



**COMISION DE INTEGRACION ELECTRICA REGIONAL**  
**COMITE NACIONAL URUGUAYO**

Área de Generación & Transmisión

Congreso CIER 2000 , Buenos Aires, Nov./2000

Identificación del Trabajo: C00-UY-44/G1.6

Montevideo, Uruguay, agosto 2000.

*“TECNOLOGÍA, NEGOCIOS Y REGULACIÓN EN EL SECTOR ELÉCTRICO”*

**NUEVAS TECNOLOGÍAS ESTADÍSTICAS PARA LA SUPERVISIÓN DEL  
ESTADO DE GENERADORES USANDO MEDICIÓN DE DESCARGAS  
PARCIALES.**

Autor/es: Dr. Ing. DANIEL SLOMOVITZ<sup>1</sup>, Ing. Tec. LEONARDO TRIGO<sup>1</sup>,  
Ing. JORGE FERNÁNDEZ DAHER<sup>2</sup>

Empresa o Entidad: 1. UTE-LABORATORIO 2. Anteriormente UTE-LABORATORIO

**PALABRAS-CLAVE:**  
GENERADORES, MANTENIMIENTO  
PREDICTIVO, DESCARGAS PARCIALES,  
MEDICIÓN ON-LINE, AISLACIÓN.

Dirección: Paraguay 2385, Montevideo,  
Uruguay  
Código Postal: 11 800  
Teléfono: (598 2) 924 2042  
Fax: (598 2) 924 2004  
E-Mail: labute@ute.com.uy

**Resumen:**

En este trabajo se presenta la implementación de un sistema de supervisión de descargas parciales compuesto por un equipamiento adquisidor de las señales, y programas de control y estudio estadístico diseñados específicamente para esta aplicación. El sistema ha sido desarrollado en el Laboratorio de UTE y es aplicado al parque de generadores de Uruguay y otros países de la región. El equipo adquisidor posee sensores, para recoger los pulsos de las descargas, de tipo no invasivo. No es necesario afectar en manera alguna la aislación de las máquinas, por lo cual no se agrega ningún factor de riesgo adicional. Los pulsos son acondicionados por detectores y filtros, los cuales se ajustan a cada máquina de forma de lograr la máxima sensibilidad y selectividad. Se usan frecuencias medias y grandes anchos de banda, lo cual permite vigilar todo el arrollado, y no sólo las primeras espiras tal como sucede con detectores de alta frecuencia.

El sistema adquisidor está basado en equipos comerciales de serie, lo cual reduce sustancialmente los costos y no obliga al usuario a depender de un solo suministrador.

Se describen, en el trabajo, ejemplos de aplicación e interpretación de los resultados.

**1. Introducción**

El mantenimiento predictivo del estado de la aislación de generadores de alta tensión es aplicado como técnicas de rutina desde las primeras décadas del siglo XX. Para esto, se emplean variadas técnicas tanto eléctricas como mecánicas, acústicas y otras. Dentro de las técnicas eléctricas se encuentran mediciones en corriente continua, determinación de pérdidas dieléctricas (tangente delta) y medición de descargas parciales. Estas últimas están relacionadas con el estado de la aislación y constituyen un indicador de defectos incipientes. La mayoría de las fallas eléctricas tiene una evolución relativamente lenta. Previo a la aparición de una falla catastrófica, en general se observa un incremento de la actividad de descargas parciales con cambios en su estructura estadística. En las últimas décadas se han desarrollado sistemas de medida y procesamiento de las señales, los cuales permiten el conteo de las descargas [1, 2]. En los inicios de la técnica de medición de descargas parciales, sólo era posible medir el valor de la descarga máxima. Sin embargo, con el advenimiento de técnicas digitales es posible actualmente detectar cada descarga en forma individual y clasificarla de acuerdo a su amplitud y la fase en la cual ocurre, relativa a la tensión sinusoidal aplicada. Con esta información, diversas técnicas estadísti-

cas evalúan un diagnóstico del estado de la aislación [3 a 6]. Entre ellas, se destacan distribuciones de los máximos y de valores medios, distribución de Weibull, distribución por amplitud, diagrama de fases, diagrama tridimensional.

## 2. Técnicas digitales

La metodología tradicional de medición y análisis de descargas parciales en máquinas generadoras, consiste en observar el máximo de las descargas presentes. El fenómeno de descargas parciales es de tipo aleatorio, por lo cual existen grandes dificultades para caracterizarlo por un único parámetro. Por otro lado, dicho máximo es muy difícil de evaluar por observación visual puesto que la señal en la pantalla está en permanente cambio. Este hecho es reconocido en las normas [7], aconsejándose no tomar en cuenta picos esporádicos y registrar únicamente picos repetitivos. La experiencia del operador pasa a ser un elemento decisivo en el resultado, restando objetividad al ensayo. Por otro lado, esta metodología no se adapta para evaluar ningún otro parámetro estadístico.

Para obviar estos inconvenientes y aportar más información al resultado de los ensayos, desde hace algunas décadas se vienen proponiendo nuevos métodos. Todos necesitan del registro de los pulsos. En general, se almacena el pico de cada pulso, su ubicación en el tiempo y en relación a la onda de tensión aplicada, así como su polaridad. Se computa la cantidad de pulsos por período en función de la distribución de amplitudes y de la fase relativa respecto a la senoide de tensión, el ajuste de la distribución según una gráfica de Weibull, y se realiza un análisis tridimensional para determinar patrones con los cuales asociar posibles defectos.

Las figuras 1 a 7 muestran estos gráficos para una máquina de 36 MVA de 7 kV en condiciones normales de envejecimiento.

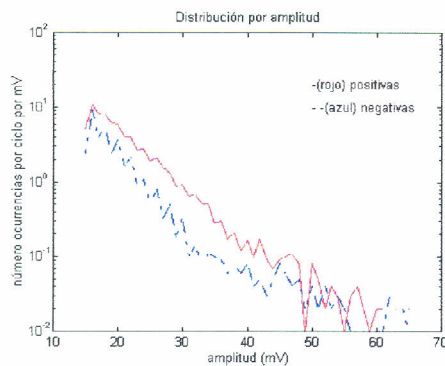


Fig. 1. Distribución de amplitudes

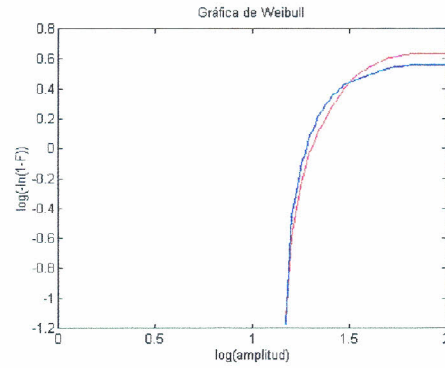


Fig. 2. Gráfica de Weibull

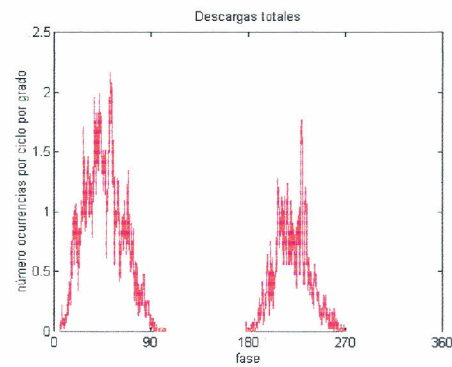


Fig. 3. Diagramas de fase

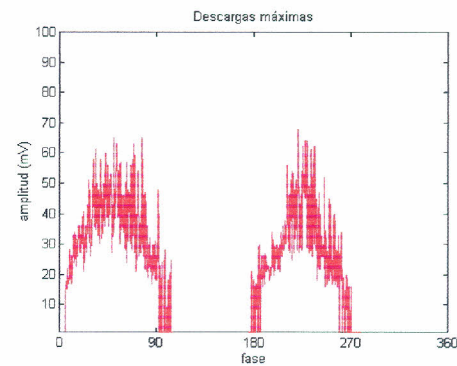


Fig. 4. Diagramas de fase

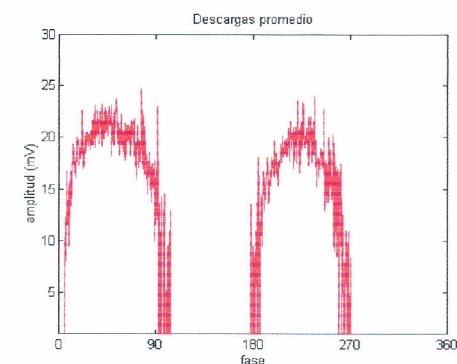


Fig. 5. Diagramas de fase

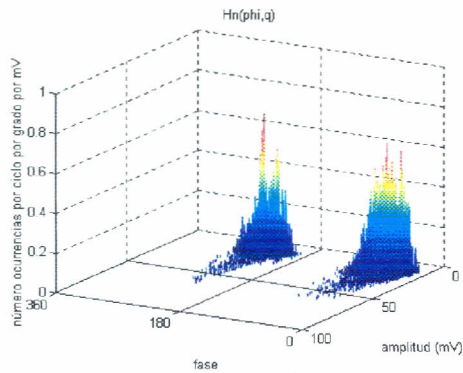


Fig. 6. Diagrama tridimensional

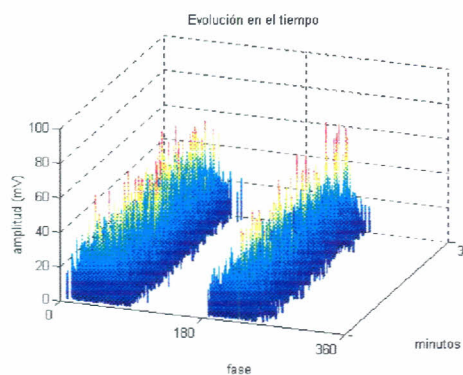


Fig. 7. Evolución en el tiempo

La Fig. 1 muestra la distribución por amplitud. Se caracteriza por tener una gran cantidad de descargas de bajos valores de amplitud, y de ir disminuyendo la cantidad de descargas a medida que aumentan las amplitudes. La Fig. 2 muestra la distribución de Weibull. Mediante la misma es posible separar distintas causas que originan las descargas parciales. Las Fig. 3 a 5 muestran descargas totales, descargas máximas y promedio, respectivamente. En dichas gráficas se observa el ángulo de ocurrencia de las descargas, pudiéndose discernir efectos corona entre otros. En la Fig. 6 se observa la cantidad de descargas en función de la amplitud y la fase de ocurrencia de las mismas. La Fig. 7 muestra la amplitud y la fase de las descargas y su evolución en el tiempo.

Son síntomas de diversos problemas, diferencias entre descargas positivas y negativas, apartamientos de una línea recta en la gráfica de Weibull, fase de descargas fuera de las zonas de cruce por cero, etc. Estos resultados pueden analizarse manualmente, pero también es posible aplicar diversas técnicas estadísticas para calcularlos. En esta forma se independizan del operador y posibilitan lograr un sistema totalmente automático.

### 3. Soporte físico del sistema

El equipamiento disponible comercialmente para aplicar estas técnicas, en la mayoría de los casos, es de tipo dedicado. Esto es, utilizan electrónica y programas especialmente desarrollados para esta aplicación. Si bien esta filosofía tiene ciertas ventajas, desaprovecha los enormes avances en los equipos de mediciones de uso general. Existen actualmente adquisidores de señal digitales de muy bajo costo y excelentes prestaciones. Por otro lado, el mercado de software ofrece muy potentes plataformas de desarrollo de programas. El uso de estos sistemas comerciales de venta masiva, conduce a una significativa reducción de costos y a una solución flexible y actualizable. Con sistemas dedicados, la actualización de los mismos requiere el cambio de hardware tanto por la parte de adquisición de señal como por los sistemas procesadores de la información; siendo los nuevos también de tipo dedicado.

El sistema propuesto puede ser actualizado con muy bajos costos al usar hardware comercial.

#### 3.1 Descripción

El sistema desarrollado por nuestro Laboratorio incluye sensores analógicos, un osciloscopio digital, circuitos de interfase y una computadora. Los sensores acoplan los pulsos generados en los bobinados del estator al osciloscopio. El osciloscopio detecta la cresta valorada de las descargas y envía los datos a la computadora a través de su interfase IEEE 488. Se presentan detalles de estos bloques en las secciones siguientes.

##### A. Sensores analógicos.

El sistema usa circuitos capacitivos para detectar los pulsos de las descargas parciales. La impedancia de medida se conecta en serie con el capacitor de acoplamiento. Dicha impedancia presenta un valor muy bajo a frecuencia de red, pero alto para los pulsos de descarga. La señal detectada es procesada por filtros pasabanda destinados a eliminar otras fuentes que ocasionarían interferencias. El ancho de banda de todo el sistema es suficientemente grande como para permitir detectar descargas parciales en toda la extensión del arrollado. Otros autores han propuesto sistemas de muy alta frecuencia y anchos de banda angostos, pero presentan el problema de restringir el área vigilada a unas pocas espiras cercanas a la ubicación de los sensores. Esto es así porque la atenuación que presentan los arrollados es mayor a alta frecuencia que en la banda

de paso. En general, en el sistema propuesto la frecuencia superior de corte está alrededor de 250 kHz. La salida de este sistema de pre-procesamiento alimenta al osciloscopio. El valor de la cresta del pulso es proporcional a la carga eléctrica de los pulsos. La forma de salida de los pulsos es de tipo oscilatorio amortiguado con tiempos del orden de 20  $\mu$ s.

### B. Osciloscopio digital

Dada la gran cantidad de descargas por ciclo que existe en aislaciones de generadores de alta tensión, no es posible registrar la forma de cada pulso. Eso demandaría una gran cantidad de memoria. Tampoco es relevante la forma de cada pulso, en virtud de que la misma depende sustancialmente de sistema de acondicionamiento de la señal y de la función de transferencia de la misma máquina. Las descargas en sí mismas transcurren en tiempos mucho menores a los tiempos de los pulsos recibidos por el sistema adquiredor.

Nuevos osciloscopios digitales de bajo costo han aparecido, con capacidades de detección de tensión de cresta. El registro total de tiempo es dividido en ventanas de longitud fija. El osciloscopio muestrea a su máxima velocidad, pero sólo guarda el valor máximo y mínimo de los picos en la ventana de tiempo. Con esta técnica, la cantidad de información es pequeña, por lo tanto ocupa poca memoria y puede transferirse rápidamente a la computadora. El largo del registro se coordina con el ancho de los pulsos para mayor aprovechamiento del sistema. Debe cumplirse que la cresta registrada en cada ventana corresponda a un solo pulso de PD. Con este modo de adquisición, no hay necesidad para el software de encontrar crestas, lo cual reduce el tiempo del proceso. El tiempo total necesario para adquirir y transferir a la computadora 200 ciclos de frecuencia de red está en menos de 3 minutos para el sistema propuesto.

### C. Software

El software se desarrolló bajo LabWindows CVI 5.0. Él controla la interfaz IEEE 488 de la computadora, envía las órdenes al osciloscopio y salva a disco duro la información recibida. El usuario puede escoger el número de ciclos a ser adquirido. Los datos se guardan en archivos que contienen información sobre la magnitud y posición de los pulsos en el ciclo de tensión de alimentación. Un procedimiento de Matlab fue desarrollado para procesar estos archivos automáticamente. La magnitud de las descargas es analizada según la distribución estadística del

número de pulsos como una función de carga aparente.

Otro análisis realizado por el software es el ajuste de los datos de la distribución acumulada en un gráfico de Weibull [3]. La distribución de pulsos de descargas parciales vs. la amplitud de la carga se ajusta a una distribución de Weibull de dos parámetros cuando las descargas parciales tienen todas la misma causa. Por ejemplo, si son generadas por el mismo tipo de defecto. Una distribución mixta de Weibull de cinco parámetros puede ser apropiada cuando se sobreponen fenómenos de descargas parciales de dos naturalezas diferentes. De esta manera el software puede evidenciar y separar los dos fenómenos simultáneamente activos. El mismo problema también se analiza por medio del análisis de la forma de las distribuciones de ángulo de fase y momentos de alto orden en las distribuciones del ángulo de fase. El software evalúa y dibuja las distribuciones de fase y calcula los momentos del alto orden de asimetría de las distribuciones, skewness y kurtosis (Tabla 1.).

parámetros		Fase azul	Fase amarilla	Fase roja
descargas totales	skewness +	0.24	0.26	0.42
	skewness -	0.17	0.21	0.23
	kurtosis +	-0.51	-0.52	-0.28
	kurtosis -	-0.25	-0.45	-0.43
descargas máximas	skewness +	0.06	0.18	0.18
	skewness -	0.00	0.09	0.14
	kurtosis +	-0.88	-0.85	-0.85
	kurtosis -	-0.66	-0.86	-0.86
descargas promedio	skewness +	0.07	0.13	0.15
	skewness -	0.04	0.09	0.16
	kurtosis +	-1.03	-0.95	-0.93
	kurtosis -	-0.85	-0.96	-0.81

Tabla 1. Skewness y Kurtosis

La Fig. 8 muestra el aspecto general del equipamiento descrito. Se destaca la implementación basada en equipos de serie.



Fig. 8. Implementación del equipo propuesto

#### 4. Conclusiones

En este trabajo, se ha descrito el desarrollo de equipos de pruebas de descargas parciales para generadores de alta tensión. El sistema de medida se basa en equipos disponibles comercialmente, así como la plataforma del software. El sistema adquiere las señales de las descargas parciales y analiza los datos por medio de procedimientos estadísticos. La información de salida se muestra por diferentes gráficos y parámetros.

#### 5. Referencias

- [1] M. Andrade, J. Fernández, D. Slomovitz, "Diagnóstico del estado de la aislación de alternadores basado en ensayos de alta tensión," *CIER, Rio de Janeiro, Brasil*, October 1997.
- [2] V. Warren and G. C. Stone, "Recent developments in diagnostic testing of stator windings", *IEEE Electrical Insulation Magazine*, Vol. 14, No 5, pp. 16-24, September/October 1998.
- [3] A. Contin and G. Rabach, "PD Analysis of Rotating ac Machines," *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, Vol. 28, No. 6, pp. 1033-1042, December 1993.
- [4] G. Rabach, A. Contin, F. Razza and M. Visintin, "Diagnostic tests and interpretation criteria for winding maintenance and refurbishment of large motors," *Colloquium on Maintenance and Refurbishment of Utility Turbogenerators, Hydrogenerators and Large Motors*, Florence, Italy, April 1997.
- [5] J. Fernández, W. Mandl, D. Slomovitz, "Digital techniques for partial discharge measurement on high voltage generators and motors," *Colloquium on Maintenance and Refurbishment of Utility Turbogenerators, Hydrogenerators and Large Motors*, Florence, Italy, April 1997.
- [6] J. Fernández, D. Slomovitz, W. Mandl, L. Trigo, "New diagnostic techniques for large utility generators," *1998 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, Washington DC, USA, June 1998.
- [7] IEC Publication 270 (1981-01), Partial discharge measurements.