

ARTÍCULO CIENTÍFICO / RESEARCH ARTICLE

**Estudio del deterioro de materiales
aislantes secos mediante técnicas de alta
tensión (descargas parciales)**

Study of the damage on dry isolated
materials through high voltage techniques
(Partial Discharges)

Edwin García Quintero*
Universidad de Antioquia (Colombia)

* Ing. MSc. PhD. Profesor tiempo completo, Universidad de Antioquia (Colombia). Miembro del Grupo de Manejo Eficiente de la Energía (GIMEL).
edwgarcia1@yahoo.es

Correspondencia: Avenida 33 N° 57-143, Bello, Antioquia (Colombia).

Resumen

En este trabajo se evalúa el deterioro del material aislante polimérico de baja densidad (Etileno-Propileno) en un cable de potencia de 12/20 kV, a partir de la técnica de descargas parciales (DPs), para tres tipos de objetos de ensayo: una sin defecto y dos con defectos (perforación con objeto puntiagudo y empalme). Adicionalmente, se plantea una función de patrones de DPs que permita cuantificar, visualizar y discriminar un defecto frente a otro en el mismo aislamiento; todo esto con el fin de determinar, entre las tres probetas (o cable) de ensayo, cuál de ellas presenta el defecto más relevante y, en consecuencia, que pueda conducir más rápidamente al daño total del sistema aislante. Como resultado se obtuvo que el empalme es el deterioro más importante, seguido por el defecto debido a la perforación del aislamiento. En cuanto a la función de patrones de DPs planteada, esta discrimina muy bien los defectos, resaltando gráfica y cuantitativamente los más relevantes, y de esta manera mejora algunas deficiencias presentadas por las funciones de patrones ya existentes.

Palabras clave: Descargas parciales, aislamientos poliméricos, Etileno-Propileno.

Abstract

In this work the damage on low density polymeric isolated material is evaluated (Ethylene-Propylene) in a power wire of 12/20 kV, from the partial discharges technique (PDs) for three different types of objects: one without defect and other two with it (drilling with pointed object and connection). Additionally to this, a function of patterns is to set out and allow to quantify, visualize and to discriminate defects in the same isolation. This just with the purpose to obtain on the three test tubes, which of them show the most relevant defect and in consequence let us to know the total damage on the isolated system. As results, we find that connections are the most important damages followed by the defect due to the drilling on the isolation. In relation with the patterns function PDs, this one, make a good difference among defects highlighting in a graphic and qualitative way, the most relevant, and so, improvement some deficiencies showed by the functions of patterns that already exist.

Keywords: Partial discharges, polymers isolation, Ethylene-Propylene.

Fecha de recepción: 9 de febrero de 2009
Fecha de aceptación: 10 de julio de 2009

1. INTRODUCCIÓN

Existen abundantes investigaciones dedicadas al estudio de los materiales aislantes, y éstas coinciden en afirmar que una de las principales causas de su deterioro son las Descargas Parciales (DPs) [1]-[5], lo cual es un tema de mucha preocupación ya que la confiabilidad de los sistemas eléctricos está a merced de los materiales aislantes que ellos utilizan.

Para mejorar los estudios sobre el deterioro de los materiales que se utilizan para el aislamiento eléctrico, en la 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 [7], 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 [8].

Fenómeno de las descargas parciales

El fenómeno de las descargas parciales involucra aspectos tanto físicos como químicos que 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 una falta 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 dentro de la cavidad o defecto.

Considerando una cavidad en la capa de aislamiento de un cable de potencia, 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 dieléctrico que le rodea. Esto se debe 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.

■ *Mecanismo de generación de las DPs.*

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 [7]. Esta descarga cortocircuita parcialmente el aislamiento y puede ocurrir en cualquier cavidad entre el conductor y la tierra (electrodos). Las cavidades pueden estar localizadas entre el conductor y las paredes del aislamiento, al interior del aislamiento o entre las paredes del aislamiento y la tierra [2]; como lo muestra la figura 1.

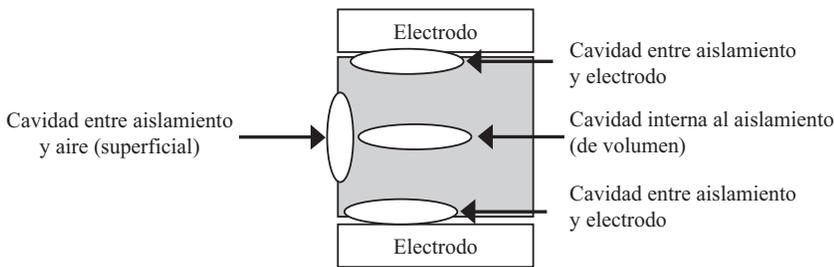


Figura 1. Modelo de cavidades en diferentes regiones del material aislante

El pulso de una descarga parcial 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.

En este artículo se pretende evaluar el deterioro del aislamiento de un cable de potencia de 12/20 kV de tensión nominal, aislado con Etileno-Propileno, a partir de la actividad de DPs que él presenta. Esta evaluación tiene como objeto hacer un diagnóstico del estado del aislante y de su comportamiento frente a las DPs. Para ello, primero se presentará el estado del arte de las DPs en aislamiento seco; luego se hará una descripción completa de las características del cable dada por el fabricante; se mostrará 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 entregarán las conclusiones sobre el comportamiento del asilamiento, para diferentes tipos de deterioro, frente a las DPs.

2. METODOLOGÍA

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

Componentes

- *Transformador de aislamiento*: filtra los disturbios de la red externa entregando una onda completamente sinusoidal, esto es, sin contenido de armónicos.
- *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 conectores normales rodeados con una esfera metálica conectada al mismo nivel de tensión, con el fin de evitar descargas superficiales.

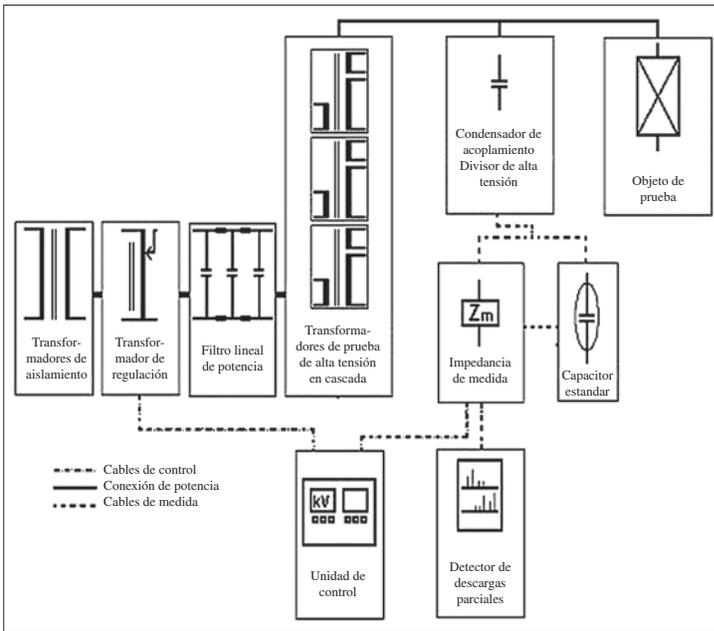


Figura 2. Esquema general del circuito de prueba empleado

Descripción del objeto de ensayo

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

En la figura 3 se muestra 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	Etileno	${}_2\text{HC}=\text{CH}_2$
Química	Propileno	${}_2\text{HC}=\text{CH}-\text{CH}_3$
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	

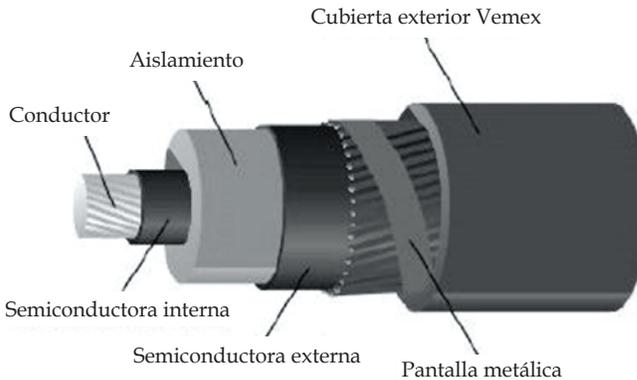


Figura 3. Partes que conforman el objeto de ensayo

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 de alta tensión (donde se desarrolló la investigación) está encapsulado dentro de 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 semiconductora 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, además de 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.



Figura 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 el deterioro comparando su comportamiento en función del nivel de descargas parciales presentado.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El procedimiento que se siguió en el laboratorio para obtener las descargas parciales en cables con aislamiento seco está de acuerdo con la norma ICEA T 24 380, pero adaptado a las condiciones del laboratorio.

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 se incrementará y se alcanza la *tensión de estabilización*. Luego, se empieza a reducir la tensión (a la misma velocidad de 1 kV/s) y se observa un leve incremento

en la magnitud de las descargas; esta tensión se conoce 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 DPs obtenidos para los tres ensayos

Cable			Sin defecto	Perforado	Con empalme
Tensión-Carga					
DIV	V (kV)		12	8,4	7,6
	q (pC)	q _{med}	2,22	5,2	16,8
		q _{max}	3,15	11,2	75,4
Tensión Estabilización	V (kV)		18,1	16,5	13,4
	q (pC)	q _{med}	9,23	6,8	17,16
		q _{max}	15,3	27,2	99,2
Tensión Intermedia	V (kV)		17,2	15,3	9,3
	q (pC)	q _{med}	5,85	11	19,92
		q _{max}	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.

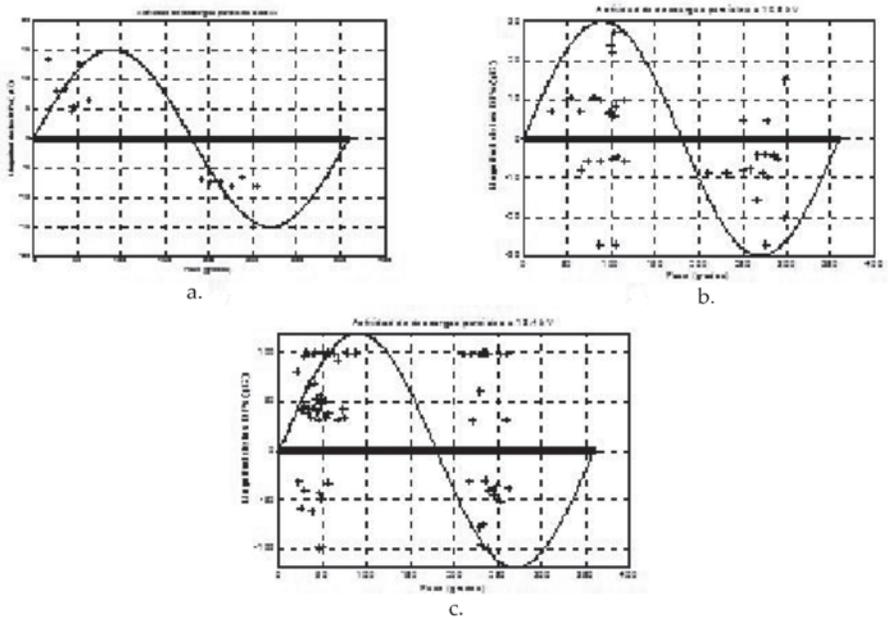


Figura 5. Actividad de descargas parciales a la tensión de estabilización. a) Cable sin defecto, b) Cable perforado, c) Cable con empalme

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, así: 45 grados para el primer caso, 80 grados para el segundo y 60 grados para el tercero.
- Otro resultado importante que se debe 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.

Obtención de patrones

Para realizar las medidas de descargas parciales, en esta investigación se utilizará el método eléctrico y se aplicará la tensión de estabilización. La función carga-número de muestras, $Hq(n)$, obtenida a partir de los datos conseguidos en el laboratorio se muestra en la figura 6 para cada uno de los tres casos de estudio.

Los datos de DPs obtenidos en el laboratorio se logran a partir de adquisiciones para una medida realizadas por el detector de DPs, pero para mejorar la metodología de adquisición de datos se tomaron 12 adquisiciones acumuladas (no promediadas).

Es importante tener en cuenta que para este trabajo ha sido tomada la magnitud (q) de cada una de las muestras, pues para las funciones de distribución en estudio sólo es importante dicha magnitud 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 daño 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 elimina la posibilidad de localizar el defecto.

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

- a. En 12 pC para el cable sin defecto.
- b. En el cable perforado hay relevancia de 4 pC contra 27 pC según $Hq(n)$.
- c. En el cable con empalme se producen dos puntos de máxima concentración de muestras: uno en 35 pC y el otro en 100 pC.

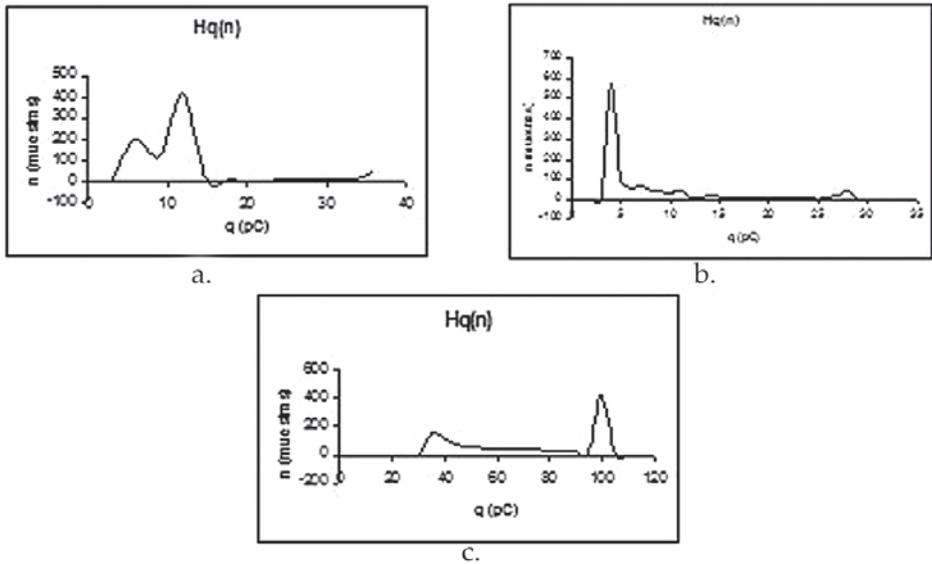


Figura 6. Función de distribución $Hq(n)$. a) Cable sin defecto, b) Cable perforado, c) Cable con empalme

Propuesta de una nueva función para obtener patrones

Si bien es cierto que la función para obtener patrones, que se muestra 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 relación 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.

■ 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	n (muestras)	q (pC)
Defectos		
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 con 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 figura 7). 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.

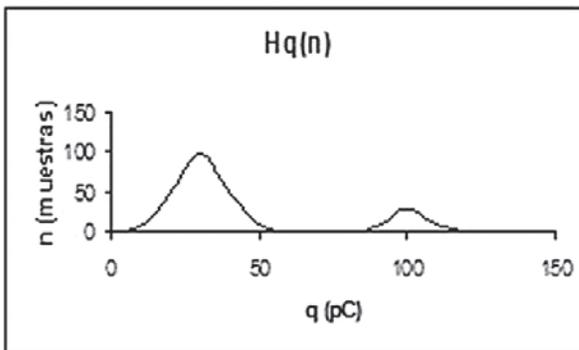


Figura 7. Función $Hq(n)$ para el caso ejemplo

Lo anterior no significa que se desprecie 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, resultado de esta investigación, que reúna estas dos variables (carga y número de muestras) en una sola cantidad, la cual se define mediante la siguiente expresión:

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

de donde, F_{qn} es la *función de compensación*, en picocolumbios (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.

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

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	n (muestras)	q (pC)	n_{medio} (muestras)	F_{qn} (pC)
Defectos				
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.

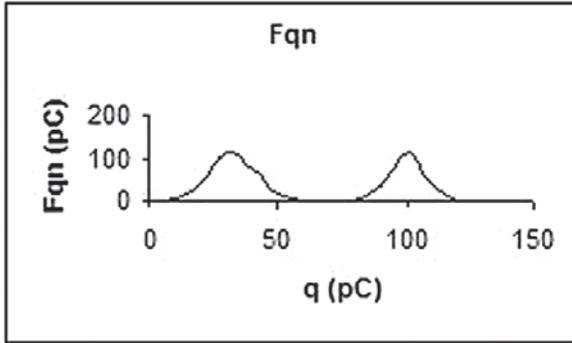


Figura 8. Función de compensación F_{qn} para el caso ejemplo

En la figura 8 se nota que existen dos defectos muy críticos en 30 y 100 pC, a diferencia de la figura 7, en la cual 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} para 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, lo cual deja ver a este último (27 pC) como un defecto potencialmente más peligroso que el observado a partir de las funciones de distribución $H(\varnothing, q, n)$ y $Hq(n)$.
- En 35 y 100 pC para el cable con empalme, siendo el segundo 8 veces mayor que el primero.

Tabla 5. Función de compensación para los tres casos estudiados

Sin defectos				Con empalme				Perforado			
n_i	$q_i(\rho C)$	n_{medio}	$F_{qn}(\rho C)$	n_i	$q_i(\rho C)$	n_{medio}	$F_{qn}(\rho C)$	n_i	$q_i(\rho C)$	n_{medio}	$F_{qn}(\rho C)$
0	2	112	0	0	5	92	0	0	1	97	0
88	4		3,142	0	10		0	0	2		0
110	6		5,892	0	15		0	0	3		0
81	8		5,785	0	20		0	577	4		23,790
93	10		35,089	0	25		0	85	5		4,380
60	12		6,428	0	30		0	58	6		3,580
2	14		0,250	155	35		58,967	65	7		4,690
1	16		0,142	104	40		45,217	45	8		3,710
1	18		0,160	78	45		38,152	38	9		3,520
0	20		0	63	50		34,239	29	10		2,980
0	22		0	49	55		29,293	49	11		5,550
1	24		0,214	47	60		30,652	13	12		1,600
1	26		0,232	39	65		27,554	10	13		1,340
0	28		0	36	70		27,391	22	14		3,170
2	30		0,535	35	75		28,532	13	15		2,010
2	32		0,571	19	80		16,521	13	16		2,140
43	34		13,050	21	85		19,402	14	17		2,450
0	36		0	16	90		15,652	5	18		0,920
-	-	-	-	15	95	15,489	10	19	1,950		
-	-	-	-	428	100	465,220	5	20	1,030		
-	-	-	-	0	105	0	14	21	3,030		
-	-	-	-	0	110	0	5	22	1,130		
-	-	-	-	-	-	-	8	23	1,890		
-	-	-	-	-	-	-	8	24	1,970		
-	-	-	-	-	-	-	0	25	0		
-	-	-	-	-	-	-	6	26	1,600		
-	-	-	-	-	-	-	23	27	6,400		
-	-	-	-	-	-	-	42	28	12,120		
-	-	-	-	-	-	-	0	29	0		
-	-	-	-	-	-	-	0	30	0		

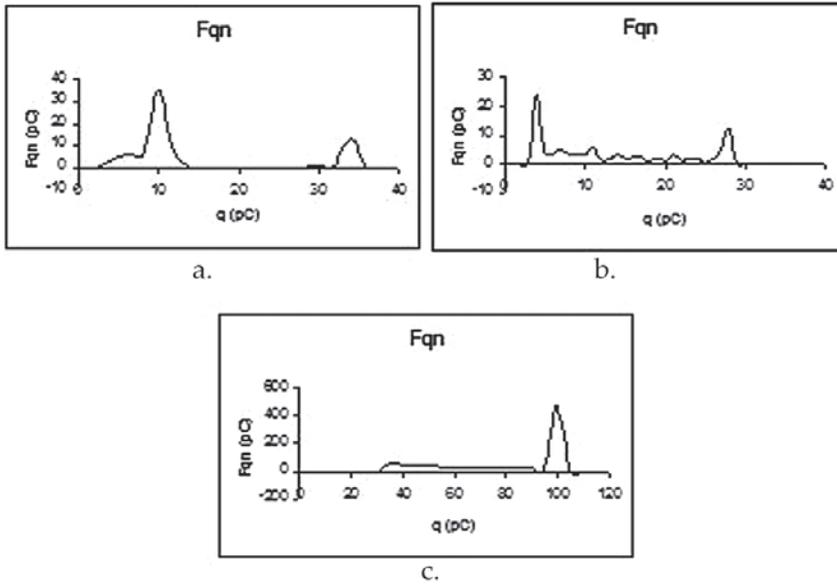


Figura 9. Función de compensación. a) Cable sin defecto. b) Cable perforado. c) Cable con empalme.

Discusión de resultados

La diferencia entre los resultados obtenidos para cada probeta, en función de las descargas parciales, se pueden observar en las figuras 5, 6 y 9. En ellas se muestra que la probeta (o cable) sin defecto, para la cual en principio no debe haber defectos internos, se presentaron descargas parciales. Esto es debido a las imperfecciones en las conexiones de sus terminales o a su insuficiente adecuación, o a ambas causas, porque de lo contrario no habría otra razón para que ellas existieran. No obstante, como no fue posible evitar este inconveniente, se tomaron esas descargas como intrínsecas al ensayo de dicha probeta sin olvidar su procedencia. Consecuentemente, las descargas parciales por esta causa también se presentaron en los otros dos casos (probetas perforada y con empalme), pero en ellos, especialmente en el último, se desprecian frente a las descargas debido al defecto del aislante en cada uno de ellos.

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 de la probeta con empalme, presenta mayor tamaño en sus cavidades y más irregularidades en las interfases entre conductor-aislamiento y aislamiento-malla de tierra, respecto a las probetas perforada 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, lo cual produce 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 figura 5c en comparacion con las figuras 5a y 5b, y en la figura 5b comparado con la figura 5a. 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 más bajas que en las probetas donde no se presentan estos defectos [3]-[6].

Otro fenómeno apreciable en la figura 5 es que en la probeta sin defecto la polaridad de las DPs (debido 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 la probeta perforada el comportamiento es más 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 las probetas perforada 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, lo que hace que el campo neto en el interior de la cavidad sea menor o, en algunas ocasiones, de sentido contrario al campo externo debido a la polaridad de la carga eléctrica inducida en su

superficie, la cual depende de la dirección del campo eléctrico 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 [3], [4].

En la misma figura 5 se observa que las DPs en la probeta sin defecto están en un margen más estrecho respecto a las probetas perforada y con empalme (45°, 80° y 60°, respectivamente). Esto se debe a que en estos últimos sus cavidades tienen geometrías más variadas y contienen gases de diferentes naturalezas y, en consecuencia, de diferentes 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 presencia de DPs en los cables (o probetas) con defectos que en la probeta sin defecto.

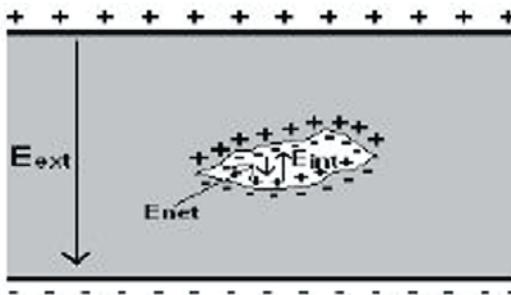


Figura 10. Dinámica del campo eléctrico dentro de la cavidad del dieléctrico

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 6, el cable (o probeta) 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.

De acuerdo con la función de compensación planteada, F_{qn} , y dada en la figura 9, se observa que para el cable sin defecto, realmente, hay dos puntos importantes: en 10 pC y 34 pC, siendo el primero tres veces mayor que el segundo (no hay que olvidar que estos no son defectos del aislamiento, sino de las conexiones); por tanto, a diferencia de lo que permitía visualizar la función $Hq(n)$ en la figura 6a, 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 presenta dos defectos de importancia, en 4 pC y 27 pC, donde el primero es 3,7 veces mayor que el segundo, lo que permite 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 existiendo 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 con la nueva función de distribución, es mucho más probable que el aislamiento, en el cable con empalme, falle primero por el defecto en 100 pC que por el de 35 pC.

4. CONCLUSIONES

Las descargas parciales son una buena herramienta para determinar el grado de deterioro del aislamiento seco. En consecuencia, esta técnica resulta

muy conveniente a la hora de intentar establecer el tiempo de vida útil que le queda a un sistema aislante antes que este falle.

Una parte de las descargas parciales que se presentan en las pruebas de aislamientos son debido a las imperfecciones en las conexiones y a suciedad en las superficies del circuito de potencia.

La función de compensación planteada en este trabajo (F_{qn}) permite observar mejor defectos importantes de una muestra (o probeta) que no era posible ver mediante la función de patrón convencional $Hq(n)$. Por consiguiente, esta nueva función resulta ser una mejor herramienta para cuantificar el grado de importancia de un defecto y para comparar entre defectos de la misma probeta o de probetas diferentes.

De acuerdo con los resultados, para tres probetas del mismo material aislante con diferentes tipos de defectos (sin defecto, con empalme y perforado), la probeta con empalme presenta mayor densidad de descargas parciales y de mayor magnitud que la probeta perforada, y esta última a su vez supera en estas características a la probeta sin defecto. En resumen, en una probeta que presenta un empalme el aislamiento está más deteriorado que en una que presenta perforación y, en consecuencia, es más probable que la primera llegue más rápidamente a un daño total del sistema aislante. La probeta sin defecto, como era de esperarse, tiene menos probabilidad que las otras dos de llegar primera al daño total del aislamiento.

Referencias

- [1] L. Dissado. "Understanding electrical trees in solids: from experiment to theory". *IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 9, N° 4, pp. 1321-1328, 2001.
- [2] J. García. *Descargas parciales*. Valencia, España: Publicaciones ITE, 2002.
- [3] R. Bartnikas. "Partial discharges: their mechanism, detection and measurement". *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 9, N° 5, pp. 2821-2870, 2002.
- [4] M. Akyuz. "Positive streamer discharges in air and along insulating surfaces: experiment and simulation". *Revista Universidad de Uppsala*, vol. 91, N° 2, pp. 554-571, 2002.

- [5] J. Densley, T. Kalicki, Z. Nadolny. "Characteristics of DP pulses in electrical trees and interfaces in extruded cables". *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 8, N° 1, pp. 147-153, 2001.
- [6] LBEIN. *Mecanismo de Fallo y Deterioro de los Materiales Aislantes Eléctricos y su Relación con las Descargas Parciales*. Proyecto MEFADep. Valencia, España. 2003.
- [7] A. Bradley, *Electrical Insulation*. London: Peter Peregrinus, 1984.
- [8] M. Naidu, V. Kamaraju, *High Voltage Engineering*, 2ª ed, USA: McGraw-Hill, 1996.