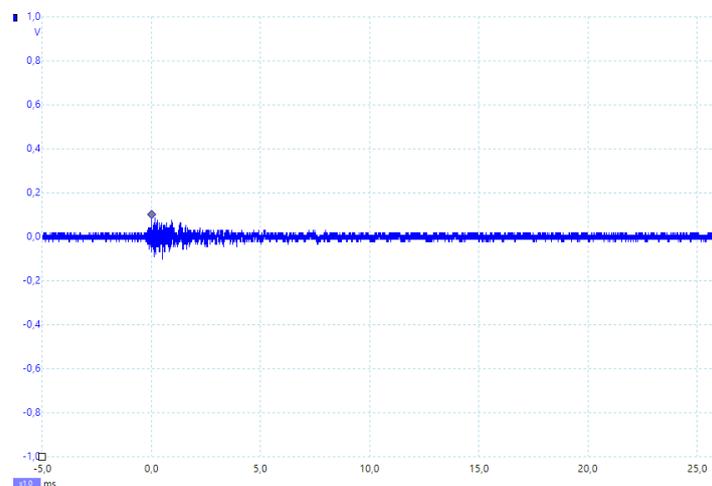


Fig. 7.11. Señal de EA al romper mina en punto más lejano del transformador al sensor.

En base a estas mediciones comparativas y método de calibración Hsu Nilesen, se establece que en la parte más alejada del sensor de monitoreo se puede captar una señal de fractura de una mina de lápiz y observar entonces que la cadena de medición tiene la sensibilidad de monitorear todo el cuerpo del transformador.

7.4 Procedimiento de ensayo

Para realizar la práctica se debió energizar la celda de media tensión del laboratorio de eléctrica con la supervisión de 2 personas responsables de seguridad en el lugar. Adicionalmente se debió leer el manual de energización y seguridad del laboratorio de eléctrica.

Primeramente se retiró la P.A.T de la línea de media tensión. Luego se desbloquearon los bloqueos mecánicos existentes en interruptores para poder alimentar la línea.

Una vez alimentada la línea de media tensión y verificada la tensión en bornes de salida del transformador, se procedió a energizar el ventilador por medio de botonera de arranque S02 de la figura 7.4.

Se realizó un monitoreo continuo del transformador durante 2 hs. Durante todo el periodo de tiempo de ensayo no se observaron señales apreciables relacionadas con posibles descargas parciales o deterioro de componentes dentro del transformador.

Se grabaron más de 500 señales con características continuas que podrían ser determinadas como ruido base del sistema. De esta manera se realizó un monitoreo de

las señales de base del sistema que en un futuro permitirán comparar posteriores monitoreos y observar la existencia de estos parámetros de base y determinar evolución del estado de dicho transformador.

7.5 Análisis de resultados

A continuación se muestran señales del ruido base del sistema captado por el sensor en la figura 7.12.

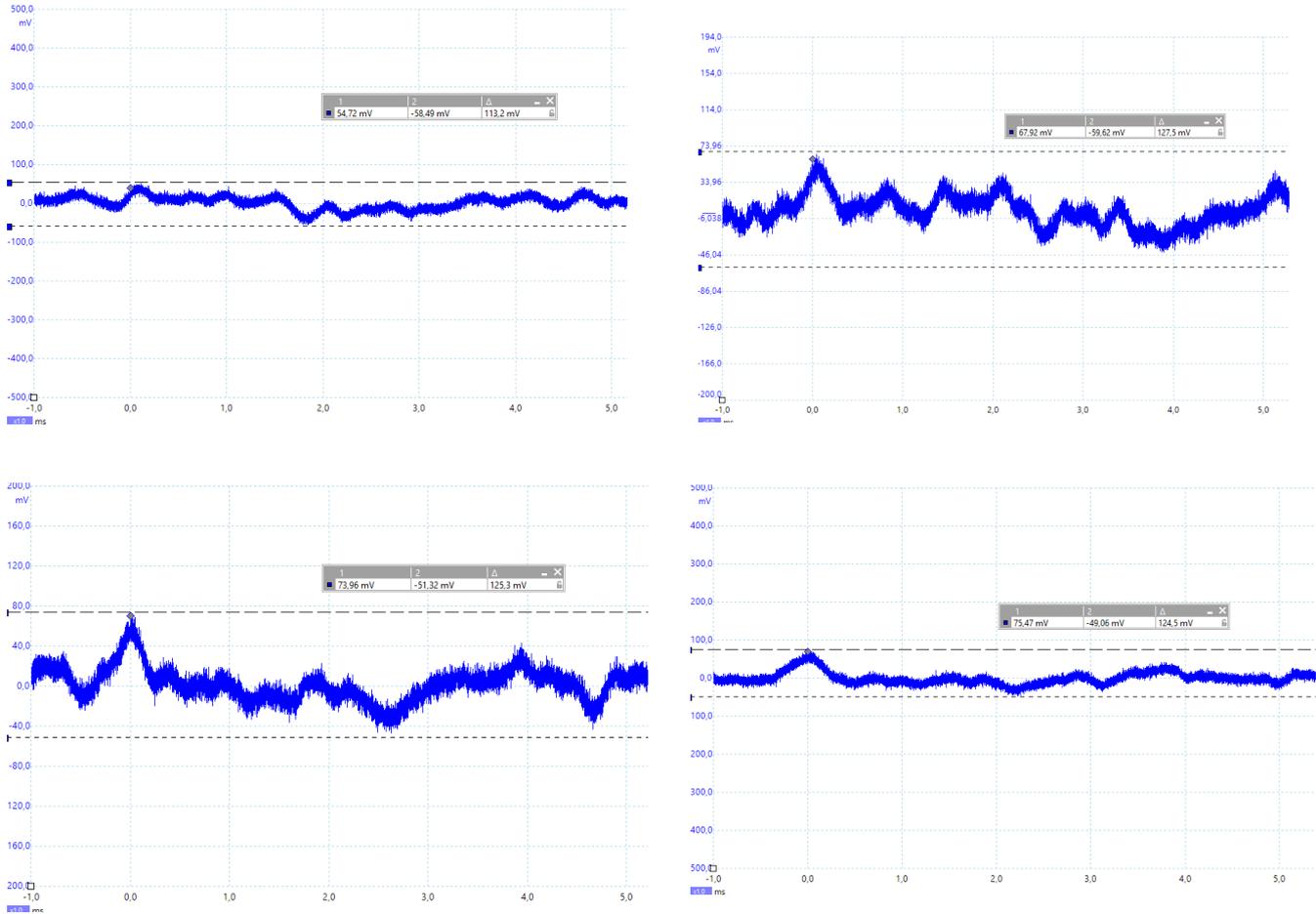


Fig. 7.12. Señales de ruido base del sistema

En las cuatro señales de la figura 7.12 se muestran señales continuas en el tiempo con muy baja amplitud de voltaje considerando que el nivel de amplificación es de 10 veces más que el utilizado durante el monitoreo de los ensayos de rigidez dieléctrica. Estas señales, por sus características cuasi estacionarias, donde no se puede distinguir señales tipo explosión (características de la DPs) son consideradas emisiones base del sistema producto de múltiples eventos no relacionados directamente con la producción de descargas parciales.

El estado del aceite del transformador ensayado cumplió con las expectativas que se tenían desde un principio debido a que como se mencionó al principio del capítulo, el transformador ensayado tiene apenas 3 años de servicio y se utiliza esporádicamente sin ser sometido a carga. Por lo tanto, se esperaba encontrar el aceite en buen estado y no detectar descargas parciales en el mismo de ningún tipo.

CAPITULO 8 - Tratamiento de Aceite y Medio Ambiente

8.1 Introducción

El aumento de la conciencia del medio ambiente y la necesidad de limitar el impacto de la actividad humana da impulso para reemplazar los aceites aislantes convencionales por alternativas ecológicas.

La fuga de aceite de un transformador es una preocupación seria, tanto en términos de medio ambiente como en términos de costos de reparación del equipo. En caso de encontrarse una mancha en el suelo producto de una fuga de aceite de un transformador, no solo deberá repararse la fuga para frenar la pérdida, sino que también deberá iniciarse un tratamiento de remediación del suelo. Este consiste en eliminar físicamente el suelo contaminado e incorporar el suelo nuevo homogenizando la superficie. El material afectado se lleva a tratar a instalaciones adecuadas.

Las pruebas periódicas que se realizan sobre el transformador y en especial al aceite de transformador, ayudan de una manera segura a anticipar cualquier condición negativa del aceite. Esto permite realizar comparaciones entre tasas de decrementos normales y anormales lo que a largo plazo se traduce en una extensión de la vida útil del transformador.

8.2 Seguridad Ambiental

Según la Ley 11720 se entiende por residuo a cualquier sustancia u objeto, gaseoso (siempre que se encuentre contenido en recipientes), sólido, semisólido o líquido del cual su poseedor, productor o generador se desprenda o tenga la obligación legal de hacerlo.

Todos los residuos de aceites de transformador son considerados como residuos especiales. Según el Anexo I de ley 11720 y el decreto 806/97, se contemplan dentro de residuos especiales:

-(Y8) Desechos de aceites minerales no aptos para el uso a que estaban destinadas.

-(Y10) Sustancias y artículos de desecho que contengan o estén contaminados por bifenilos policlorados (PCB), trifenilos policlorados (PCT) o bifenilos polibromados (PBB).

La generación, manipulación almacenamiento, transporte, tratamiento y disposición final de residuos especiales en el territorio de la Provincia de Buenos Aires, quedan sujetos a las disposiciones de la citada Ley, cuyos fines son reducir la cantidad de residuos especiales generados, minimizar los potenciales riesgos del tratamiento, transporte y disposición de los mismos y promover la utilización de las tecnologías más adecuados, desde el punto de vista ambiental.

8.2.1 Recuperación de propiedades físico-químicas y eléctricas del aceite

Las propiedades físico-químicas y eléctricas del aceite degradado o envejecido se pueden recuperar por medio de una purificación o eliminación de la contaminación del aceite del transformador.

A continuación, se resume el proceso de recuperación basado en las siguientes técnicas:

- **Microfiltración**

Es el bombeo de aceite a través de dispositivos especiales (filtros) con deflectores porosos, que retardan las impurezas contenidas en el aceite. Los sistemas de filtración de aceite generalmente contienen una cascada de filtros, en los que la finura de filtración de cada dispositivo siguiente es menor que la anterior. Con la microfiltración se elimina carbón, agua, lodos o cualquier micro partícula sólida que este en suspensión.

- Deshidratación bajo vacío

Se calienta el aceite sabiendo que el punto de ebullición del agua está por debajo del punto de ebullición del aceite, por lo que el calentamiento permite que se extraiga el agua en forma de vapor. Con la deshidratación bajo vacío se consigue reducir las ppm (partes por millón) de agua disuelta en el aceite y a la vez desgasificamos y eliminamos los ácidos más volátiles.

- Desgasificación bajo vacío

Con la desgasificación bajo vacío se eliminan gases como el oxígeno, nitrógeno y otros gases producidos en la degradación del aceite y los materiales aislantes.

La combinación de estas técnicas es lo que hace que el tratamiento efectuado sea altamente eficaz y fiable para la recuperación de las propiedades del aceite, de modo que su comportamiento en el interior del transformador sea el normalizado para su buen funcionamiento de una forma segura.

8.2.2. Proceso de Tratamiento del residuo

En todo momento, previo a la colocación de los sensores y la realización del estudio de EA, se deberá realizar una inspección visual del área de trabajo. La misma deberá estar limpia y exenta de residuos a la vista.

En caso de encontrar una fuga de aceite del transformador, signos de pérdidas en la cuba del mismo, manchas en el suelo cercano a los transformadores, o manchas en columnas de soporte, se deberá informar al supervisor, gerente o dueño del equipo la reglamentación pertinente en lo que respecta a tratamientos de residuos especiales y eliminación de los mismos.

A continuación, se detalla los pasos que deberán seguirse según la Ley 11720 y decreto 806/97 en caso de encontrarse con los problemas descritos.

El responsable de la generación del residuo deberá tratar y/o disponer los residuos generados por su actividad, en sus propias instalaciones. De no ser posible deberán hacerlo en plantas de tratamientos y disposición final que preste servicios a terceros debidamente autorizadas por la Autoridad de Aplicación (Ver Ley 11720 y decreto 806/97). El transporte se efectuará mediante transportistas autorizados indicándole la planta destinataria, en forma precisa en el manifiesto de transporte.

El manifiesto es el documento en el que se detalla la naturaleza y cantidad de los residuos, su origen, transferencia del generador al transportista y de éste a la planta de tratamiento, almacenamiento o disposición final, así como los procesos de tratamiento y eliminación a los que fueren sometidos y cualquier otra operación que respecto de los mismos se realizare.

Dicho manifiesto contendrá como mínimo, sin perjuicio de otros que determine la autoridad de aplicación, los siguientes recaudos:

- Número serial de documento.
- Datos identificatorios del generador, del transportista y de la planta destinataria de los residuos especiales, incluidos los respectivos números de inscripción en el Registro que crea la Ley 11720 en su artículo N°7.
- Descripción y composición de los residuos especiales generados a ser transportados.
- Cantidad total en unidades de peso, volumen y concentración, de cada uno de los residuos a ser transportados, como de los componentes peligrosos que hacen al residuo especial.

- Instrucciones especiales para el transportista y el operador en el sitio de disposición final para casos de emergencia y las instrucciones específicas para la manipulación normal de los residuos declarados.
- Firmas del generador, transportista y del responsable de la planta de almacenamiento, tratamiento y/o disposición final.

Una vez que el residuo ingresa a la planta de tratamiento, la misma emitirá un certificado de tratamiento y disposición final del residuo. En el certificado de tratamiento y disposición final deberá constar el número de manifiesto correspondiente al residuo que se retiró del establecimiento generador y que posteriormente se le efectuó los tratamientos.

También deberá mencionarse en el certificado de tratamiento y disposición final la cantidad de residuo, las características del mismo, el tratamiento realizado y donde se dispuso. Lo anterior demuestra la trazabilidad de la gestión ambiental.

El establecimiento generador de residuos especiales es el responsable de la cuna a la tumba, es decir desde que se genera el residuo especial hasta que se dispone.

Los establecimientos que generen en sus actividades residuos especiales deberán inscribirse en el registro de generadores y/u operadores de residuos especiales del OPDS (Organismo provincial para el desarrollo sostenible).

El certificado emitido por el ente tratador del residuo especial será entregado luego de un lapso de tiempo a la empresa generadora, manifestando la aprobación del sistema de manipulación, transporte, tratamiento, almacenamiento o disposición final del residuo. De esta manera, el generador se asegura que el residuo fue correctamente tratado y/o eliminado por un ente autorizado por el OPDS.

El generador del residuo deberá archivar el certificado de tratamiento y disposición final junto al manifiesto de tratamiento.

Transformadores de PCB

A continuación, se resaltan algunos de los artículos de la resolución N° 093/02 y la resolución N° 1118/02 respecto a equipo con contenido o que haya contenido PCB:

Artículo 1°.- Prohibir la fabricación de PCB's en el ámbito de la jurisdicción de la Provincia de Buenos Aires.

Artículo 2°.- Prohibir el ingreso de PCB's al ámbito de la jurisdicción de la Provincia de Buenos Aires.

Artículo 3°: Prohibir la instalación de Aparatos que contengan PCB's en el ámbito de la jurisdicción de la Provincia de Buenos Aires.

Artículo 6°: Todo poseedor deberá presentar en el plazo máximo de un (1) año a partir de la puesta en vigencia de la presente Resolución ante la autoridad de aplicación o a quien ella delegue, un programa de eliminación o descontaminación de los aparatos que contengan PCB's, con el objetivo que no queden en todo el territorio de la Provincia equipos instalados conteniendo PCB's, al margen de dar cumplimiento en tiempo y forma a lo establecido en la Resolución 2131/01 del Registro Provincial de Poseedores de PCB.

Artículo 7°: En el caso de producirse escapes, fugas o pérdidas de PCB's en cualquier equipo o instalación, el poseedor deberá instrumentar medidas correctivas para reparar el daño ocasionado, y preventivas para disminuir los riesgos hacia las personas y el

medio ambiente, evitando que el incidente o accidente vuelva a ocurrir. Deberá notificar a la Autoridad de Aplicación dentro de las veinticuatro (24) horas de producido el hecho o el evento, debiéndose dentro de los tres (3) días posteriores al hecho presentar un informe expresando los motivos, alcances y consecuencias, como así también las medidas adoptadas y el plan de remediación del medio ambiente propuesto para revertir el daño ambiental ocasionado.

Para los transformadores que hoy en día contienen o han contenido PCB, se deberá realizar la cartelería correspondiente según la resolución N° 618/03. La misma cita en su artículo 2°:

“Todos los aparatos ubicados en el territorio de la Provincia de Buenos Aires que contengan PCB's en una concentración igual o mayor a 2 ppm deberán exhibir la etiqueta siguiente”



Cuyas medidas mínimas deberán ser 350mm x 250 mm de lado.
Fondo: color amarillo.
Letras: color negro.

Los aparatos que posean una concentración menor a las 2 ppm de PCB's deberán exhibir la etiqueta siguiente:



Cuyas medidas mínimas deberán ser 200mm x 200 mm de lado.
Fondo: color amarillo.
Letras: color negro.

8.3 Seguridad Personal

8.3.1 Equipo de Protección Personal

Para el ingreso a la planta se tendrá en cuenta el Equipo de Protección Personal (EPP) según contempla la ley 19587 decreto 351/79 de Higiene y Seguridad en el Trabajo.

A continuación se citan los artículos que aplican a nuestro proyecto y establecen las condiciones adecuadas de Seguridad e Higiene.

Artículo 191. — La ropa de trabajo cumplirá lo siguiente:

1. Será de tela flexible, que permita una fácil limpieza y desinfección y adecuada a las condiciones del puesto de trabajo.
2. Ajustará bien al cuerpo del trabajador, sin perjuicio de su comodidad y facilidad de movimientos.
3. Siempre que las circunstancias lo permitan, las mangas serán cortas y cuando sean largas, ajustarán adecuadamente.
4. Se eliminarán o reducirán en lo posible, elementos adicionales como bolsillos, bocamangas, botones, partes vueltas hacia arriba, cordones y otros, por razones higiénicas y para evitar enganches.
5. Se prohibirá el uso de elementos que puedan originar un riesgo adicional de accidente como ser: corbatas, bufandas, tirantes, pulseras, cadenas, collares, anillos y otros.
6. En casos especiales la ropa de trabajo será de tela impermeable, incombustible, de abrigo resistente a sustancias agresivas, y siempre que sea necesario, se dotará al trabajador de delantales, mandiles, petos, chalecos, fajas, cinturones anchos y otros elementos que puedan ser necesarios.

Artículo 192. — La protección de la cabeza, comprenderá, cráneo, cara y cuello, incluyendo en caso necesario la específica de ojos y oídos. En los lugares de trabajo, en que los cabellos sueltos puedan originar riesgos por su proximidad a máquinas o aparatos en movimiento, o cuando se produzca acumulación de sustancias peligrosas o sucias, será obligatorio la cobertura de los mismos con cofias, redes, gorros, boinas u otros medios adecuados, eliminándose los lazos, cintas y adornos salientes.

Siempre que el trabajo determine exposiciones constantes al sol, lluvia o nieve, deberá proveerse cubrecabezas adecuadas.

Cuando existan riesgos de golpes, caídas o de proyección violenta de objetos sobre la cabeza, será obligatoria la utilización de cascos protectores. Estos podrán ser con ala completa a su alrededor o con visera en el frente únicamente, fabricados con material resistente a los riesgos inherentes a la tarea, incombustibles o de combustión muy lenta y deberán proteger al trabajador de las radiaciones térmicas y descargas eléctricas.

Artículo 195. — Las lentes para anteojos de protección deberán ser resistentes al riesgo, transparentes, ópticamente neutras, libres de burbujas, ondulaciones u otros defectos y las incoloras transmitirán no menos del 89% de las radiaciones incidentes.

Si el trabajador necesitare cristales correctores, se le proporcionarán anteojos protectores con la adecuada graduación óptica u otros que puedan ser superpuestos a los graduados del propio interesado.

Artículo 196. — Cuando el nivel sonoro continuo equivalente supere los valores límites indicados en el Anexo V, será obligatorio el uso de elementos individuales de protección auditiva, sin perjuicio de las medidas de ingeniería que corresponda adoptar. La protección de los oídos se combinará con la de la cabeza y la cara, por los medios previstos en este capítulo.

Artículo 197. — Para la protección de las extremidades inferiores, se proveerá al trabajador de zapatos, botines, polainas o botas de seguridad adaptadas a los riesgos a prevenir. Cuando exista riesgo capaz de determinar traumatismos directos en los pies, los zapatos, botines, o botas de seguridad llevarán la puntera con refuerzos de acero.

Si el riesgo es determinado por productos químicos o líquidos corrosivos, el calzado será confeccionado con elementos adecuados, especialmente la suela y cuando se efectúen tareas de manipulación de metales fundidos, se proporcionará al calzado aislación con amianto.

Artículo 198. — La protección de los miembros superiores se efectuará por medio de mitones, guantes y mangas, adaptadas a los riesgos a prevenir y que permitan adecuada movilidad de las extremidades

Artículo 200. — En todo trabajo en altura, con peligro de caídas, será obligatorio el uso de cinturones de seguridad. Estos cinturones cumplirán las recomendaciones técnicas vigentes e irán provistos de anillas por donde pasará la cuerda salvavidas, las que no podrán estar sujetas por medio de remaches. Los cinturones de seguridad se revisarán siempre antes de su uso, desechando los que presenten cortes, grietas o demás modificaciones que comprometan su resistencia, calculada para el peso del cuerpo humano en caídas libre con recorrido de 5 metros.

Queda prohibido el empleo de cables metálicos para las cuerdas salvavidas, las que serán de cáñamo de manila o de materiales de resistencia similar. Se verificará cuidadosamente el sistema de anclaje y su resistencia y la longitud de las cuerdas salvavidas será lo más corta posible, de acuerdo a las tareas a realizar.

8.3.2 Distancias de Seguridad

Las distancias de seguridad serán respetadas según se muestra a continuación la tabla transcrita de la ley 19587 decreto 351/79 de Higiene y Seguridad en el Trabajo y de la resolución 592/04 “Reglamento para la ejecución de trabajos con tensión en instalaciones eléctricas mayores a 1 kV”.

Tabla 8.1 Niveles de tensión y distancias mínimas. Ley 19587 decreto 351/79-

Niveles de tensión	Distancias mínimas
de 0 a 50 Volt	Ninguna
más de 50 V hasta 1 KV.	0,80 m.
más de 1 KV hasta 33 KV	0,80 m (1)
más de 33 KV hasta 66 KV	0,90 m (2)
más de 66 KV hasta 132 KV	1,50 m (2)
más de 132 KV hasta 150 KV	1,65 m (2)
más de 150 KV hasta 220 KV	2,10 m (2)
más de 220 KV hasta 330 KV	2,90 m (2)
más de 330 KV hasta 500 KV	3,60 m (2)

Supuestos

Únicamente en el caso que las distancias mínimas de seguridad no puedan respetarse dentro del lugar de trabajo, se deberá proceder a la desconexión de tensión para trabajar en condiciones seguras y no violar las distancias mínimas establecidas según la tabla 8.1.

8.3.3 Colocación de sensores

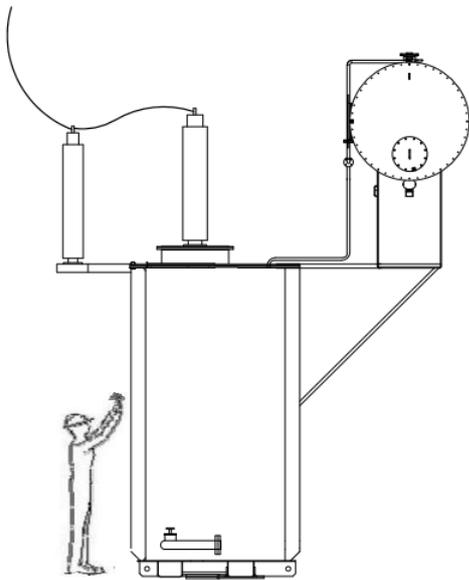
En todo momento previo a colocar el sensor se estudiara la zona de trabajo y las distancias de seguridad para trabajar en condiciones correctas de operación.

Los sensores se colocaran de ser necesario cualquiera de las 5 caras de la cuba del transformador (exceptuando la cara superior que contiene los bornes del transformador), y en todos los casos se respetaran las distancias mínimas de seguridad establecidas.

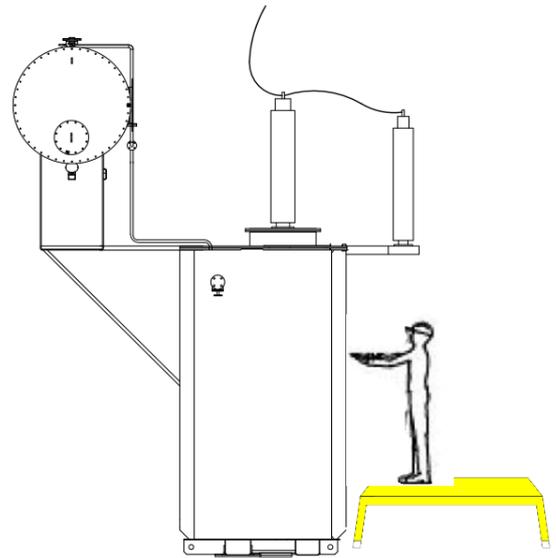
La cuba del transformador deberá estar puesta a tierra (en algunos casos posee doble puesta a tierra con cables de acero por seguridad ante vandalismo).

Una vez colocados los sensores piezoeléctricos en la cuba del transformador, los cables se ataran con cinta en el poste de soporte del transformador por seguridad.

Siempre se deberá procurar que la cabeza y el cuerpo del personal que coloca los sensores este por debajo de sus manos al momento de colocar los sensores, de esta manera se evitara incidentes en el lugar de trabajo (ver figuras).



✓ **Correcto**



X Incorrecto

En caso que el transformador esté en altura, se deberá utilizar una escalera (la misma deberá ser de fibra aislante) o un taburete. A su vez se deberán tener los permisos correspondientes para trabajos en altura.

CAPITULO 9 - Estudio de Factibilidad Técnica y Económica

9.1 Introducción

En el presente capítulo se estudiara la factibilidad económica del proyecto y su implementación en la industria. Se considerarán los posibles servicios de EA en los transformadores de medias y grandes potencia de las industrias cercanas a la zona de Zarate - Campana y alrededores (Ciudades en un radio máximo de aprox. 200 km de Campana).

El análisis económico se realizará estudiando 2 posibles escenarios a través de la Facultad Regional Delta (FRD). En el primer escenario se realizara un cálculo estimativo de la inversión inicial que debe contemplarse en caso de realizar el proyecto en conjunto con el Departamento de Ingeniería Eléctrica y en el segundo escenario se contemplara trabajar en conjunto con el Laboratorio de EA.

9.2 Costos de implementación en industria

En el primer escenario se deberá evaluar una inversión inicial que contemple todos los equipos de trabajo, mientras que en el segundo escenario el coste total de la inversión total se reducirá por tener algunos elementos del equipo de EA y personal capacitado para realizar los ensayos.

En el Anexo C se detallan 2 presupuestos de sistemas de medición de EA.

Se contemplara dentro de la inversión inicial una capacitación de EA de 3 niveles que deberán realizarse en el exterior. Cada nivel de capacitación otorga un certificado de EA donde mayor nivel, mayor será la facultad e incumbencias para realizar trabajos de EA.

Cada nivel se estima en U\$s 3.000, incluyendo traslado al país donde se dicta el curso, viáticos y capacitación. La capacitación se realizara 8x5, es decir 8 horas en 5 días, cumpliendo en total 40 horas semanales. A su vez se deberán cumplir con una cantidad de horas de práctica de EA determinada para certificar el nivel. Las mismas pueden justificarse con trabajos realizados previamente o realizarse en el exterior.

En la tabla 9.1 se detallan las incumbencias y/o facultades que puede desarrollar una persona según corresponda el nivel.

Tabla 9.1

Nivel de EA	Incumbencias
1°	Permite realizar el montaje experimental del ensayo y la realización del ensayo completo si esta supervisado por un nivel 2°. Ayudar o asistir en un ensayo de EA.
2°	Permite realizar ensayos completos y análisis primarios de los resultados.
3°	Escribe el procedimiento del ensayo a seguir. Es Responsable de analizar los resultados y dictar un veredicto del problema en función de los datos del ensayo. Firma los documentos de ensayos realizados.

Supuestos para el análisis de los escenarios 1 y 2

- Se toma un periodo de trabajo 3 años y se realiza un análisis mensual de 36 periodos.
- Se considera que se tomara un 25% del mercado según el análisis del relevamiento en las industrias de las zonas según tabla 7.3 (Ver anexo C).

- Se dividirá el año en 4 trimestres. Esto brinda una totalidad de 5 transformadores por trimestre para el primer año.
- Se considera que luego del primer año el negocio se extiende 1 transformador por trimestre.
- El costo del servicio variara en función del tamaño y potencia del transformador, es decir, a mayor tamaño y potencia, mayor cantidad de sensores de EA a utilizar y mayor costo del análisis del equipo. En base a lo anterior y realizando un promedio de los tamaños de los equipos y la cantidad de canales, se estima que el costo por canal de EA es aproximadamente \$10.000 (diez mil pesos) + honorarios con valor inicial \$15.000 (quince mil pesos) + viáticos (almuerzo) + aportes (se considera 40% de la mano de obra) + seguro con valor inicial de \$1.100 (mil cien pesos) + insumos varios (cables, conectores, acoplante para sensor-cuba, etc.) estimado en un valor de \$5.000 (cinco mil pesos).
- Lo anterior determina que el ingreso por venta del servicio promedio es igual a \$100.000 (cien mil pesos) por cada trabajo a realizar.
- Se considera que se pueden realizar hasta 3 transformadores por mes si así se demandase, y los gastos fijos de egresos (honorarios, seguro, aportes, etc.) no variaran por la cantidad de transformadores realizados al mes.
- Se considera un valor inicial por ingreso de ventas de \$100.000 (cien mil pesos). Se contemplara un ajuste por inflación del 40% anual durante los tres años de estudio. El porcentaje de inflación se distribuirá mensualmente y equitativamente. En el estudio de flujo de caja del proyecto se tomara una distribución de inflación de 3,63% mensual.
- Se considerará que la Facultad Regional Delta se financiara a través de producidos propios y subsidios del estado que se otorgan para la realización de proyectos. El dinero que la FRD deberá desembolsar inicialmente será utilizado para la capacitación de EA y compra de equipos de medición. Al cabo de 2 años se habrá reintegrado por completo a la facultad la misma cantidad de dinero utilizado en la inversión inicial con el ajuste de inflación correspondiente, de tal manera que con ese dinero pueda realizarse la capacitación y la compra de los equipos de EA. Una vez finalizada la devolución de dinero a la facultad, los equipos de EA pertenecerán al departamento de eléctrica.
- Se considera que la competencia en el mercado por medio de esta técnica es muy baja debido a la falta de equipos de EA y a los altos niveles de capacitación de personal requeridos para la correcta aplicación de la técnica.

9.2.1 Escenario N°1 Inversión inicial financiada por el departamento de Eléctrica de la Facultad Regional Delta.

En este proyecto, la inversión inicial para el departamento de eléctrica requiere la compra de los equipos de EA para medir descargas parciales, una capacitación de personal de 3 niveles estandarizados bajo ISO 9712 de EA y 1 computadora adicional para análisis y procesamiento de datos con software avanzado para poder correr los programas.

En la tabla 9.2 En el siguiente cuadro se resumen los gastos que se deben considerar como inversión inicial personal para realizar el proyecto en caso de realizarlo a través del Depto. de Eléctrica.

Tabla 9.2. Inversión inicial Lab. Eléctrica

Inversión Inicial	Costo [\\$]
Compra de equipos de EA	3.150.000
Capacitación de EA	570.000
1 Computadora	30.000
Total	3.750.000

Se estimara un valor de U\\$s 50.000 para la inversión en sistemas de medición de EA, con un valor dólar a \\$63 ARS. En los U\\$s 50.000 se contempla aproximadamente un 10% de impuestos de importación, y no se contempla el Impuesto al Valor Agregado (IVA), ya que el mismo estará contemplado en los trabajos que se efectuaran posteriormente y por ende, se recuperará el porcentaje pagado.

En la tabla 9.3 (Ver en Anexo C) se muestra un relevamiento realizado de los transformadores más importantes de las industrias cercanas a la zona de Zarate – Campana y transformadores de ciudades alrededores con sus valores de potencia.

9.2.2 Escenario 2 Inversión Inicial para Laboratorio de EA de la Facultad Regional Delta

Para el Laboratorio de EA de la Facultad, se tendrán en cuenta las mismas industrias y campos de aplicación contemplados en la inversión inicial para el Depto. de Eléctrica de la Tabla 9.3 en Anexo C.

En la tabla 9.4 se resumen los gastos que se deben considerar como inversión inicial personal para realizar el proyecto en el caso del Laboratorio de EA de la FRD.

Tabla 9.4. Inversión inicial para Lab. EA.

Inversión Inicial	Costo [\\$]
Compra de equipos de EA	530.000
Capacitación de EA	190.000
1 Computadora	30.000
Total	750.000

Se realizara un solo nivel de capacitación ya que hay personal capacitado para realizar la tarea de EA (U\\$s 3.000).

Se contara con la fuente y varios equipos de medición de EA. Únicamente se considerará la compra de 12 sujetadores magnéticos para colocar los sensores en la cuba del transformador, y la compra de 12 sensores piezoeléctricos con preamplificador incluido (U\\$s 8.412, valor calculado por presupuesto N°1 en Anexo C).

9.3 Resultados

Escenario N°1

Con todos los supuestos realizados y el análisis con los futuros potenciales clientes de la zona, se realiza el Valor Actual Neto (VAN) y Tasa Interna de Retorno (TIR) para determinar la viabilidad del proyecto y determinar si es factible invertir o no llevarlo a cabo. (Ver Excel adjunto “Cash Flow Depto. Eléctrica”).

Al cabo de 3 años se obtiene un VAN positivo y una TIR de 4,7% lo que indica que el proyecto es rentable. La amortización de la inversión inicial llevara 21 meses, obteniendo en el mes N°22 valores de remuneración positivos.

Escenario N°2

Con todos los supuestos realizados y el análisis con los futuros potenciales clientes de la zona, se realiza el VAN y la TIR para determinar la viabilidad del proyecto y determinar si es factible o no invertir para llevarlo a cabo. (Ver Excel adjunto “Cash Flow Lab. Acústica”).

Al cabo de 3 años se obtiene un VAN positivo y una TIR de 17% lo que indica que el proyecto es rentable. La amortización de la inversión inicial llevara 8 meses, obteniendo en el 9 mes valores de remuneración positivos.

9.4 Conclusión

Si bien el escenario N°2 es más rentable, el caso de mayor interés para la Facultad es el escenario N°1 debido a que el Depto. de Eléctrica aumentaría su equipamiento y se manejaría de manera independiente. En este escenario la amortización de la inversión inicial se realizará en 2 años. Esto indica que el proyecto es viable y rentable, ya que a un futuro de corto plazo se recuperará la inversión inicial y luego se comenzará a tener ganancia.

Conclusiones Finales

El método de análisis de rigidez dieléctrica mostró que es un método eficaz y sencillo de aplicar (siempre y cuando se cuente con los equipos y los procedimientos correspondientes) para verificar el estado de aislación que brindan estos aceites dentro de los transformadores. La metodología de aplicación debe ser de estricta implementación para disminuir la varianza de los resultados debido a que se considera que la ocurrencia de las descargas parciales y ruptura de capacidad aislante es un fenómeno probabilístico con características Markovianas.

En base a los resultados obtenidos se pudieron clasificar tres tipos de aceites que visiblemente estaban en las mismas condiciones, pero con diferentes grados de deterioro, bueno $>$ a 124 kV, intermedio $>$ 80 kV, malo $<$ 55 kV. Una vez establecidos los protocolos de seguridad y procedimientos correspondientes, este ensayo END se realizó en cuestión de horas, dando un resultado de la condición dieléctrica del fluido estudiado.

El monitoreo mediante la técnica de END de emisión acústica permitió analizar el desarrollo de todos los ensayos de rigidez dieléctrica y caracterizar en tiempo, amplitud, espectro de frecuencias y tasa de aparición de las diferentes descargas que se produjeron durante su ejecución.

Se observó que las señales de las descargas parciales (RA, DPac, DPaire) se encontraban por sobre la emisión de ruido ambiente y por lo tanto pudieron ser detectadas. A su vez estos niveles de ruido se comprobaron que dependen de manera muy importante de la escala de voltaje utilizado en la cadena de medición de la EA.

Las señales de RA mostraron ser las de mayor amplitud, superando los 40 Vpp en base a la cadena de medición establecida. Estas señales presentan varias emisiones consecutivas asociadas al mismo evento de descarga eléctrica. Luego de las señales tipo explosión de máxima amplitud y de corta duración (aprox 16 μ s), se presentan asociadas a una emisión cuasi estacionaria de mayor tiempo de duración y mucha menor amplitud que posiblemente pueda estar relacionada con algún efecto posterior a la descarga. Las descargas tipo DP ac tienen una amplitud intermedia de aproximadamente 30 Vpp. Los tiempos de duración de estas señales son comparables con las de RA (aprox 20 μ s) y presentan una única señal de EA por descarga. Por último las descargas tipo DP en aire resultaron ser las de menor amplitud (aprox 200 mV) y tiempo de duración (0,5 μ s) por lo que su identificación respecto a las otras resultó más sencilla. Adicionalmente su tasa de aparición dentro de la ventana de grabación fue mucho mayor que en los otros tipos de descargas parciales. Se determinó que la tasa de EA de estas descargas (Dp aire) se incrementa al aumentar los valores de tensión. El parámetro de tasa de EA es un indicador muy importante en los ensayos de transformadores reales, debido a que permiten inferir el nivel de criticidad de la falla.

Este tipo de clasificación resultó de utilidad a la hora de evaluar los diferentes comportamientos y la energía involucrada en cada uno de los eventos. Esto es de crítica importancia para establecer los parámetros de la cadena de medición y determinar eventualmente el tipo de defectología que se está produciendo en un transformador real. Para todos los casos estudiados se observó que las mayores componentes en el espectro de frecuencia se encontraron en una banda de valores inferiores a 200 kHz, estando en acuerdo con los textos bibliográficos analizados. Esto permite seleccionar sensores de

EA sintonizados en estas frecuencias específicas de manera de aumentar la sensibilidad del sistema para la detección de descargas de muy pequeña amplitud.

Se instrumentó el transformador Nro.2 de 13.2 kV del laboratorio de eléctrica de la UTN-FRD. Luego de un monitoreo de 2 hs de duración se estableció que el mismo se encuentra en buen estado de funcionamiento debido a la carencia de emisiones tipo explosión que podrían llegar a indicar algún tipo de descarga parcial. Esto confirmó el hecho de que este transformador tiene muy poco uso en servicio y solo cuenta con tres años de instalación. De manera paralela la realización del ensayo permitió establecer un registro de las señales de base (ruido de base) del transformador en buen estado. Esto permite crear una base de datos de registro que posibilitará establecer los parámetros de comparación para futuras mediciones y realizar un seguimiento en el tiempo del estado del presente equipo.

En base a la experimentación realizada se pudo establecer que la instrumentación mediante EA es relativamente sencilla desde el punto de vista de colocar los sensores por fuera de los equipos a monitorear. Si bien por cuestiones de seguridad los montajes se realizaron en ausencia de tensión, este procedimiento puede utilizarse en equipos con y sin tensión, lo cual implica un ahorro temporal y económico para la industria en comparación con el método químico DGA. Este último, es muy utilizado en las industrias pero requiere desconectar el equipo para tomar la muestra de gases dentro de la cuba del transformador y muestras de aceite para ensayar. Otra ventaja en comparación con la metodología DGA es que la técnica de EA permite posicionar la fuente que emite el pulso de onda elástica. Esto representa una ventaja a la hora de analizar el componente a reparar ya que se puede estimar con antelación el o los componentes que están deteriorados.

La cadena de medición de EA puede ser configurada de varias maneras para obtener diferentes niveles de sensibilidad siempre y cuando el ruido ambiente no sea un limitante. Esto permite monitorear descargas de muy pequeña amplitud y detectar fallas tempranas en equipos de base en los cuales se pueda establecer un monitoreo continuo de la condición. Posteriormente el análisis detallado de la información permite clasificar los tipos de emisiones y asociarlo a diferentes eventos dentro del equipo monitoreado. El método de EA no arroja valores cuantitativos del estado del transformador como algunos otros existentes, es de mucha importancia establecer patrones de comparación y evaluar la evolución en el tiempo del componente para inferir la vida útil o el nivel de solicitación restante del equipo.

El análisis técnico –económico mostró la viabilidad del proyecto donde en un plazo de tres años de duración, la inversión comienza a arrojar valores positivos de remuneración y viabilidad al cabo del segundo año. Esto determinó que la inversión inicial que contempla los equipos de EA y la capacitación personal se amortizara en poco tiempo, de manera que el proyecto se considera rentable y podría implementarse en el país. Adicionalmente se cuenta con la ventaja que esta técnica de EA presenta muy baja competencia a nivel nacional, de manera que en poco tiempo se puede ganar parte del mercado y crecer en este tipo de método. Esta ventaja es producto del relativo alto costo de los equipos y de la alta capacitación y práctica necesaria para la aplicación correcta de la técnica de EA

Trabajos a futuro y posibles líneas de investigación:

- En base a los trabajos realizados para el presente proyecto final, el laboratorio de Ing. Eléctrica de la UTN-FRD cuenta con una cuba normalizada y los procedimientos correspondientes para la realización de ensayos de rigidez dieléctrica. Por esta razón

este tipo de práctica podría ser implementada como práctica estándar para la carrera, conjuntamente con la información bibliográfica y publicaciones que se dejan a disposición.

- Continuar con el monitoreo de los transformadores de la facultad con el fin de evaluar su estado a través del tiempo y monitorear su evolución.
- Considerar la implementación de un PID de la carrera de Ing. eléctrica en un tema relacionado a la implementación y aplicación de esta técnica para el estudio de equipos de gran potencia de la región.
- Evaluar la posibilidad de aplicar la técnica de EA a un transformador de mayor potencia como los fabricados en industrias de la zona o los pertenecientes a alguna planta de producción de energía en esta región.

CAPITULO 10 - Referencias y Bibliografía

- [1] G. Ch. Lichtenberg, “Novi Commentarii Societatis Regiae Gottingae”, tom 8, 1777.
- [2] J. C. Maxwell, A Treatise on Electricity and Magnetism, Clarendon Press, Oxford (1873).
- [3] H Hertz, Hertz's Miscellaneous Papers. Macmillan, London, 1896.
- [4] H. Schering, Bridges for Loss Measurements, Report on the Activities of the Physical-Technical Institute of Realm, Germany, 1919.
- [5] A. Schwaiger, about the discharge processes on insulators. Rosenthal-Mitt. H. 6 (1925).
- [6] A. Dennhardt, Cause and measurement of the high-frequency interference capability of insulators (1935).
- [7] W. L. Lloyd, E. C. Starr, “Investigation of the Alternating Current Corona with the Cathode-ray Oscilloscope”, ETZ 49, 1935.
- [8] A. Dennhardt, Cause and Measurement of the High-Frequency Interference of Isolators (1935).
- [9] W. L. Lloyd; E.C Rigid, Investigation of the AC corona with the cathode ray oscillograph (1928).
- [10] T.W. Dakin; P.J. Malinaric, A capacitive bridge method for measuring integrated corona-charge transfer and power loss per cycle. Trans AIEE PAS 79 (1960).
- [11] N. Izeki; F. Tatsuta, Three types of partial discharges in electrical insulation. IEEE Intern. Symp. Montreal (1984).
- [12] A. N. Arman, A. T. Starr, “The Measurement of Discharges in Dielectrics”, J. IEE 79 pp. 67-81, 88-94. 1936.
- [13] G. Mole, portable discharge detector. CIGRE-Session, Paris (1954).
- [14] G. Mole, Basic characteristics of corona detector calibrators. IEEE (1970).
- [15] C.A. Bailey, A study of internal discharges in cable insulation. IEEE Paper No. 31, (1966).
- [16] Boggs, S., & Fujimoto, N. (1984). Techniques and Instrumentation for Measurement of Transients in Gas-Insulated Switchgear. IEEE Transactions on Electrical Insulation.
- [17] S.A. Boggs; G.C. Stone: Fundamental limitations in the measurement of corona and partial discharge. IEEE (1982).

- [18] H. Okamoto, H. Kenji, "Partial Discharge Tests and Noise Suppression of 500 kV Transformers", IEEE Summer Power Conference, Vancouver, 1973.
- [19] I. A. Black, "A Pulse Discrimination System for Discharge Detection in Electrically Noisy Environments", Paper 3.2-02, 2nd. ISH Zurich, 1975.
- [20] E. Lemke, A new method for PD measurement of polyethylene insulated power cables. Milan (1979).
- [21] NEMA 107: Methods of Measuring Radio Noise, first edition (1940).
- [22] NEMA 107 (R 1971): Methods of Measurement for Radio Influence Voltage (RIV) of High-Voltage Apparatus, second edition (1964).
- [23] IEC-Publication 1: Specification for CISPR radio interference measuring apparatus for the frequency range 0.15 Mc/s to 30 Mc/s (1961).
- [24] CISPR 16-1: Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods – Part 1: Radio disturbance and immunity measuring apparatus (1993).
- [25] IEC-Publication 270: Partial discharge measurement, first edition (1968).
- [26] IEC Publication 270: Partial discharge measurement, second edition (1981).
- [27] IEC 60270: High-voltage test techniques – Partial discharge measurements, third edition (2000).
- [28] IEC 62478: High-voltage test techniques – Measurement of partial discharge by electromagnetic and acoustic methods.
- [29] Common parametrizations of electron transport, collision cross section, and dielectric strength data for binary gas mixtures. R. J. Van Brunt
- [30] Stochastic Properties of Partial-discharge Phenomena. Van Brunt 1991
- [31] Introduction to gas discharge, Plasma Sources Sci. Technol. 9 (2000) 517–527. Printed in the UK, N St J Braithwaite, 1999.
- [32] High Voltage engineering, second edition revised and expanded, Mazen Abdel Salam.
- [33] Partial Discharge Signatures of Defects in Insulation Systems Consisting of Oil and Oil-impregnated Paper. Mohamad Graffarian Niasar. Licentiate Thesis Stockholm, Sweden 2012.
- [34] Corona in Oil as a Function of Geometry, Temperature and Humidity M. Ghaffarian Niasar, H. Edin KTH Electrical Engineering, Teknikringen 33, SE-100 44 Stockholm, Sweden.

[35] (Libro técnico Schneider) Publicación Técnica Schneider: PT-069. Edición: Noviembre 2000.

[36] <https://globecore.com/es/transformer-oil-deterioration.html>

[37] Iron Particle Effect on the Breakdown Strength of Insulating Oil at AC and DC Voltages, 2017 Electrical Insulation Conference (EIC), Baltimore, MD, USA, 11 - 14 June 2017.

[38] Paper Transformer Failures, Causes & Impact, Shayan Tariq Jan, Raheel Afzal, and Akif Zia Khan International Conference Data Mining, Civil and Mechanical Engineering (ICDMCME'2015) Feb. 1-2, 2015 Bali (Indonesia).

[39] Catálogo: Micafil Transformer Bushings AirRIP / RTKF 24 – 550 kV

[40] Jornadas Técnicas Bornas, ABB Lisboa Julio 2013

[41] Blogspot de imseingenieria 06/2016.

[42] Estudio de descargas parciales en transformadores de distribución, Corporación Universitaria Autónoma de Occidentes, División de Ingeniería, Programa de Ing. Eléctrica 1992.

[43] Failure analysis of transformers, Willian H. Bartley P.E, The Hartford Steam Boiler Inspection and Insurance Co. Hartford CT.

[44] Trabajo de Investigación Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Morelia, Luis David Sánchez 12/2016

[45] <https://globecore.com/es/cooling-of-transformer.html>

[46] Fundamentos de la Emisión Acústica. Autor Martin P Gómez. 2012.

[47] Enciclopedia CEAC de electricidad. Materiales Electrotécnicos.

Procedimientos

Procedimiento Anexo A (Reglamento de Laboratorio y Norma Internacional IEC 156-ASTM d-1816)

- Previo a la realización del ensayo y como condición necesaria deberán de estar al menos 2 responsables del laboratorio de Eléctrica para accionar el equipo de rigidez dieléctrica y realizar la práctica.
- Colocar taburete y acomodar todo lo que respecta a la ubicación de la cuba, electrodos y equipos de medición dentro del recinto de media tensión. En todo momento de acondicionamiento del ensayo se deberá trabajar SIN tensión y procurando que no exista posibilidad de alimentar el recinto.
- Enlazar cable de tierra en el extremo de la pértiga para futura utilización pos-práctica.
- El espacio entre electrodos deberá ser $2.5\text{mm} \pm 0.05\text{mm}$.
- Los electrodos deberán ser examinados frecuentemente por picaduras o desgastes producto de las descargas parciales, y en caso de observar daños deberán ser reemplazados inmediatamente.
- Los limpieza de los electrodos deberá realizarse de la siguiente manera:
 - Todas las superficies deberán limpiarse con una adecuada cantidad de solvente volátil y permitir que el solvente se evapore.
 - Pulir con pasta fina (por ejemplo la que utilizan los joyeros) o algún papel fino para acabados de pulidos.
 - Luego de pulir, limpiar con algún derivado de petróleo (reactivo de calidad), y luego con acetona.
 - Colocar los electrodos en la cuba, llenar con muestra del líquido aislante limpio que se va a ser testado e incrementar la tensión hasta producir la ruptura 24 veces.
- Al momento de realizar la práctica, la temperatura del líquido y del aire no deberán diferir por más de 5°C , siendo la temperatura de referencia del líquido $20^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$.
- Colocar aceite a ensayar dentro de la cuba experimental.
- El volumen de la aceite en la cuba experimental deberá estar comprendido entre 350 ml y 600 ml.
- Inmediatamente luego de introducir el líquido en la cuba, éste deberá revolverse varias veces para asegurarse que la distribución de impurezas que pueda existir sea lo más homogénea posible. Evitar la formación de burbujas en el líquido.
- Medir y anotar la temperatura del aceite al realizar el ensayo.
- Leer manual de equipo de rigidez dieléctrica.
- Chequear fusible del equipo de rigidez dieléctrica
- Procurar que no haya nadie dentro del recinto de medición. Conectar equipo de rigidez dieléctrica.
- La primera aplicación de voltaje deberá iniciar aproximadamente 5 minutos luego del llenado de la cuba. Volver a cotejar que no existan burbujas en el aceite.
- La velocidad de incremento de tensión deberá ser $2\text{kV s}^{-1} \pm 0,2\text{kV s}^{-1}$.
- Se deberán realizar 6 mediciones con el mismo aceite y en las mismas condiciones, respetando un tiempo de 2 minutos entre cada descarga. Luego de cada descarga se deberá tocar con la punta de la pértiga conectada a tierra toda parte del circuito que haya estado sometido a tensión para evitar posibles descargas remanentes y luego se procederá a remover el aceite por medio de una varilla de cristal bien seca.
Una vez realizada las 6 mediciones, la primera medición se descartara, y se tomara el promedio de valores de ruptura dieléctrica de las 5 restantes para obtener un valor de rigidez dieléctrica.

- Se deberá realizar un cálculo de varianza según la norma ASTM d-1816 (adjunta) para determinar si el promedio de todos los valores obtenidos en las mediciones de rigidez dieléctrica es válido. La norma establece que se deberán tomar 5 mediciones de rigidez dieléctrica del aceite y calcular el promedio de las muestras y la desviación estándar a través de las siguientes ecuaciones:

$$\bar{X} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 X_i \quad ; \quad S = \sqrt{\frac{1}{4} [\sum_{i=1}^5 X_i^2 - 5\bar{X}^2]}$$

- Si $S/\bar{X} > 0.1$ la desviación estándar de los valores obtenidos es excesiva, por lo que no puede tomarse como valor promedio del rigidez dieléctrica.
- En caso de no verificar el ítem anterior, la norma ASTM d-1816 establece tomar 5 valores más de rigidez dieléctrica del aceite y quedarse con el valor promedio de las 10 mediciones.
- Una vez obtenido el valor promedio de rigidez dieléctrica, se utilizará la siguiente tabla (Fig. 1) para obtener el valor de rigidez dieléctrica en kV/cm.

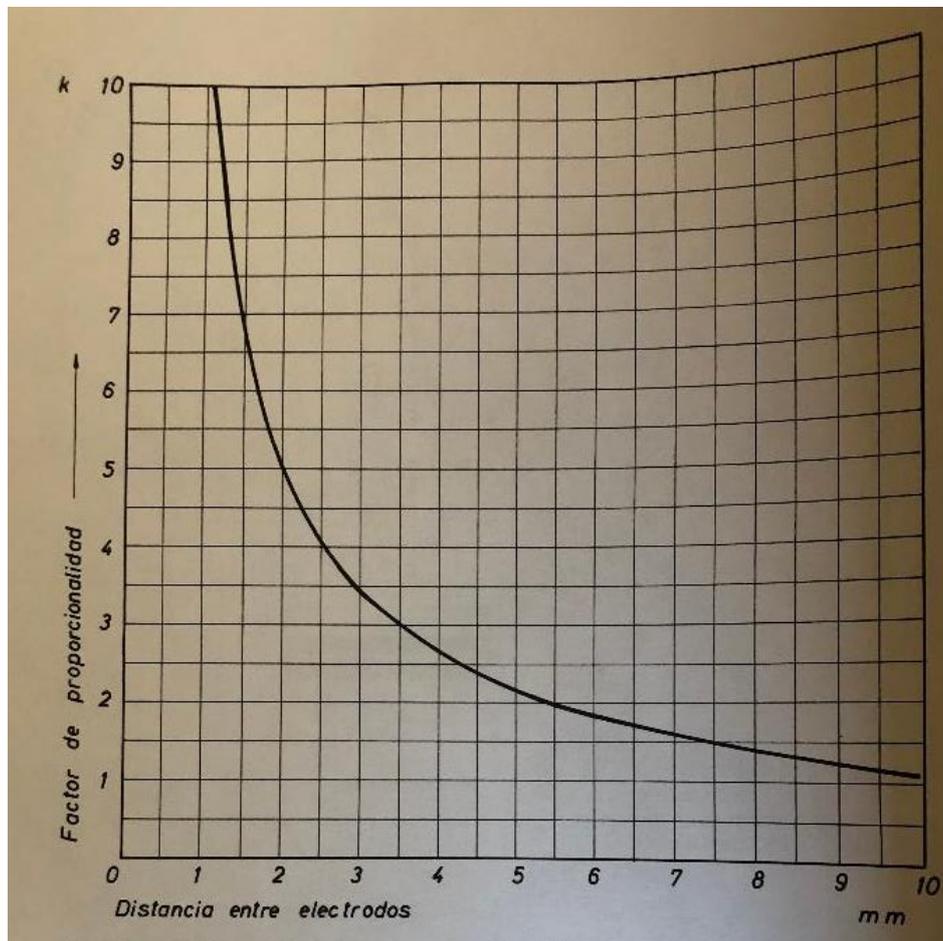


Fig. 1 Valores del factor de proporcionalidad k, en función de la distancia entre electrodos, para la determinación de la rigidez dieléctrica de un aceite mineral.

En la curva de la figura 1, se busca el factor que corresponde a la distancia “a” entre electrodos. La rigidez dieléctrica se deduce de la fórmula:

$$\xi = k \times U$$

Expresándose ξ en kV/cm y U en kV.

Por ejemplo, si la distancia entre electrodo es $a=3\text{mm}$ el factor k vale 3.5. Si se trata de una descarga de 30 kV, la rigidez dieléctrica es:

$$\xi = 3.5 \times 30 = 105 \text{ kV/cm}$$

El aceite nuevo debe tener una rigidez dieléctrica no inferior a 125 kV/cm. Después de cierto periodo de funcionamiento, el aceite mineral aislante debe renovarse o limpiarse cuando su RD descienda a valores inferiores a 80 kV/cm.

Procedimiento Anexo B (Seteo de equipos de EA)

- Ordenar todos los instrumentos de Emisión Acústica [EA] y determinar la mejor ubicación de cada uno. Todo trabajo de conexión de equipos de EA deberá realizarse SIN tensión.
 - Conectar fuente de EA a preamplificador.
 - Conectar el extremo de entrada BNC del sensor piezoeléctrico al preamplificador a través de un cable BNC y adherir el sensor piezoeléctrico con acoplante a algún lugar de la cuba.
 - Conectar Picoscope a computadora por doble cable USB.
 - Encender la fuente de EA
 - Verificar que el programa responda a impulsos dados en el sensor y capte señales.
 - Adecuar los parámetros del software de la siguiente manera:
 - Rango de tensión: $\pm 10V$ o $\pm 20 V$
 - Eje horizontal: 1ms/div
 - Frecuencia de muestreo: 15 Mega Samples [MS]
 - Cantidad límite de señales: 800
 - Modo de disparo: Flanco ascendente
 - Disparo de Trigger: 20mv para descargas de ruptura dieléctrica. 2 mv para descargas parciales sin ruptura en aceite o aire.
 - Comienzo de Trigger: 10%
 - Cantidad de Bits: 16 bits.
 - Modo de captar señal: Repetición
- Pantalla de ejemplo
- Una vez que se efectuó la chispa bajar la perilla al mínimo y desconectar el equipo
- Guardar el resultado del software en formato psdata para luego ser analizados.
- Ante cualquier inconveniente que podría ocurrir, desconectar rápidamente el equipo de rigidez dieléctrica e informar a supervisores lo ocurrido.

Anexo C – Datos para análisis económico

Presupuesto N°1

Cant. de Piezas	Descripción	Valor Unitario [EUR]	Valor Total [EUR]
1	<p>AMSY-6 chasis principal con 19 lugares para canales de EA y posibilidad de extensión a 38. Incluye:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Panel de control con 4 entradas parametrizadas y 17 luces Leds de señalización. • Controlador USB, parlante, pulsador de testeo, alarmas de salidas y entradas hábiles. • Cable USB (2m) para conexión con PC • Adquisición de Software SWACQ • Fuente de alimentación 100-240Vac, 50-60Hz 	10292.00	10292.00
1	Caja de transporte para equipo incluido relleno interno	561.00	561.00
6	<p>Placa de procesador de señal de EA de doble canal, versión normalizada:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Nueve configuraciones de ancho de banda, incluidas: 25-45 kHz, 25-300 kHz, 25-850 kHz, 50-300 kHz, 50-850 kHz, 95-300 kHz, 95-850 kHz, 230-850 kHz, derivación selectiva por canal. • Forma de onda recortada opcional 	4035.00	24210.00
1	<p>Paquete de Software para análisis de formas de onda de la señal de EA, incluyendo asistencia online, y licencias para utilizar el software en 5 Pcs. Comprende los siguientes módulos de Software:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Software SWBN para análisis de EA. • Módulo de extensión VAE1 +2 VisualAE™ • Procesador de filtro VAEFP. • Procesador de usuario VAEUP • Extensión de procesador de usuario VAEUPE • Etc. <p>(50% descuento)</p>	3041.00	1520.50
1	<p>Paquete de localización de software. Agrega funcionalidades de ubicación comprobadas de SWBN a BDSWB. Comprende los siguiente módulos de Software:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Modulo lineal de localización VAELL • Módulo de localización plano/cilíndrico VAELP • Extensión multigrupo para módulos de localización VAELMG 	2638.00	1319.00

	<ul style="list-style-type: none"> Módulo de corrección de amplitud VAELAC (50% descuento) 		
1	Paquete de Software para análisis eficiente y gestión de datos de registros transitorios, incluye VisualTRTM y utilidades: TR-copia, TR-combi, TR. Indexer, promediador FFT. (50% descuento)	1562.00	781.00
12	Soportes magnéticos para acoplar sensores a cuba	75.00	900.00
12	Sensores 30-120 kHz, amplificador integral (ganancia 40dB), autocalibración, cara cerámica, conector BNC.	626.00	7512.00
Precio Total [EUR]		47095.50	

Presupuesto N°2

Cant. de Piezas	Descripción	Valor unitario [EUR]	Valor Total [EUR]
1	Dakel ZEDO sistema de medición de EA <ul style="list-style-type: none"> 16 canales de EA 2 canales auxiliares Control de Software ZEDO Daemon 	32200.00	32200.00
16	Sensores de EA con preamplificador incluido y soporte magnético.	504.00	8064.00
1	Traslado y gastos de envío	250.00	250.00
Precio Total [EUR]		40514.00	

Este precio no incluye IVA.-

Tabla 9.3 Industrias y Transformadores

Industrias	Cantidad de transformadores	Potencia c/transformador [MVA]
Termoeléctrica Manuel Belgrano (TMB)	3	300
Nucleoeléctrica Atucha I	1	400
Nucleoeléctrica Atucha II	1	825
Praxiar	1	25
Toyota	2	30
Siderca	3	130
	2	100
	2	45
	5	25
	2	12
	2	10
Pan American Energy (PAE)	2	15
	2	75
Cooperativa de		

Electricidad de Zarate (CEZ)	4	25
Ford Motor Company	2	40
Lujan	2	40
Papelera Zarate	1	5
	1	3
	7	2
Planta Quilmes (Zte)	4	6
	14	1.6
	2	1.6
San Antonio de Areco	1	30
	1	15
	2	5
Corcemar	1	8.5
	1	30
Eastman	1	15
Protisa	1	30
Las Palmas	1	30
San Pedro	2	15
Baradero	2	30
Papel prensa	1	15
Ramallo Industrial	1	30
Siderar	2	30
San Nicolás	4	70
Total	86	

Anexo D- Tablas de cantidad de Hits en función de la tensión.

Tabla 6.7 cantidad de hits DP al aire

Captura de Tiempo	Cantidad de Hits	Tensión [kV]	Observación
14:41:45	-	18	Previo a los 18 kV el equipo no detectó descargas parciales al aire
14:41:46	15	19	Ascenso de tensión
14:41:49	20	23	Ascenso de tensión
14:41:52	26	29	Ascenso de tensión
14:41:53	30	33	Ascenso de tensión
14:41:55	32	39	Ascenso de tensión
14:41:56	32	43	Ascenso de tensión
14:41:57	31	35	Descenso de tensión
14:41:58	25	28	Descenso de tensión

Tabla 6.8 cantidad de hits DP al aire

Captura de Tiempo	Cantidad de Hits	Tensión [kV]	Observación
00:26	0	19	Comienzan a aparecer DP aire
00:27	1	20	-
00:37	136	20	-
00:47	-	30	Se eleva la tensión a 30 kV y se toman 10 segundos de periodo nuevamente.
00:48	329	30	-
00:58	579	30	Finaliza periodo de medición
00:59	-	-	Se produce la ruptura de aceite y apagado del equipo de RD

Anexo E- Hoja de datos del transformador



ARGELTRA^{S.A.}
TRANSFORMADORES

- Fabricación, Reparación y Mantenimiento de Transformadores Rurales
- Distribución y Potencia • Asesoramiento Técnico Especializado



ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

- 1: Fabricante: ARGELTRA S.A.
- 2: Tipo: Rural trifásico
- 3: Norma IEC: 2247
- 4: Medio Aislante y refrigerante: aceite transformador 64 YPF
- 5: Grupo de conexión: D y 11
- 6: Potencia nominal kVA: 10
- 7: Tensión primaria nominal V: 13.200
- 8: Regulación primaria: más/menos 5%
- 9: Tensión secundaria en vacío V: 400-231
- 10: Tensión en cortocircuito: 4,5 %
- 11: Calentamiento en los arrollamientos °C: 65
Calentamiento en el medio aislante °C: 55
- 12: Nivel de ruido d B: 48
- 13: Pérdidas garantizadas: a) vacío: 80 W
b) cortocircuito: 340 W
- 14: Nivel de aislamiento (KV, -BI): 95
- 15: Corrientes de vacío: 100% un % 4,5 105% un % 9
- 16: Masas aproximadas en Kgrs.:

Núcleo		Arrollamiento		Núcleo con		Cuba y		M.Aisl.y		Total en Kg	
MT.	BT.			Bobinado	Acces.	Refrig.					
48	11	4		63	70	77					210

- 17: Dimensiones aproximadas máximas en mm:
Alto: 940 Largo: 700 Ancho: 370
- 18: Tipo de arrollamientos: continuos, concéntricos.
- 19: Material de los arrollamientos: cobre electrolítico.

Accesorios normales:

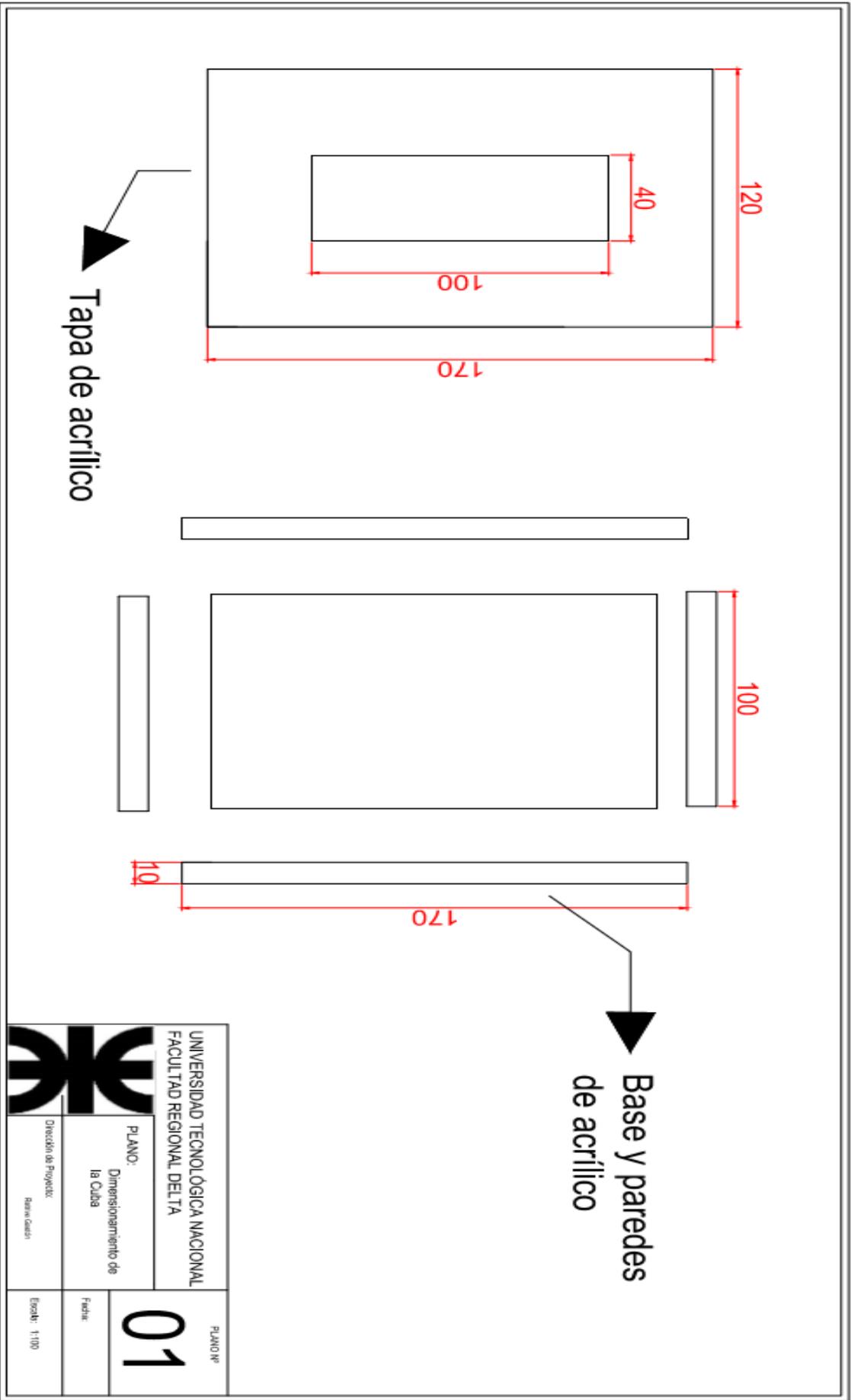
- * Cáncamos de suspensión
- * Grifo de purga c/tapón
- * Toma de tierra
- * Chapa característica

Laura Alarcon
Departamento de Ventas
ARGELTRA S.A.
Tel.: (54-11) 4652-8677/0520

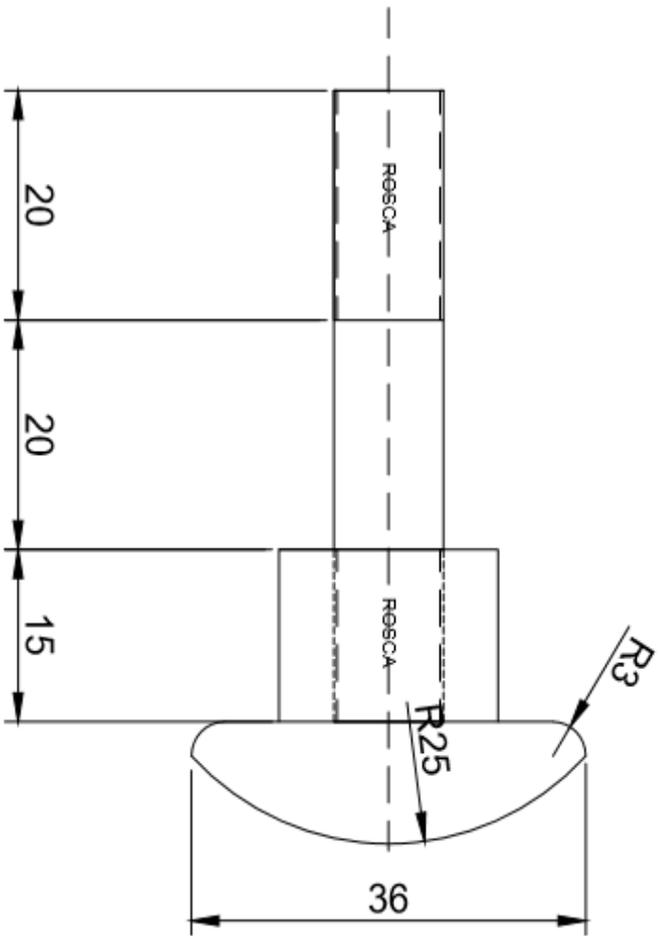


Montevideo 533 - (1786) La Tablada - Pcia. de Buenos Aires - República Argentina
Tel./Fax: (54-11) 4652-8677 / 0520 - Tel.: (54-11) 4652-6622 - E-mail: ventas@argeltra.com.ar

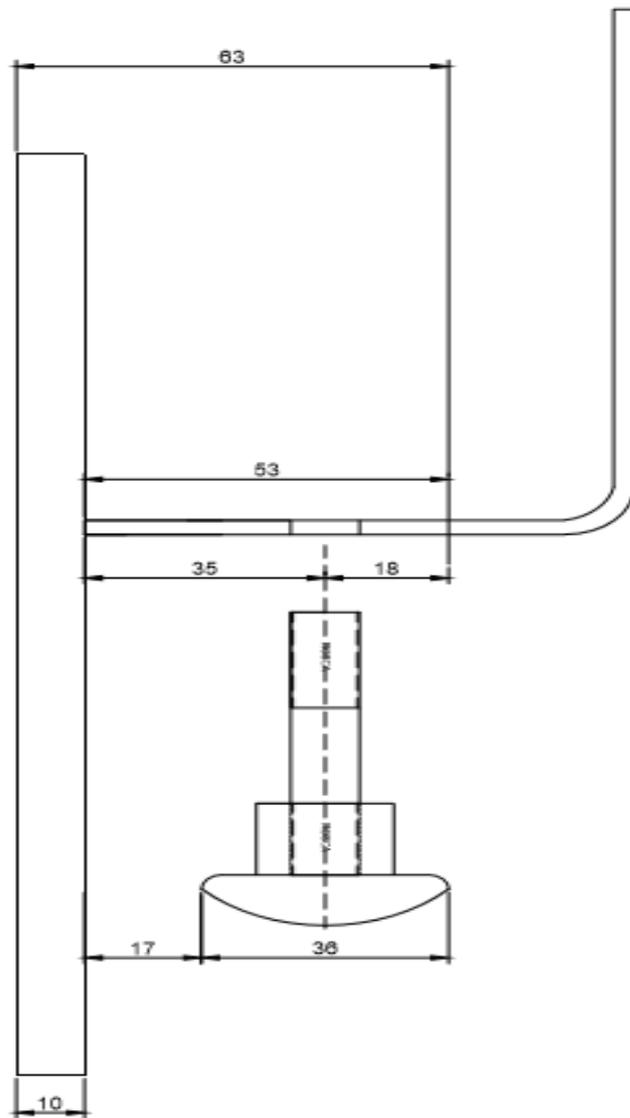
Planos



		UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL	
		FACULTAD REGIONAL DELTA	
PLANO: Dimensionamiento de la Caba	Dirección de Proyecto: Mariana Casari	PLANO Nº	
		01	
		Fecha:	
		Escala: 1:100	



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL FACULTAD REGIONAL DELTA		PLANO N° 02
PLANO: Diseño de electrodo para Cuba	Dirección de Proyecto: Rafaela Gardón	Fecha:
		Escala: 1:100



Espeor acrílico de
base de la cuba

		UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL FACULTAD REGIONAL DELTA	
		PLANO: Altura de Plancheta y Estructura para Cuba	PLANO: 03
Dirección de Proyecto: Néstor Guiso		Escala: 1:100	