

## MEDICIONES Y MONITOREO DE DESCARGAS PARCIALES EN MAQUINAS ROTANTES Conceptos Claves

Detlev W. Gross  
Power Diagnostix Systems GMBH  
Bruesseler Ring 95a52074 - Aachen, Germany

Partner Inducor Ingenieria S.A – Buenos Aires – Argentina – [www.inducor.com.ar](http://www.inducor.com.ar)



### Resumen:

En la física básica de la descargas en medios gaseosos, el tiempo inicial de una avalancha de electrones de una señal de DP, bajo atmósfera de nitrógeno, funciona perfectamente dentro de un ancho de banda de medición de cientos de MHz.

Por el contrario, durante los ensayos de descargas parciales, y en términos de propiedades de altas frecuencias, una máquina rotante actúa como una red altamente compleja, y la desigualdad de las impedancias, y otros efectos, dificultan su aplicación bajo distintas bandas de frecuencias.

Dado que un sistema de aislación epoxi-mica, tolera suficientemente las DP, la actividad de las mismas, a menudo sirve como un indicador para otros mecanismos de defectos, como por ejemplo: mecánicos, térmicos, o de influencia ambiental.

### INTRODUCCION

La actividad de las DP, es el indicador más destacado para evaluar el deterioro de la aislación. Con las máquinas rotantes, el uso de las técnicas de medición de DP fue incrementándose a partir de 1960, debido al progreso en el procesamiento de la señal y a las técnicas de medición, y a los instrumentos más poderosos que se volvieron disponibles durante la última década.

### PROPIEDADES DE LA SEÑAL

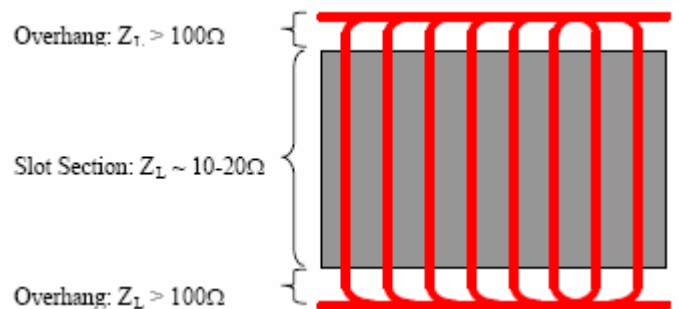
Los impulsos de DP son fuertemente distorsionados mientras viajan a través del bobinado de una máquina rotante, hasta que un mecanismo de acoplamiento los capture. En su origen, los impulsos de DP son simples impulsos abruptos, en tanto que el tiempo de subida del impulso es principalmente determinado por las propiedades del gas que llena la cavidad, delaminación, o grieta en donde ocurren las descargas. En caso de que el aire esté llenando la cavidad, su componente dominante de nitrógeno, causa un aumento de pocos nanosegundos en la avalancha de electrones. Por consiguiente, en su origen, el espectro de amplitud de la señal de DP está distribuido uniformemente desde C.C., a varios cientos de MHz.

### Funcionamiento en Alta Frecuencia

Sin embargo, un bobinado estático, no es un buen conductor de alta frecuencia. Para estudiar aún más el funcionamiento de alta frecuencia de un estator, es útil considerar tal bobinado como una red de secciones de cables y de conductores con diferentes propiedades. Dentro del slot, una resistencia del stator puede ser considerada como un "pobre" cable coaxial. Un cable de alta frecuencia es caracterizado por su impedancia, y su atenuación, como una función de la frecuencia.

La diferencia entre la dimensión del conductor y el grosor de la aislación, así como la constante dieléctrica de la aislación, determina la impedancia del cable. Como resistencia simple, la impedancia se encuentra en un rango por debajo de los 10Ω, hasta por encima de los 20Ω, mientras que las máquinas con menor tensión, muestran siempre una impedancia menor.

El diseño del conductor (bobinado), y especialmente las propiedades de las capas semi-conductoras, determinan la atenuación, que es el segundo parámetro importante. Mediante el conductor, los encintados aislados, incrementan la atenuación por las altas frecuencias, mientras las capas semi-conductoras, actuando como la denominada protección corona, introducen una dispersión, lo cual añade una atenuación mucho más fuerte. La frecuencia resultante depende del grosor y conductividad de la capa semi-conductora. Esta operación es aplicada para obtener cables de potencia extruídos (aplicación de una o más capas de polímeros termofundidos aislantes o semiconductores). Dejando de lado la resistencia del *slot stator*, el conductor puede considerarse como un conductor individual con un potencial contra tierra, lo cual ofrece una impedancia por encima de los 100Ω. La figura 1 ofrece un panorama de las diferentes secciones.



Manipular el funcionamiento de alta frecuencia de un equipo de parámetros distribuidos, tal como un bobinado estático con cables seccionados, se torna relevante cuando las dimensiones de estos seccionados, están al menos en función de la magnitud de la sintonía de interés (1). De este modo, con un slot section de 5m de longitud y  $\epsilon = 4$ , por ejemplo, el modelo se torna relevante para frecuencias superiores a los 3MHz.

$$\lambda = c/2\pi f \quad (1)$$

Donde:  $\lambda$  es la sintonía,  $c$  es la velocidad de fase con  $c = C_0/\sqrt{\epsilon_r}$ , y  $f$  es la frecuencia.

Los impulsos, que viajan a lo largo del cable, se encuentran con una reflexión, en caso de una variación de la impedancia del cable. Un factor de reflexión positivo (2), es descubierto con un incremento de la impedancia del cable.

$$r = (Z_2 - Z_1) / (Z_2 + Z_1)$$

Donde: r es el factor de reflexión, Z<sub>1</sub> es la impedancia del cable anterior, y Z<sub>2</sub> es la impedancia del cable posterior al cambio.

**Por lo tanto, en un turbogenerador de mediano porte, y para frecuencias por encima de los 20MHz, más del 80% de las señales que viajan desde el slot section, hacia el overhang, serán reflejadas, y quedarán atrapadas dentro de ese slot section.**

Se ha encontrado el mismo efecto, pero con un factor de reflexión negativo, cuando la señal busca entrar al slot section.

Las mediciones de campo de varias clases de generadores, verificaron con un analizador de espectros, una fuerte atenuación en las frecuencias superiores a los 40MHz [4].

Por lo tanto, las técnicas de medición de banda ultra ancha (UWB). no resultan adecuadas para analizar el estado de un bobinado estático completo, en las bandas VHF y UHF superiores.

Sin embargo, utilizando técnicas del tipo near-field, esas frecuencias ofrecen excelentes medios para ubicar puntos particulares de actividad de D.P. [7].

### Funcionamiento en Bajas Frecuencias

Los ensayos en varias máquinas rotantes, han mostrado que el bobinado estático es relativamente transparente para las frecuencias de 40kHz e inferiores. La ecuación (1) demuestra que el bobinado de una máquina rotante, es relativamente pequeño si se compara con la longitud de ondas de esas frecuencias, y por consiguiente, las reflexiones de la señal no son relevantes para esta baja banda de frecuencia.

Más aún, la atenuación es baja, y el efecto de dispersión introducido por las capas semiconductoras no afecta a las frecuencias por debajo de un par de MHz.

Sin embargo, eligiendo un ancho de banda, llevado a frecuencias más bajas, otras propiedades de la señal dificultarían la adquisición de los impulsos de carga /DP.

Luego del filtro de banda pasante, normalmente, el ancho de banda de los impulsos de descargas, muestran un tiempo de subida reducido (*rise time*), que está correlacionado con la frecuencia de corte superior (*upper cut-off frequency*), mientras la frecuencia de corte inferior (*lower cut-off frequency*), determina el entorno de amortiguación del tamaño de los pulsos, así como ambas frecuencias de esquina (*corner frequencies*), filtran las de mayor orden. (se define el *corner frequency*, como la frecuencia en donde la potencia de señal de entrada caerá por debajo de un factor de 2).

De este modo, la frecuencia de corte inferior, limita el máximo intervalo de repetición de impulsos consecutivos, los cuales pueden ser correctamente procesados sin la distorsión de amplitud que produciría el llamado efecto *pulse pile-up* (cuando los pulsos

arriban muy próximos en el tiempo, más allá de la rapidez del tiempo de resolución del sistema)

La Fig. 2 ilustra el efecto del *pulse pile-up*. En este caso, el segundo impulso cae dentro del periodo de amortiguación del primero. En consecuencia, la amplitud del segundo impulso es adquirida en forma incorrecta, ya que contiene el pico de su amplitud, más (o menos) la amplitud residual del impulso previo

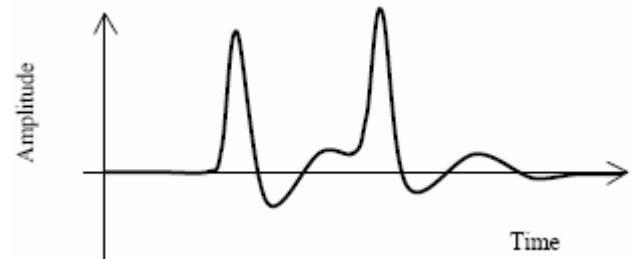


Figura 2- Conformación del impulso. El segundo impulso cae en el entorno de amortiguación del primero.

El sistema de aislación epoxi-mica de una máquina rotante, térmicamente envejecido, produce altos intervalos de repetición de impulsos de descargas, originados por huecos (*voids*), o áreas delaminadas.

La mayoría de las veces, los intervalos de repeticiones de 20,000 a 100,000 impulsos por segundo, se encuentran en máquinas rotantes con aislaciones epoxi-mica envejecidas.

Por consiguiente, para evitar una adquisición errónea de la amplitud del pico del impulso, y su carga, es necesario establecer una menor *cut-off frequency* de 100kHz o superior.

### VISUALIZACION

La visualización de la actividad de DP adquirida, es uno de los aspectos más importantes para ayudar al operador a analizar la actividad de descarga, y para calcular su riesgo.

El display del osciloscopio tradicional de laboratorio (Fig.3), ofrece comúnmente una clara información sobre la posición de la fase, pero no devela la estructura interna (patrón) de DP, ni tampoco el índice de la actividad de descarga.

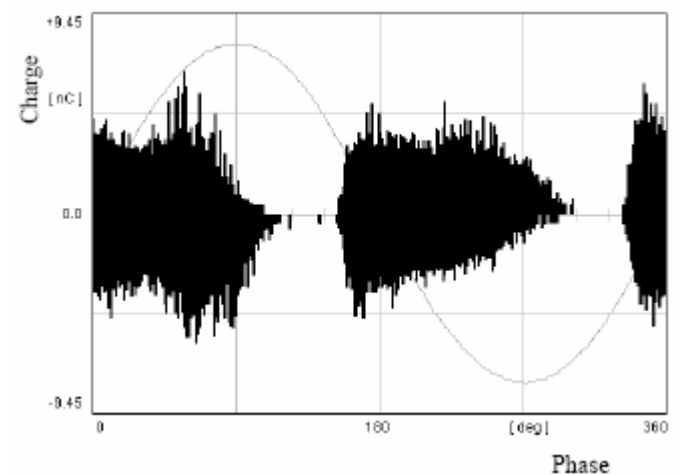


Figura 3- Display de osciloscopio. Los impulsos de DP adquiridos son almacenados como líneas verticales de acuerdo a su polaridad, amplitud y posición de la fase.

Otra manera tradicional de presentar la actividad de descarga, es mostrando el índice contra la amplitud (de carga o de tensión), como se muestra en la Fig. 4. Este gráfico ofrece información concerniente a la configuración del electrodo, pero por supuesto, carece de información sobre la fase.

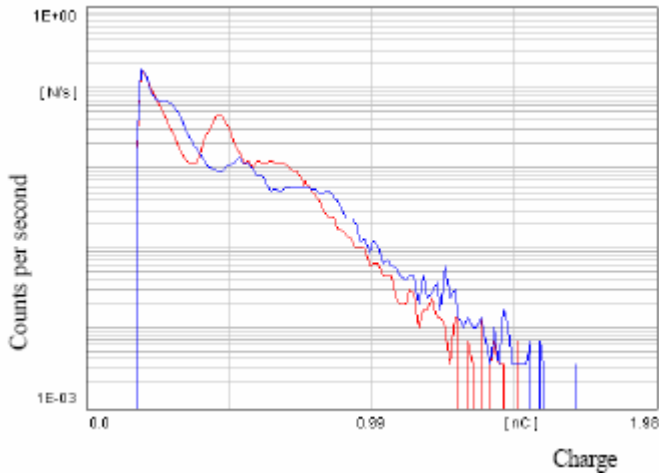


Figura 4-Count rate distribution. La curva roja (azul) muestra la distribución de los puntos positivos (negativos) Vs. la carga.

El patrón de DP, o patrón  $\phi$ - $q$ - $n$ , (fase resuelta), ofrece la distribución de los puntos en función de la fase y la carga. Este gráfico tridimensional, puede visualizarse como un gráfico bidimensional con los puntos- del eje z- codificados con color (Fig. 5).

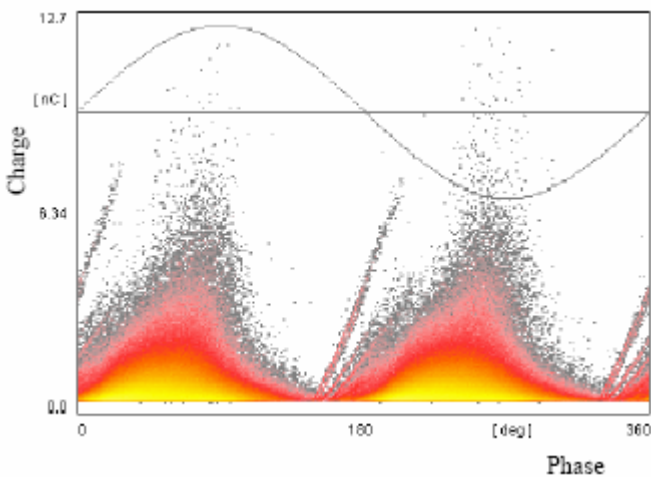


Figura 5- Count rate distribution en función de la fase y carga. Los puntos son codificados con color, con una intensidad de 16Bits. La fase y la amplitud son de 8Bits de ancho cada una. Para dar la orientación de la fase, se expone una onda sinusoidal congelada.

Figura: Descargas superficiales y huecos (voids) en un bobinado de motor nuevo.

Alternativamente, el patrón  $\phi$ - $q$ - $n$  puede ser expuesto como un gráfico tridimensional (Fig.6). Sin embargo, introducir aquí distintas vistas del mismo patrón  $\phi$ - $q$ - $n$ , es más confuso que útil para su análisis.

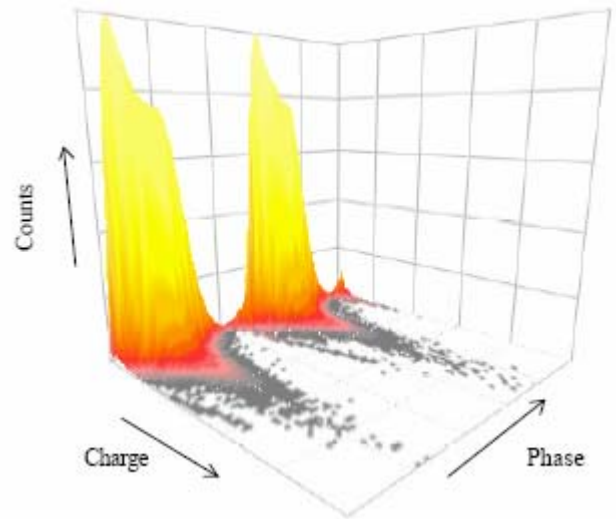


Figura 6- Patrón  $\phi$ - $q$ - $n$  como gráfico tridimensional.

### Resolución del Patrón de DP

El patrón de DP como se muestra en la Fig.5 cuenta con un tiempo de fase de 8Bit, y una resolución de amplitud de 8Bit, contra una intensidad de count de 16Bit. Esto significa que, cada impulso de DP, es asignado a uno de los 65.536 counters del display.

La resolución del patrón visualizado de DP, es el parámetro esencial para permitir que el sistema pueda mostrar detalles relevantes de la actividad de DP.

Como ejemplo, de un "patrón" bastante conocido, la Fig. 7 muestra a la Mona Lisa (Leonardo da Vinci, 1503), utilizando dos tipos de resoluciones diferentes. La copia de la izquierda está expresada en 256 vs. 256, mientras que la copia de la derecha utiliza sólo 32 vs. 64.



Figura 7- Influencia de la resolución de una imagen, con baja a media densidad de información (Mona Lisa, Leonardo da Vinci)

La Fig. 7 es un ejemplo en donde la densidad de la información de la estructura, es relativamente baja.

Es decir, si el observador espera una estructura de "Mona Lisa", incluso la menor resolución podría ser aceptable, pero tomando otro ejemplo, ahora más difícil, la Fig. 8 muestra un cuadro con una densidad relativamente alta de la información de la estructura (Francisco Guardi, 1763). Aquí, la baja resolución es inadmisibile.



Figura 8- Influencia de la resolución visualizada en una imagen con alta densidad de información (The Doge on the Bucintaur at the Venice Lido on Ascension Day, Francisco Guardi, 1763).

Una pérdida de información similar, es detectada durante la visualización del patrón de DP, en una resolución menor.

En consecuencia, la interpretación y el análisis, realizado tanto por una persona experta como por un sistema experto, es realmente dificultoso.

La Fig. 9 muestra un patrón de DP bipolar, adquirido en una bobina de motor virgen. Aquí, la baja disponibilidad del electrón inicial con la resina epoxi fresca, produce el típico patrón de forma senoide de DP. Con el patrón  $\phi$ -q-n de alta resolución, observado en el lado izquierdo, los trazos de cinco inclusiones largas de gas pueden ser claramente identificados.

Con el patrón de baja resolución, sólo persiste un patrón difuso de una descarga interna. En las fig. [9-10], se pueden apreciar - en forma más detallada - sobre la teoría y simulación del patrón de DP de fase resuelta.

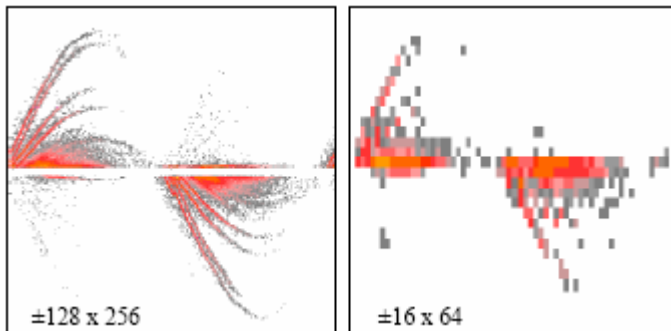


Figura 9- Actividad de múltiples DP /voids en motor

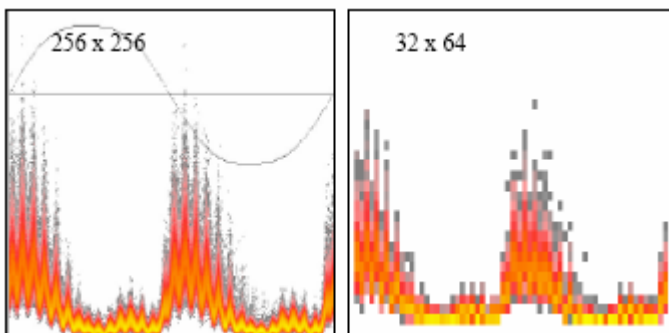


Figura 10- Patrón de descarga modulada de un hidro generador térmicamente envejecido. La modulación se debe a los armónicos en la frecuencia de red.

La Fig. 10 muestra una actividad de DP de un bobinado estático de un hidrogenerador, térmicamente envejecido. Aquí, el patrón de DP, es modulado por el 29º armónico de la frecuencia de potencia. Dichos armónicos dependen frecuentemente del diseño de la máquina rotante. La amplitud de esos armónicos es sólo una fracción de su fundamental, pero tiene una fuerte influencia debido a su fuerte  $dV/dt$  [1].

Con la resolución más baja, esta información se pierde.

### MONITOREO DE DP

Como el sistema de aislación epoxi-mica tolera suficientemente la actividad de DP, la actividad de descarga a menudo puede tomarse como un indicador para otros mecanismos de defectos, tales como la degradación térmica o mecánica (vibración, delaminación, etc.) [1, 5,7].

De este modo, el énfasis es puesto principalmente en la "tendencia" de la degradación, mediante la instalación de dispositivos de monitoreo continuo de la máquina. El dispositivo de monitoreo, debe ofrecer además un acceso remoto para evitar problemas en el viaje, y para permitir un diagnóstico remoto en caso de que una alarma programada haya sido activada.

Preferentemente, los capacitores de acoplamiento son utilizados para acoplar la actividad de las DP. Para simplificar la instalación, dichos *couplers* generalmente son instalados en las terminales de la máquina, a menudo directamente en los *flex links* (Fig. 11).



Figura 11- Capacitor de acoplamiento instalado en el flex link de un generador de turbina de 300 MVA.

De manera alternativa, pueden ser utilizados los capacitores de acoplamiento instalados previamente. Además, los transformadores HF y las bobinas Rogowski, pueden ser utilizados también con un fin de acoplamiento.

En el caso de motores que son alimentados por cables de media tensión, el uso de bobinas Rogowski es ventajoso, ya que la impedancia del cable de alrededor de  $20\Omega$ , sirve como una excelente terminación, para las corrientes de altas frecuencias, que son tomadas por las bobinas Rogowski.

Tecnológicamente, el modelo ICM Monitor, utilizado para el monitoreo de las DP, se presenta en un gabinete estanco.

La unidad de adquisición, la unidad de módem opcional, y la caja de terminación (*coupler termination box*), son usualmente preinstaladas en un gabinete de metal, para simplificar la instalación in situ (Fig. 12).



Figura 12- Unidad ICM Monitor, instalada en un gabinete con módem, caja de terminación, y HF CT para captura de ruidos.

Un cable coaxial tipo RG58 estándar, es utilizado para conectar los tres *couplers* instalados en barras, con los terminales del monitor.

El largo del cable coaxial es irrelevante. Los cables RG587 pueden ser utilizados para una distancia de hasta 100m.

La mayoría de las veces, el instrumento es equipado con un amplificador de pre-procesamiento de banda ancha, que module la energía de la señal hallada en una banda de frecuencia de entre 2 y 20MHz. Esto es de acuerdo a las conclusiones de la aplicabilidad de diferentes bandas de frecuencias para el monitoreo on-line, como se ha mencionado anteriormente.

En parte, para ambientes tranquilos, fue utilizado un acoplamiento directo en la banda de frecuencia de entre 100 y 800kHz.

Adicionalmente, un programa de PC es provisto para analizar las actividades registradas de descargas, almacenadas en la unidad de adquisición ICM Monitor.

Siguiendo un esquema programado, este programa se contacta con el ICM Monitor, mediante el módem análogo o mediante una interfase TCP/IP. De este modo, una PC central puede cuidar una multitud de unidades de adquisición.

Desde 1995, alrededor de 70 sistemas de monitoreo on-line continuo de DP, han sido instalados en todo el mundo.

## CONCLUSIONES

Las señales de DP de altas frecuencias, que ofrecen un amplio espectro en su origen, son atenuadas severamente mientras viajan por el bobinado de una máquina rotante.

Modelar el funcionamiento de alta frecuencia de cada bobinado con secciones de cables de diferentes propiedades, ayuda a comprender el funcionamiento en alta frecuencia de un bobinado de una máquina rotante.

El patrón  $\varphi-q-n$ , con los puntos visualizados codificados a color, contra la amplitud de la fase y de la carga, puede utilizarse para realizar un análisis más profundo de la actividad de DP, siempre y cuando se mantenga una resolución mínima de fase y amplitud.

Los sistemas de monitoreo de DP, diseñados para realizar seguimientos continuos on-line, junto con las capacidades de realizar diagnósticos remotos, utilizando un patrón en fase resuelta, transmitido vía módem, son exitosamente instalados en máquinas rotantes desde 1995.

## REFERENCIAS

1. Binder, E., et al, "Development and Verification Tests of Diagnosis Methods for Hydro generators", CIGRE 38th Session, Paris, France, August 2000, Paper 11-301.
2. Niemeyer, L. "A Generalized Approach to Partial Discharge Modeling", IEEE Trans DEI, Vol. 2, No. 4, August 1995, pp. 519-528.
3. Heitz, C. "A Generalized Model for Partial Discharge Processes Based on a Stochastic Process Approach", J. Phys. D, September 1999, pp. 1012-1023.
4. Fruth, B., Gross, D. "Partial Discharge Signal Generation Transmission and Acquisition". IEE Proc.-Sci. Meas. Technol., Vol. 142, No. 1, January 1995, pp. 22-28.
5. Bélec, M., Hudon, C., Lamothe, S. "Recognizing Partial Discharge Activity using PRPD Analysis", 2001 Doble Client Conference, Boston, MA, April 2001, Paper 7G.
6. Fruth, B., Gross, D. "Phase Resolving Partial Discharge Pattern Acquisition and Spectrum Analysis", Proc. of the ICPDAM, July 1994, 94CH3311-8, pp. 578-581.
7. Hudon, C., Torres, W., Bélec, M., and Contreras, R. "Comparison of Discharges Measured from a Generator's Terminals and from an Antenna in Front of the Slots". EIC/EMCW Conference, Cincinnati, Ohio, October 2001, 01CH37264C.

FUENTE: **INDUCOR INGENIERIA S.A.**

ELECTRICAL TESTING GROUP  
H.V. PARTIAL DISCHARGE  
Latin American Sales & Applications  
[www.inducor.com.ar](http://www.inducor.com.ar)