



INNOVACIÓN DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN DE DESCARGAS PARCIALES DE UN LABORATORIO DE ENSAYOS DE AT

Ing. M. del Pozo*

Ing. R. Alvarez*

Ing. C. Wall*

*** IITREE-LAT - Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, Argentina**

1. RESUMEN

Es indudable que en los últimos años las técnicas de procesamiento digital de señales han evolucionado fuertemente con el uso de computadores. El instrumental destinado a los ensayos de alta tensión no ha estado ajeno a dicha evolución. Las nuevas técnicas no sólo permiten variadas visualizaciones durante las pruebas, sino que además posibilitan almacenar digitalmente los resultados para su posterior interpretación, estudio y análisis.

Entre los instrumentos de ensayos que han experimentado una mayor evolución, se destacan aquellos destinados a la medición de las descargas parciales (DPs). En la actualidad, la mayoría del instrumental de primera línea para la medición de DPs, permiten la realización de ensayos tanto en laboratorio como en campo, prácticamente con los mismos márgenes de sensibilidad y exactitud.

Este tipo de instrumental permite además, realizar procesamientos estadísticos y confeccionar patrones de DPs de los diferentes sistemas dieléctricos ensayados.

A partir de éstas nuevas posibilidades merced al procesamiento digital y de la relevancia propiamente dicha de las DPs, en la actualidad este tipo de ensayos es uno de los más usados en equipamiento de sistemas de potencia.

Por otro lado, si bien los instrumentos “adquisidores” de DPs han evolucionado, el principio de medición y los medios a partir de los cuales obtienen las señales, siguen siendo los mismos de siempre: divisor capacitivo; calibradores de referencia, filtros pasa altos y pasa bajos, etc.

De esta forma, es posible modernizar la instalación de medición de DPs de un laboratorio incorporando “unicamente” un medidor/adquisidor de última generación.

Sin embargo para que la nueva instalación permita realizar ensayos normalizados, es necesario considerar una serie de requerimientos a la hora de la implementación.

En el presente trabajo, se describe la puesta en marcha de un sistema de medición de DPs de un laboratorio de ensayos de AT, en el cual se reemplazó un medidor de DPs de antigua generación por uno digital de nueva generación, operado íntegramente desde un computador.

En la puesta en marcha se ha considerado como referencia excluyente, la norma IEC 60270-2000 [1].

Para la implementación del nuevo instrumento fue necesario adaptar el resto de los elementos que componen el sistema de medición (divisores capacitivos, filtros, etc.), de forma que la instalación resultante cumpla con los requerimientos establecidos en la norma de referencia.

2. PALABRAS-CLAVES

Descargas parciales - evolución de instrumental - adaptaciones y calibración - ensayos normalizados - norma IEC 60270-2000.

3. INTRODUCCIÓN

Un sistema de medición de DPs básicamente consta de un medidor o adquisidor “M”; un conjunto de

filtros “Z”, un divisor capacitivo “Ck y Zm”, una fuente de alta tensión “U”, un calibrador “Ca”, y eventualmente una jaula de Faraday (por ejemplo, para casos de mediciones de bajos niveles en laboratorios), como se representa en la Fig. 1.

Hasta hace un tiempo, el IITREE disponía de un sistema de medición de DP's analógico. El instrumento dispone de un puente diferencial para poder realizar mediciones de bajo nivel de DP's en cargas capacitivas importantes. Esta disposición hace que la ejecución de las mediciones resulten precisas pero complejas. Con un sistema de estas características sólo es posible realizar mediciones del valor de la carga aparente “q”, en general realizables en una sala blindada, lo cual limitaba el campo de investigación y desarrollo; siendo muy dificultosas las mediciones en campo y en ambientes perturbados.

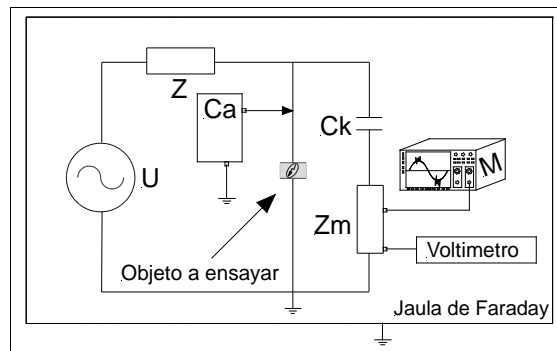


Fig. 1 - Esquema de un sistema de medición de DP's

Por todo ello y con el objeto de actualizar el instrumental y posibilitar la realización de mediciones, análisis y estudios modernos que las actuales técnicas de procesamiento de señales permiten, se incorporó un instrumento “Adquisidor”, pero manteniendo las restantes instalaciones preexistentes: divisor capacitivo; calibradores de referencia, filtros pasaaltos y pasabajos, etc..

4. ESPECIFICACIÓN DEL ADQUISIDOR

Inicialmente se definieron cuales eran los requisitos esperados del equipo a adquirir, considerando fundamentalmente las necesidades de aplicación: investigación y desarrollo con técnicas modernas en procesamiento de los datos.

Para ello se realizó un análisis de cuales de los componentes del sistema de medición preexistente eran aptos para, junto al futuro instrumento Adquisidor, poder cumplir con los objetivos esperados. Para facilitar éste análisis, se establecieron requerimientos primarios (de carácter excluyente) y secundarios (de carácter remisibles).

Entre los principales requerimientos primarios se consideró:

- Cumplir con los lineamientos establecidos en la NORMA IEC 60270/2000 en cuanto a las características de los medidores.
- Rango de medición: se medirán descargas inferiores a los 5 pC (para el caso de cables), hasta del orden de los 5 nC para el caso de los motores y generadores.
- El instrumento debe ser compatible con divisores capacitivos de 100 kV (HAEFELY-ASEA-MICAFIL) y 300 kV (HARTMANN & BRAUN - Gas).
- Disponibilidad de interfaces con PC (software y hardware) para permitir el procesamiento de datos y graficar la localización de las descargas en la onda de 50 Hz aplicada durante la prueba.
- Inmunidad a perturbaciones externas cuando se realizan mediciones en campo.



Algunos de los requerimientos secundarios fueron:

- Transportable y de fácil conexión.
- Operar con CA 220 V @ 50 Hz.
- Marca reconocida en el mercado.

5. CARACTERÍSTICAS DEL ADQUISIDOR INCORPORADO

En base a los requerimientos se elaboró una especificación que permitió, a partir de un análisis de las diferentes ofertas, incorporar el nuevo Adquisidor.

Para la selección se tuvieron en cuenta de forma excluyente los requisitos primarios, no obstante, del análisis comparativo se comprobó que la mayoría de los instrumentos considerados presentaban analogías: procesamiento digital, rangos de medición, flexibilidad para su adaptación, etc.

El Adquisidor incorporado, es íntegramente digital, su operación se realiza exclusivamente a través de un software. Cubre un amplio rango de aplicaciones, empleándose en distintos tipos de ensayos, con objetivos diferentes. Permite evaluar el estado de equipamientos, identificar y localizar defectos.

Se caracteriza por su elevado rechazo digital del ruido. Esto lo logra mediante un canal auxiliar (“Gate”) que capta el ruido circundante al objeto bajo ensayo y lo “contrarresta” con la señal que entra por el canal de medición de DPs. De esta forma mediante un algoritmo adecuado, todas aquellas señales que son comunes a ambos no se muestran a la salida como DPs.

Dispone de una entrada para la medición de tensión, que puede utilizarse además, como señal de sincronismo. Las señales DPs, medición de tensión, y del “Gate” son pre-amplificadas antes de ingresar al adquisidor por pre-amplificadores externos.

Las principales características del Adquisidor son:

- | | | | |
|-------------------------------------|-----------------------|---------------------------------|-----------------------|
| • Q mín. detectable (50 Ω): | < 0,1 pC | • Rango de ganancias: | 1, 2,...200, 400, 800 |
| • Impedancia de entrada: | 10 k Ω //50 pF | • Frecuencia de corte inferior: | 40, 80, 100 kHz |
| • Ancho de banda: | 20 kHz - 1 MHz | • Frecuencia de corte superior: | 250, 600, 800 kHz |
| • Sensibilidad de entrada: | < 200 μ V | • Resolución: | 12 bit |

6. ADAPTACIÓN DE LAS INSTALACIONES PREEXISTENTES CON EL ADQUISIDOR

Luego de la incorporación de un nuevo Adquisidor de DPs fue necesario analizar, verificar y eventualmente adaptar el resto de los elementos que componen el sistema de medición:

- | | |
|---------------------------------------|-----------------------------|
| • Divisor para la medición de DPs | • Filtros |
| • Divisor para la medición de tensión | • Voltímetro |
| • Calibrador | • Jaula de Faraday |
| • Fuente primaria | • Cables y demás accesorios |

Un detalle importante a considerar es el ancho de banda de todo el sistema y la característica de transferencia. En la mayoría de los casos los fabricantes de los divisores capacitivos mantienen accesible algunos de los elementos constitutivos de baja tensión de forma de poder adaptarlo, de ser necesario, a diferentes instrumentos de medición.

A partir del análisis realizado, se concluyó que solo fue necesario adaptar / modificar el divisor capacitivo para la medición de DPs; manteniendo las configuraciones y conexiones del resto del sistema.

6.1. Adaptación del divisor para la medición de DPs

El divisor está constituido por un capacitor de alta tensión y uno de baja tensión. A su vez, en el capacitor de baja tensión se disponen dos ramas de filtros: una para la medición de DP (pasa alto) y otra para la medición de la tensión aplicada (pasa bajo).

El primer problema que debió resolverse en el nuevo sistema fue adaptar la impedancia del nuevo Adquisidor con la del divisor que provee la señal de DP. Para ello se realizó un barrido en frecuencia con el fin de verificar el comportamiento del divisor cuando se lo carga con una impedancia equivalente a la del nuevo Adquisidor.

Para la realización del barrido en frecuencia se conectó al divisor una fuente de corriente en la cual es posible variar la amplitud y frecuencia. En la etapa de baja tensión se monitoreó la señal por medio de un osciloscopio en el cual se pudo observar el comportamiento del divisor al variar la frecuencia de la fuente con la amplitud constante (Fig. 2).

Con este procedimiento se obtuvo el diagrama de Bode de la Fig. 3. Sobre dicho diagrama se han volcado además, las respuesta en frecuencia requerida por la norma IEC 60270-2000 y la del nuevo Adquisidor especificada por el fabricante. Como puede observarse en dicha figura, para frecuencias de orden de los entre los 90 y 100 kHz la respuesta del divisor presenta una variación debida a la presencia polos y ceros en la función de transferencia.

Esta variación en la respuesta del divisor está comprendida dentro del ancho de banda del instrumento. De no corregirse esta variación, las mediciones de DP en frecuencias a partir de los 90-100 kHz presentarían errores.

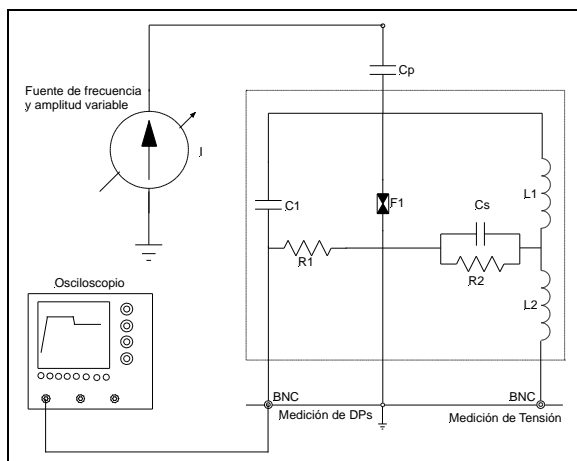


Fig. 2 - Circuito empleado para la realización del barrido en frecuencia del divisor

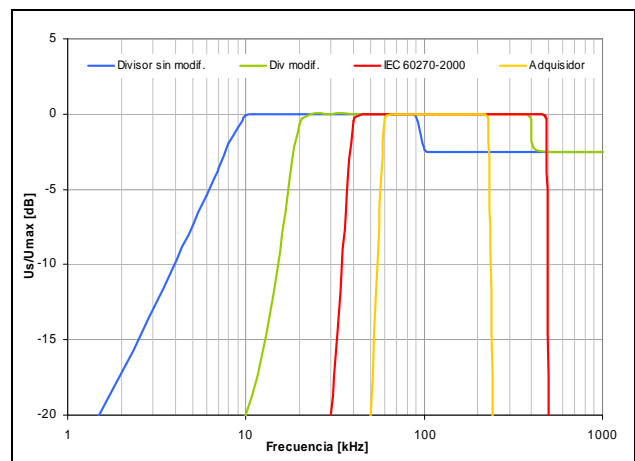


Fig. 3 - Diagramas de Bode

Para solucionar esta situación se modificó la frecuencia de corte inferior del divisor, cambiando el valor del resistor del filtro pasa altos, tomando como referencia el valor de la frecuencia de corte inferior del instrumento y considerando las relaciones:

$$\omega_{corte} = \frac{1}{R_1 C_1} \text{ o bien } f_{corte} = \frac{1}{2\pi R_1 C_1}$$

A partir de ello se calculó el nuevo valor de R_1 (Fig. 2), lográndose que la variación de respuesta (90-100 kHz) del divisor se “desplace” a una frecuencia superior (400-410 kHz), quedando fuera del ancho de banda del instrumento (Fig. 3).

Con esta corrección se consiguió además, que el sistema de medición de DP pase de ser de banda angosta a banda ancha.

7. CALIBRACIÓN DEL SISTEMA

Concluida la adaptación del Adquisidor con las instalaciones preexistentes y habiendo estudiado y comprendido su funcionamiento, se procedió a realizar la calibración del sistema en su conjunto siguiendo los lineamientos establecidos en la norma IEC 60270-2000.

Para la calibración del sistema y de acuerdo a lo establecido en la norma IEC, se verificaron los comportamientos y desempeños de los siguientes parámetros y elementos:

- Frecuencias límites de la impedancia de transferencia
- Factor de escala
- Frecuencia de repetición de pulsos
- Resolución de los pulsos
- Performance del Calibrador

Por otro lado y considerando que el nuevo Adquisidor es capaz de medir y registrar la tensión aplicada durante el ensayo, también se realizó la calibración de tensión.

A continuación se resumen los procedimientos y resultados de cada una de las verificaciones que establece IEC para los sistemas de medición de DPs.

7.1. Frecuencias límites de la impedancia de transferencia

Las frecuencias límites son aquellas para las que la atenuación de las señales aplicadas es de 20 dB. La verificación de dichas frecuencias para la impedancia de transferencia del sistema de medición conformado por el Adquisidor, pre-amplificador y divisor capacitivo, se realizó de acuerdo a lo indicado en el punto 7.3.1 de IEC 60270.

Para ello se empleó un generador de ondas sinusoidal de frecuencia variable conectado al sistema como se indica en la Fig. 4. Variando la frecuencia y dejando constante la amplitud se relevó la característica de transferencia del sistema. A partir de ello se determinaron los valores de frecuencias de corte inferior “ f_1 ” y de corte superior “ f_2 ”, y luego se observan las indicaciones para distintas frecuencias.

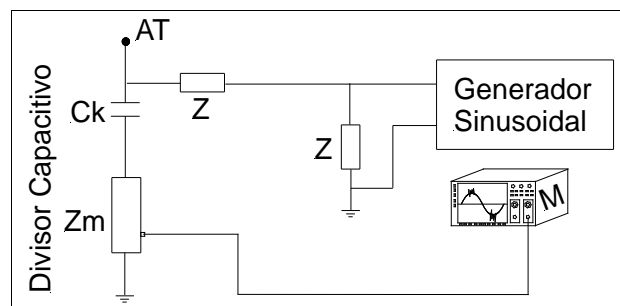


Fig. 4 - Esquema del circuito para medir el ancho de banda

De acuerdo a IEC 60270, los límites de frecuencia de corte, para instrumentos de banda ancha deben estar comprendidos entre:

$$30kHz \leq f_1 \leq 100kHz$$

$$f_2 \leq 500kHz$$

$$100kHz \leq \Delta f \leq 400kHz$$

Con el fin comprobar el desempeño del Adquisidor, y si bien IEC no lo requiere, se verificaron las frecuencias de corte calibrando previamente el sistema en cada rango que dispone el calibrador: 5, 50,

500 y 5000 pC.

Las frecuencias de corte para todos los rangos de calibración fueron de $f_1=30$ kHz y $f_2=300$ kHz. De esta manera se comprobó que las frecuencias de corte superior e inferior del sistema están dentro de los límites establecidos por IEC 60270.

7.2. Factor de Escala

La verificación del factor de escala del instrumento de medición se realizó de acuerdo a lo indicado en el punto 7.3.1 de IEC 60270.

Esta prueba se realiza para verificar la linealidad del sistema de medición de DPs.

La verificación se realizó empleando un calibrador de referencia conformado por una fuente de amplitud variable y frecuencia constante conectada en serie con un capacitor "C" (Fig. 5).

Tal como lo prevé IEC 60270 se calibró para el 100% y el 10% del valor de calibración, a una frecuencia de repetición de 100 pulsos/s. Según requiere IEC, para estos valores no debe existir una variación mayor que el 5%.

Se verificó la linealidad del instrumento calibrando previamente el sistema en cada rango que dispone el calibrador. En la Tabla I se presentan los resultados obtenidos para el rango de calibración de 5 pC.

A partir de los resultados obtenidos se verificó que el factor de escala del Adquisidor y por lo tanto del sistema es menor al 5%, cumpliendo con lo requerido por IEC 60270.

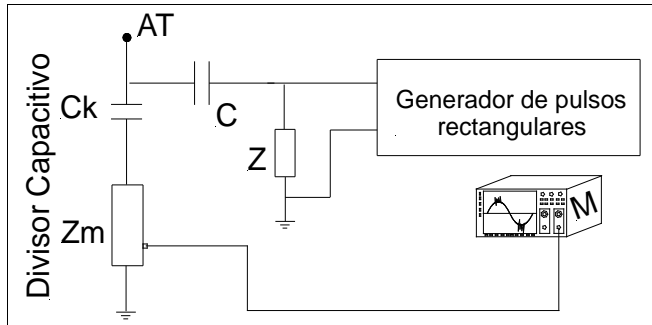


Fig. 5 - Circuito para la verificación del factor de escala

Tabla I - Factor de escala "k", para 5 pC

Nivel [pC]	Factor k	Desviación [%]
5	1,0000	0
3	1,0033	0,3333
1,5	0,9866	-1,3333
1	0,9999	-1,0000
0,9	0,9888	-1,1111
0,8	0,9875	



-1,2500
 0,7
 1,0000
 0
 0,6
 1,0000
 0
 0,5
 1,0200
 2,0000

7.3. Frecuencia de Repetición de Pulsos

La verificación de la frecuencia de repetición de pulsos del instrumento de medición se realizó de acuerdo a lo indicado en el punto 7.3.1 de IEC 60270. Esta prueba se realiza para verificar la respuesta del instrumento de medición ante pulsos de distinta frecuencia.

En este caso, la verificación se realizó empleando el mismo circuito de la Fig. 5.

Como lo requiere IEC, para la calibración se mantuvo constante la amplitud y se registro la respuesta de variación “N” para las frecuencias de 100, 50, 10, 5, 2 y 1 pulso/s.

Los valores registrados para cada frecuencia deben estar comprendidos en los rangos indicados en la Tabla II. En la Tabla III se presentan los resultados obtenidos para el rango de calibración de 50 pC.

N [1/s]
1
2
5
10
50
≥ 100

R_{min} [%]
 35
 55
 76
 85
 94
 95

R_{max} [%]
 45
 65
 86
 95
 104
 105

Tabla III - Desviación de lectura con la frecuencia de repetición de pulsos, para sistema calibrado en 50 pC

Frecuencia
[N pulsos/seg.]
Lectura
[pC]
Desviación
[%]

100
 50.1
 100
 50
 49.7
 99.2
 10
 46.1
 92.0
 5
 43.1
 86.0

Tabla II - Respuesta a la variación de “N” requerida por IEC 60270

2
30.2
60.3

1
20.9
41.7

A partir de los resultados obtenidos se verificó que la variación de la lectura a diferentes frecuencias, cumple con lo requerido IEC 60270.

7.4. Resolución de Pulsos.

La verificación de la resolución de pulsos del instrumento de medición se realizó de acuerdo a lo indicado en el punto 7.3.1 de IEC 60270. Esta prueba se realizó para constatar la resolución de los pulsos que dispone el instrumento.

En este caso, la verificación se realizó empleando el mismo circuito de la Fig. 5.

El calibrador de referencia se mantuvo con una amplitud constante y se elevó progresivamente la frecuencia a partir de 100 pulsos/s, hasta la condición en que no fue posible discriminar los sucesivos pulsos.

Para este ensayo IEC 60270 no establece ningún valor de referencia, y que sólo debe registrarse.

En la Tabla IV, se presentan los resultados obtenidos para los modos de visualización “Scope” y “Elipse” que dispone el software del Adquisidor, para una frecuencia de calibración de 500 pC.

Tabla IV - Resolución temporal de pulsos,
para el sistema calibrado en 500 pC.

Resolución Temporal de pulsos	
Modo Scope	3,1 kHz
Modo Elipse	1 MHz

7.5. Performance del Calibrador

La verificación de los rangos del calibrador se realizó de acuerdo a lo indicado en el punto A.2 del Anexo A de IEC 60270.

Las características de los calibradores pueden variar con el tiempo de aplicación; es por ello que se deben realizar chequeos periódicos de sus características. El ensayo consistió en comparar para cada rango la carga producida por el calibrador con la que produce un calibrador de referencia en el mismo sistema de medición.

El resultado es el promedio de diez lecturas, o bien comparaciones entre los calibradores. Los valores obtenidos se presentan en la Tabla V.

Tabla V - Promedio de valores del calibrador

Nivel calibrador del sistema	Nivel calibrador de referencia	Desviaciones [%]
5,00 nC	5,00 nC	0



XII ERIAC - Encuentro Regional Ibero-americano del CIGRÉ Foz do Iguazú-Pr, Brasil - 20 a 24 de mayo de 2007

500 pC	501 pC	0,2
50,0 pC	50,1 pC	0,2
5,00 pC	5,02 pC	0,2

7.6. Calibración de Tensión

Como ya se ha indicado, el Adquisidor posibilita la lectura del nivel de la tensión aplicada a través de un factor de escala. A su vez dicho factor depende de la constante del divisor capacitivo y de un pre-amplificador.

Si bien el sistema dispone de un voltímetro digital de adecuada exactitud se contrastó la medición de tensión del Adquisidor con el fin de verificar su comportamiento.

Para la calibración se compararon los valores medidos por el Adquisidor y los indicados por el sistema de referencia compuesto por el divisor capacitivo y un voltímetro HAEFELY Type 51 del sistema preexistente.

El contraste por comparación directa fue posible de realizar ya que la impedancia a la entrada del pre-amplificador del Adquisidor es más de dos veces superior a la del voltímetro HAEFELY. De esta manera la salida de tensión del divisor capacitivo, prácticamente se encuentra con la misma carga.

A partir de los resultados obtenidos se concluye que el error máximo en la medición de tensión del Adquisidor es de 3.4 %. Es decir es posible usarlo como respaldo para este tipo de medición.

8. CONCLUSIONES

Se incorporó un Adquisidor que satisfizo todos los requerimientos primarios y la mayoría de los secundarios.

Si bien la mayoría de los instrumentos para la medición de DPs disponibles en el mercado actual presentan analogías: procesamiento digital, diversos rangos de medición, flexibilidad para su adaptación, etc., una correcta especificación para su elección es clave para que el sistema resultante tenga el desempeño esperado.

Por otra parte, la correcta especificación conlleva a que los cambios y/o ajustes que deban realizarse al resto del sistema sean mínimos.

La adaptación del nuevo Adquisidor y de su hardware asociado con el resto del sistema se realizó satisfactoriamente. Para ello debieron realizarse pequeños ajustes en las instalaciones preexistentes.

Con el nuevo sistema de medición de DPs resultante se efectuó la calibración con el fin de verificar que la nueva instalación conformada cumpla con los lineamientos de la norma IEC 60270-2000. A partir de los resultados para cada una de las verificaciones, se concluye que el nuevo sistema de medición de DPs implementado cumple con los lineamientos establecidos por IEC.

9. BIBLIOGRAFÍA

- [1] IEC 60270. Third Edition. 2000-12.-“High-voltage test techniques - Partial discharge measurements”.