

STUDY OF PARTIAL DISCHARGES ON CABLES WITH DRY INSULATION**ESTUDIO DE DESCARGA PARCIALES EN CABLE CON AISLAMIENTO SECO****PhD. Edwin García Quintero****Universidad de Pamplona**

Ciudadela Universitaria. Pamplona, Norte de Santander, Colombia.

Tel.: 57-7-5685303, Fax: 57-7-5685303, Ext. 156

E-mail: edwingarcia@unipamplona.edu.co

Abstract: There are several studies on dry isolating Partial discharges (PDs) which determine the importance of this technique to evaluate its consequent damage. However, there are a lot of things to do according to the evaluation of certain kind of relevant damages and find new pattern functions to determine on an isolating part, the most relevant defect which could be the main problem for the entire damage of the isolate system. On this article, different types of damage on a low density polymeric isolated system will be evaluated (ethylene - Propylene) from the present (PDs). And will be set a function to quantify, visualizes, and recognizes a defect against another into the isolate polymer.

Resumen: Hay muchos estudios sobre las descargas parciales (DPs) en aislamiento seco los cuales determinan la importancia de esta técnica para evaluar el deterioro del mismo. Sin embargo, queda mucho por hacer en cuanto a evaluar el tipo de deterioro más relevante y encontrar nuevas funciones de patrones que permitan determinar en un mismo aislamiento cual defecto puede ser más relevante y pueda conducir con mayor rapidez al daño total del sistema aislante. En este artículo se evaluarán diferentes tipos de deterioro de un sistema aislante polimérico de baja densidad (Etileno-Propileno) a partir de las DPs que estas presentan y se planteará una función que permita cuantificar, visualizar y discriminar un defecto frente a otro dentro del polímero aislante.

Keywords: Partial Discharges, Polymer Isolate, Ethylene – Propylene.

1. INTRODUCCION

Son muchas las investigaciones dedicadas al estudio de los materiales aislantes las cuales coinciden en afirmar que una de las principales causas de su deterioro son las Descargas Parciales (DPs) [1-5]. En esta última década se han establecido nuevos circuitos de ensayos y sistemas de medidas adecuados para obtener patrones que

permitan detectar, localizar y caracterizar las descargas parciales.

Inicialmente se utilizaban métodos completamente analógicos para medir las DPs; pero con el avance de la electrónica, ahora es posible combinar sistemas analógicos y digitales para obtener mayor información con miras a mejorar la interpretación del fenómeno.

En este artículo se pretende evaluar la actividad de DPs en un cable de potencia de 12/20 kV de tensión nominal, aislado con Etileno-Propileno. Esta evaluación tiene como objeto hacer un diagnóstico del estado del aislante y de su comportamiento frente a las DPs, se presentará el estado del arte de las DPs en aislante seco, se hará una descripción completa de las características del cable dada por el fabricante, se dará un cuadro completo del sistema de medida y del circuito de ensayo empleado, se describirán todas las pruebas realizadas al objeto de ensayo y los resultados obtenidos de esas pruebas, se desarrollará un análisis e interpretación de los resultados obtenidos, de cara a entender el comportamiento de este tipo de material dieléctrico frente a las DPs, finalmente se darán las conclusiones sobre el comportamiento del cable frente a las DPs. Adicionalmente se enunciarán unas recomendaciones y se plantearán algunos futuros desarrollos.

2. FENOMENO DE LAS DESCARGAS PARCIALES

El fenómeno de las descargas parciales involucra aspectos tanto físicos como químicos y no se pueden separar. La aparición constante de estos fenómenos va deteriorando continuamente el material aislante, reduciendo su tiempo de vida útil o, incluso, llegando a la ruptura dieléctrica del mismo hasta producir un fallo por cortocircuito entre los dos electrodos.

Las DPs generan una señal que es el resultado de la carga inducida en los electrodos del circuito exterior que tiene lugar cuando se produce la descarga.

Considerando una cavidad en la capa de aislante de un cable, a medida que se aumenta el voltaje al que se somete el cable, el campo en la cavidad aumenta y es siempre superior al campo en el 2 dieléctrico que le rodea. Esto es debido a que la permitividad dieléctrica del gas contenido en la cavidad es inferior a la del dieléctrico y también a la geometría y localización de dicha cavidad.

Cuando el campo es suficientemente grande en el interior de la cavidad, puede producirse una descarga eléctrica, de manera que el gas (en el interior de la cavidad) se ioniza. Por su parte, el campo eléctrico pasa de un valor muy elevado, a un valor casi nulo, inmediatamente después de la descarga.

Este cambio repentino del campo eléctrico implica una transferencia de carga (o descarga) en la cavidad y es lo que provoca la señal que puede ser detectada y medida. Esta descarga cortocircuita parcialmente el aislamiento y puede ocurrir en cualquier cavidad entre el conductor y la tierra. Las cavidades pueden estar localizadas entre el conductor y las paredes del aislamiento, al interior del aislamiento o entre las paredes del aislamiento y tierra [2]; como lo muestra la figura 1.

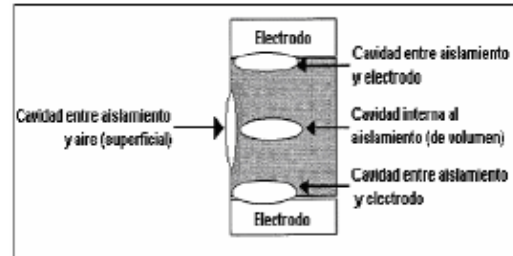


Fig. 1. Modelo de cavidades en diferentes regiones del material aislante.

El pulso de DP tiene una duración del orden de los nanosegundos, el cual puede acortarse en términos de su espectro frecuencial, y su amplitud puede disminuir, debido a fenómenos de atenuación del propio cable.

3. CIRCUITOS DE ENSAYO UTILIZADOS PARA LA DETECCIÓN DE LAS DPs

En este trabajo se ha implementado el método eléctrico para la detección de DPs con un circuito de pruebas de DP similar al dado en la figura 2.

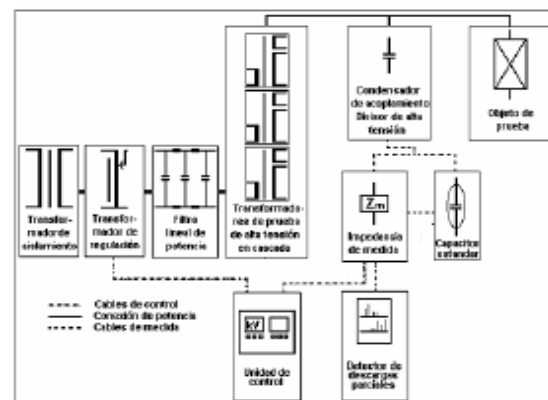


Fig. 2. Esquema general del circuito de prueba empleado.

Componentes:

Transformador de aislamiento: filtra los disturbios de la red externa entregando una onda completamente sinusoidal.

Transformador regulador: permite una variación muy fina del voltaje aplicado al primario del transformador elevador.

Transformadores de prueba de alta tensión en cascada: suministra la tensión de prueba al circuito de medición.

Condensador de acoplamiento o divisor de alta tensión: brinda un camino de baja impedancia a las señales de descargas parciales hacia el circuito de detección. Además, permite llevar la señal de voltaje de prueba hasta los equipos de medida.

Impedancia de medida Z_m : obtiene un valor de tensión para llevarlo al elemento detector.

Capacitor estándar: bloquea las señales de alta frecuencia de la fuente hacia el circuito de medición (interferencia).

Objeto (cable) de Prueba: representa una capacitancia que se debe tener en cuenta al llevar el sistema a resonancia. Sus terminales se conectan al circuito a través de vasos aislados en aceite con el fin de evitar descargas superficiales.

4. DESCRIPCIÓN DEL OBJETO DE ENSAYO

El objeto de ensayo utilizado, al cual se le medirá el nivel de descargas parciales, es un cable de media tensión de 12/20 kV aislado con ETILENO-PROPILENO (EPR).

En la figura 3 se da un esquema detallado de las partes que lo conforman y en la tabla 1 se presenta una descripción de sus características dadas por el fabricante.

Tabla 1. Descripción de las características del objeto de ensayo

CONDUCTOR	
Metal	Hilos de aluminio
Forma	Redonda compacta
Flexibilidad	Clase 2; según IEC 228; UNE 21.022
Formación	Por cuerdas redondas compactas de aluminio, con superficies más lisas

SEMICONDUCTORA INTERNA	
Formación	Capa extrusionada de material conductor
AISLAMIENTO	
Material	Etileno – Propileno, (EPR)
Fórmula química	Etileno 2HC = CH ₂ Propileno 2HC = CH – CH ₃
Capacidad	1.4 mF/km
Resistencia	64.7 MW/km
SEMICONDUCTORA EXTERNA	
Formación	Capa extrusionada de material conductor separado en frío
PANTALLA METÁLICA	
Material	Cobre
Formación	Corona de hilos de cobre de sección nominal de 16 mm ²
CUBIERTA EXTERIOR	
Material	Polioléfina termoplástico (Z1) VEMEX
DIMENSIONES	
Diámetro	35 mm
Peso	1635 kg/km



Fig. 3. Partes que conforman el objeto de ensayo

5. PRUEBAS REALIZADAS Y NORMATIVIDAD

Las normas internacionales más importantes para realizar pruebas de descargas parciales en cables con aislamiento seco son: IEC-840, IEC 885 pt. 2, AEIC CS4-94, AEIC CS5-87, ICEA T 24 380 y IEEE Std 48. Los comités encargados de realizar y actualizar las normas se han puesto gradualmente de acuerdo durante los últimos años, sin embargo, todavía hay diferencias marcadas en los requisitos de acondicionamiento y en los niveles de voltaje en los cuales se debe efectuar la medida.

Las pruebas realizadas a los objetos de ensayo, se han hecho en condiciones ambientales “normales” y a niveles de ruidos muy bajo (alrededor de 2 pC).

Este bajo nivel de ruido ha sido obtenido gracias a que el laboratorio es una cámara de Faraday, lo cual elimina las posibles interferencias externas; además, dicho laboratorio cuenta con una tierra independiente, lo cual evita que se introduzcan ruidos externos a él a través de este medio.

A estos cables se les ha colocado, en ambos terminales, una funda repartidora lineal de tensión (RLT) y una cinta EPR semiconductor autovulcanizable (de PVC), con el fin de evitar altos gradientes de tensión concentrados en las protuberancias e imperfecciones en las superficies y en las interfases de estos terminales, distribuir homogéneamente las líneas del campo eléctrico sobre esta superficie y, en consecuencia, evitar descargas parciales por esta causa. El montaje de la funda RLT y la cinta de PVC se muestran en la figura 4.



Fig. 4. Montaje del repartidor lineal de tensión (RLT) y cinta de PVC sobre un terminal del cable.

Nota: El objeto de ensayo y los diferentes elementos del circuito de prueba se han limpiado adecuadamente para evitar descargas parciales indeseadas debido a la acumulación de polvo y humedad en sus superficies.

Las pruebas se hicieron al mismo tipo de objeto de ensayo, pero uno de ellos sin defectos y los otros con diferentes tipos de defectos: uno con un empalme y el otro con un orificio hecho con un clavo y que perforó el 20% del aislamiento. Esto ha sido provocado con el fin de evaluar y comparar su comportamiento en función del nivel de descargas parciales presentado.

6. PROCEDIMIENTOS Y RESULTADOS

El procedimiento seguido en el laboratorio para obtener las descargas parciales en cables con aislamiento seco ha sido de acuerdo a la norma ICEA T 24 380, pero adaptado a las condiciones del laboratorio, a saber.

En este caso particular, se han seguido los siguientes pasos: se aplica tensión alterna, a la

velocidad de 1 kV/s, las descargas parciales inicialmente son inexistentes y sólo se presenta el ruido de fondo, de 2 pC. Si se incrementa el nivel de tensión, llegará un momento en que se presentarán las primeras descargas parciales. La tensión en que esto sucede se conoce como *tensión de aparición de descargas* (DIV). Al continuar aumentando la tensión, la magnitud de las descargas aumenta hasta estabilizarse (es decir, que aumentando la tensión a partir de este punto la magnitud de las descargas no aumentará) y se alcanza la *tensión de estabilización*. Luego, se empieza a reducir la tensión (a la misma velocidad de 1 kV/s) observándose un leve incremento en la magnitud de las descargas, conociéndose esta tensión como *tensión intermedia*. Finalmente, si se sigue reduciendo la tensión se encontrará que, por debajo de cierto valor de la tensión, las descargas desaparecen. Esta última tensión es llamada *tensión de extinción de descargas* (DEV).

En la tabla 2 se presentan los valores de tensión con sus respectivas magnitudes de descargas parciales, para los tres casos estudiados.

Tabla 2. Valores de tensión y carga de las DP's obtenidos para los tres ensayos

Cable		Sin defecto	Perforado	Con empalme	
Tensión-Carga					
DIV	V (kV)	12	8,4	7,6	
	q (pC)	qmed	2,22	5,2	16,8
		qmax	3,15	11,2	75,4
Tensión estabilización	V (kV)	18,1	16,5	13,4	
	q (pC)	qmed	9,23	6,8	17,16
		qmax	15,3	27,2	99,2
Tensión Inter-media	V (kV)	17,	15,3	9,3	
	q (pC)	qmed	5,85	11	19,92
		qmax	11,7	27,7	100
DEV (kV)		11,6	7,8	7,1	

En la figura 5 se muestra la actividad de descargas parciales, al nivel de tensión de estabilización, para una adquisición de cada una de los tres casos de estudio. En esta figura se observa que:

- Para los tres casos ocurren descargas de ambas polaridades en cada semiciclo, sin que prevalezca sustancialmente uno frente a otro.
- El nivel máximo de descargas es de: 15 pC para el cable sin defecto (o sano), 27.7 pC para el cable perforado y 100 pC para el cable con empalme.
- Las actividades de descargas se centran en un margen pequeño de la onda de tensión, siendo: 45

grados para el primer caso, 80 grados para el segundo y 60 grados para el tercero.

- Otro resultado importante a tener en cuenta, y que se puede apreciar en la figura 6, es que el número de muestras de DPs en una adquisición, a la tensión de estabilización, es mayor para el cable con empalme, seguido por el cable perforado y el cable sin defecto, respectivamente.

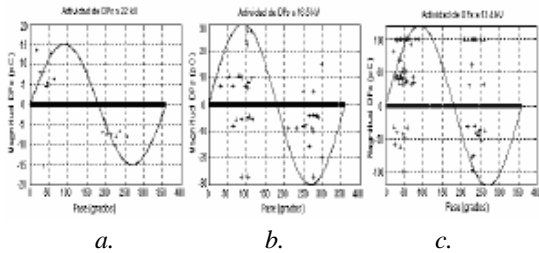


Fig. 5. Actividad de descargas parciales a la tensión de estabilización. a) Cable sin defecto. b) Cable perforado. c) Cable con empalme.

6.1 Obtención de patrones

Al realizar las medidas de descargas parciales, por métodos eléctricos, a la tensión de estabilización, la función de adquisición¹ para la carga-número de muestras, $Hq(n)$, de 12 adquisiciones acumuladas, para cada uno de los tres casos de estudio, están dados en la figura 6. Es importante tener en cuenta que para este trabajo ha sido tomado el valor absoluto de la magnitud (q) de cada una de las muestras, pues para las funciones de distribución en estudio sólo es importante dicho valor absoluto de cara a evaluar el deterioro del sistema aislante.

Aquí hay que tener presente que el número de muestras n es el total presentado en los dos semiciclos de la onda de tensión de ensayo para las 12 adquisiciones y, aunque con este método se pierde la información por semiciclo (o fase), ésta no es relevante a la hora de medir el deterioro global del sistema aislante, ya que dicho deterioro se puede evaluar aceptablemente teniendo en cuenta dos variables fundamentales: la magnitud de la carga q y el número total de muestras n , aunque hay que tener en cuenta que se pierde la posibilidad de localizar el defecto.

¹ La adquisición es la señal obtenida por el detector de DPs para una medida.

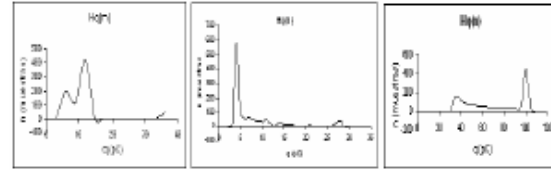


Fig. 6. Función de distribución $Hq(n)$. a) Cable sin defecto. b) Cable perforado. c) Cable con empalme.

En la figura 6 se nota que el mayor número de muestras se presenta:

- En 12 pC para el cable sin defecto.
- En el cable perforado la máxima concentración de muestras se presenta en 4 pC, y una pequeña concentración en 27 pC.
- En el cable con empalme se producen dos puntos de máxima concentración de muestras: uno en 35 pC y el otro en 100 pC.

7. PROPUESTA DE UNA NUEVA FUNCIÓN PARA OBTENER PATRONES

Si bien es cierto que la función para obtener patrones, presentada en la sección anterior, representa, en cierta medida, el grado de deterioro de un objeto de ensayo con respecto a otro; incluso, de un defecto con respecto a otro dentro de la misma probeta, en algunos casos esta función puede producir una idea un poco distorsionada al momento de comparar visualmente, mediante sus gráficas, la relevancia de dos o más defectos en el mismo objeto de prueba. Suponiendo que se tiene el siguiente caso hipotético:

7.1 Caso hipotético

Después de realizar cinco adquisiciones, a la tensión de estabilización de las DPs, se obtuvieron los siguientes resultados estadísticos, para dos defectos presentados en el mismo objeto de ensayo, los cuales se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Caso ejemplo

RESULTADOS DEFECTOS	n (muestras)	q (pC)
Defecto 1	100	30
Defecto 2	30	100

El número de muestras n es el número total de muestras presentados en los dos semiciclos para todas las adquisiciones.

De acuerdo a la función estadística $Hq(n)$, el defecto 1 es, visualmente, más crítico que el defecto 2, ya que ahí se presentará el mayor número de muestras. Ver la figura 7 siguiente.

Sin embargo, puede ser más probable que el elemento falle debido al defecto 2 y no al defecto 1, puesto que, a pesar que el defecto 2 contiene menos muestras, estas tienen mayor carga, lo cual implica una mayor superficie de la cavidad y, por tanto, un mayor tamaño de la misma.

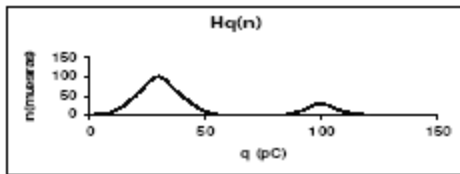


Fig. 7. Función $Hq(n)$ para el caso ejemplo

Lo anterior no significa que se desprece el número de descargas, ya que esta también es una prueba del deterioro real del material aislante. Por consiguiente, la propuesta se basa en una nueva función que reúna estas dos variables (carga y número de muestras) en una sola cantidad, la cual se define mediante la siguiente expresión:

$$F_{qn} = \frac{q_i \cdot n_i}{n_{\text{medio}}} \quad (1)$$

Donde:

F_{qn} es la *función de compensación*, empicocolumbios (pC).

i es la i -ésima DP de diferente magnitud presentada en todas las adquisiciones.

q_i es la magnitud de las diferentes DPs presentadas en todas las adquisiciones.

n_i es el número de muestras de cada DP presentada en todas las adquisiciones.

n_{medio} es el promedio de muestras de DPs por adquisición para un mismo objeto de ensayo y cuya finalidad es normalizar a F_{qn} para poder comparar el deterioro entre diferentes probetas del mismo material.

$$n_{\text{medio}} = \frac{\text{número total de muestras}}{\text{número de adquisiciones}} \quad (2)$$

La función de compensación F_{qn} , al igual que la función de distribución $Hq(n)$, pierde la información por semiciclo (o fase), ya que para ella tampoco es relevante a la hora de medir el deterioro del sistema aislante, aunque ya no se pueda localizar el defecto.

Tabla 4. Caso ejemplo - Función de compensación

RESULTADOS DEFECTOS	n (muestras)	q (pC)	n_{medio} (muestras)	F_{qn} (pC)
Defecto 1	100	30	26	115,4
Defecto 2	30	100	26	115,4

Al aplicar la función de compensación F_{qn} al ejemplo anterior, se obtienen los valores de la tabla 4. Su correspondiente gráfica, respecto a q , se muestra en la figura 8.

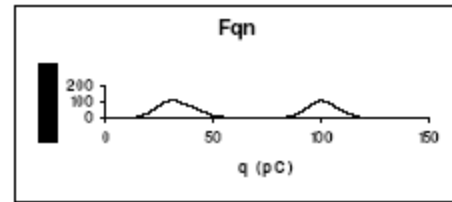


Figura 8. Función de compensación F_{qn} para el caso ejemplo.

En la figura 8 se nota que existen dos defectos muy críticos en 30 y 100 pC, a diferencia de la figura 8 en donde se aprecian ambos defectos, pero el de 30 pC aparenta ser visualmente más relevante (3.3 veces mayor) que el de 100 pC. Luego, la *función de compensación* da una visión menos sesgada de la realidad del deterioro del material aislante que la ofrecida por la función $Hq(n)$.

Aplicando la función de compensación F_{qn} a los tres casos estudiados, se obtienen los valores de la tabla 5 y sus correspondientes gráficas en la figura 9. En esta figura se observa que el mayor valor para la función de compensación se presenta:

- En 10 y 34 pC para el cable sin defecto, siendo el primero 3 veces mayor que el segundo.
- En el cable perforado sigue siendo mayor en 4 pC que en 27 pC, pero ahora es sólo 3.7 veces mayor, dejando ver a este último (27 pC) como un defecto potencialmente más peligroso que el observado a partir de las funciones de distribución $H(\delta, q, n)$ y $Hq(n)$.
- En 35 y 100 pC para el cable con empalme, siendo el segundo 8 veces mayor que el primero.

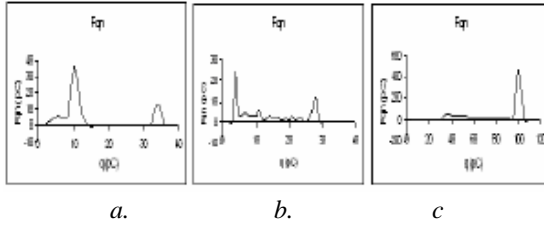


Fig. 9. Función de compensación. a) Cable sin defecto. b) Cable perforado. c) Cable con empalme

8. ANALISIS DE LOS RESULTADOS

La diferencia entre los resultados obtenidos para cada probeta, en función de las descargas parciales, saltan a la vista. En el cable sano, en principio, no debe tener defectos internos, las descargas parciales presentadas en él (mostradas en las figuras 5a, 6a y 9a), son debido a las imperfecciones en las conexiones de los terminales y su insuficiente adecuación, o a ambas causas. No obstante, como no fue posible evitar este inconveniente, se tomaron esas descargas como intrínsecas al ensayo con el cable sano sin olvidar su procedencia. Lógicamente, estas descargas también se presentaron en los otros dos casos (cable perforado y cable con empalme), pero perdieron importancia frente a la magnitud de las descargas debido al defecto del aislante en cada uno de ellos, principalmente al último.

En la tabla 2 se puede ver que, en general, a medida que aumenta la gravedad del defecto, el nivel de tensión de estabilización de las DPs disminuye, se presenta mayor número de descargas parciales promedio y la magnitud de las DPs aumenta. Esto se debe a que, en el caso del cable con empalme, presenta mayor tamaño en sus cavidades y más irregularidades en las interfases entre conductor-aislamiento y aislamiento-malla de tierra, respecto a los cables perforados y sin defecto. El mayor tamaño en las cavidades dentro del aislamiento implica mayor superficie de dicha cavidad y, por tanto, mayor carga depositada en esa superficie, produciendo mayor magnitud de las descargas parciales en el momento en que estas ocurran. Además, los electrones involucrados en la avalancha, dentro de la cavidad, en el momento de la descarga serán más cuanto mayor sea la longitud de la misma; por tanto, habrá mas carga (o electrones) en el momento de la descarga. Al mismo tiempo, el hecho que haya mayor número de cavidades dentro del material aislante y en las

interfases de este con el conductor y con la malla de tierra, aumenta el número de descargas parciales, como se ve en la fig. 5c comparado con las figuras 5a y 5b, y en la figura 5b comparado con la figura 6a. Las irregularidades en las superficies de las interfases mencionadas (como las puntas agudas debido a las terminaciones imperfectas del metal del conductor y de la malla de tierra que perforan el aislante), producen un aumento en el gradiente de potencial generando descargas parciales a niveles de tensión mas bajas que en las probetas donde no se presentan estos defectos [3, 6].

Otro fenómeno apreciable en la figura 5, es que en el cable sano (o sin defecto) la polaridad de las DPs (que son debida a la mala adecuación y/o conexión de los terminales) presentan un comportamiento regular respecto al semiciclo de la onda de tensión de alimentación, mientras que en el cable perforado el comportamiento es mas al azar, es decir, que se presentan DPs de ambas polaridades independiente del semiciclo de la onda de tensión de alimentación, y más acentuado aún es este comportamiento en el cable con empalme. Esto se debe a que, en los cables perforado y con empalme, las diferentes cavidades presentan ambas polaridades cuando están sometidas a un mismo semiciclo de la onda de tensión, lo cual es posible porque en la cavidad el campo eléctrico no sigue la misma dinámica que el campo eléctrico externo, haciendo que el campo neto en el interior de la cavidad sea menor o, en algunas ocasiones, de sentido contrario al campo externo debido al tipo e carga inducida en su superficie, el cual varía de manera diferente al campo externo (ver la figura 10). Por consiguiente, un mismo defecto puede producir descargas de diferente polaridad para un mismo semiciclo de la tensión de ensayo. Aquí también se debe tener en cuenta la influencia de la geometría de la cavidad, que puede presentar distancias muy pequeñas entre los dipolos, produciendo descargas a diferentes niveles de la tensión de ensayo y cuya polaridad sigue dependiendo de la dinámica del campo eléctrico al interior de la cavidad.

En la misma figura 6 se observa que las DPs en el cable sin defecto están en un margen más estrecho respecto a los cables perforado y con empalme (45°, 80° y 60°, respectivamente); esto es debido a que las cavidades de los cables perforado y con empalme tienen geometrías más variadas y/o contienen gases de diferente naturaleza y, en consecuencia, de diferente permitividad dieléctrica lo cual produce descargas a diversos valores de la

magnitud de la onda de tensión aplicada o, lo que es equivalente, a diferentes valores de la fase de la onda de tensión aplicada, lo que explica que haya un rango más ancho, respecto a la fase, de la presencia de DPs en los cables con defectos que en el cable sano.

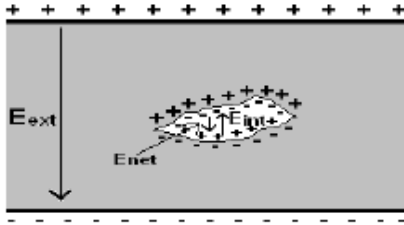


Fig. 10. Dinámica del campo eléctrico dentro de la cavidad del dieléctrico.

E_{ext}, es el campo eléctrico externo a la cavidad.

E_{int}, es el campo eléctrico interno a la cavidad.

E_{net}, es el campo eléctrico neto en la cavidad.

De acuerdo con la función de distribución $Hq(n)$, representada en la figura 5, el cable sin defecto presenta un punto de alta concentración de DPs, en 10 pC, el cable perforado presenta uno de importancia en 4 pC y el cable con empalme presenta dos puntos de alta densidad de DPs, en 35 y 100 pC, como se había determinado de las figuras 6a, 6b y 6c, respectivamente.

De acuerdo a la función de compensación planteada, Fqn , y dada en la figura 9, se observa que en el cable sin defecto, realmente, hay dos defectos importantes: en 10 pC y 34 pC, siendo el primero tres veces mayor que el segundo; por tanto, a diferencia de lo que permitía visualizar la función $Hq(n)$, en las figuras 6a y 7a, respectivamente, en donde sólo presentaban un punto relevante de alta densidad de DPs (en 10 pC) y, en consecuencia, un solo defecto importante, la nueva función revela otro defecto a una carga de 34 pC. En la figura 9b al igual que en la 6b se nota que el cable perforado también presenta dos defectos de importancia, en 4 pC y 27 pC, donde el primero es 3.7 veces mayor que el segundo, permitiendo ver más importancia en el defecto de 27 pC que lo que dejaba ver para este mismo caso la función de distribución $Hq(n)$, la cual sólo mostraba un defecto relevante con alta densidad de descargas parciales en 4 pC.

Para el cable con empalme, la nueva función de compensación Fqn muestra dos puntos de mayor densidad de descargas parciales en 35 pC y 100 pC

(ver la figura 9c), lo cual significa que siguen habiendo dos defectos relevantes como también lo mostraba la función de distribución en la figura 6a. Pero la figura 9a muestra que el defecto presentado a 100 pC es mucho más crítico que el presentado a 35 pC, ya que la función de compensación (Fqn) es ocho veces mayor en 100 pC que en 35 pC, y no tres veces mayor, como para el caso de la función de distribución $Hq(n)$. En definitiva, de acuerdo a la nueva función de distribución, es mucho más probable que el aislamiento, en el cable con empalme, falle primero por el defecto de 100 pC que por el de 35 pC.

9. CONCLUSIONES

El cable con empalme presenta descargas parciales con mayor cantidad y de mayor magnitud que los cables sin defecto y perforado, y a su vez el cable perforado presenta descargas parciales con mayor cantidad y de mayor magnitud que el cable sin defecto (ver la tabla 2 y las figuras 5 y 6). La función de compensación (Fqn) presenta defectos importantes que no era posible ver mediante los patrones convencionales $Hq(n)$. Las descargas parciales son una buena herramienta para determinar el grado de deterioro del aislamiento seco. De acuerdo a los resultados, en un empalme el aislamiento está más deteriorado que en un cable perforado y, en consecuencia, es probable que el primero alcance un daño total del sistema aislante.

10. DESARROLLOS FUTUROS

A pesar de la gran cantidad de investigaciones e investigadores que han abordado este tema, todavía queda mucho trabajo pendiente con miras a evaluar el deterioro de los aislamientos a partir de las descargas parciales que estos presenten. Una posible forma de abordar esta dura tarea sería: Encontrar una función que permita cuantificar realmente el deterioro de un sistema de aislamiento. Esta función debería contener el número de muestras, la magnitud de la descarga, la tensión aplicada y, en la medida de lo posible, todas estas variables deberían ser una función del tiempo que lleva el aislamiento en operación. Lo anterior, no sólo permitiría evaluar el deterioro actual del aislamiento, sino también ayudaría a predecir su tiempo de vida útil, hasta antes que falle.

REFERENCIAS

- [1]. Dissado L. A. Understanding Electrical Trees in Solids: From Experiment to Theory. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 9 No. 4, Agosto 2002.
- [2]. García Alcázar J. C. *Descargas Parciales*. ITE en el Proyecto MEFADEP. Abril 2002.
- [3]. R. Bartnikas. Partial Discharges: Their Mechanism, Detection and Measurement. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. Vol. 9 No. 5, Octubre 2002.
- [4]. Akyuz M. Positive Streamer Discharges in air and along insulating surfaces: Experiment and Simulation. Acta de la Universidad de Uppsala. ISBN 91-554-5471-2, 2002.
- [5]. Densley J., Kalicki T., Nadolny Z. Characteristics of DP Pulses in Electrical Trees and Interfaces in Extruded Cables. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 8 No. 1, Febrero 2001.
- [6]. LABEIN. Mecanismo de Fallo y Deterioro de los Materiales Aislantes Eléctricos y su Relación con las Descargas Parciales. Proyecto MEFADEP. AT 2000-0134-P4-07. Febrero 2003.