

**Comité de Estudos D1 – Materiales y técnicas de ensayo emergentes****INSTRUMENTACIÓN VIRTUAL: VOLTÍMETRO DE CRESTA/EFICAZ PARA ENSAYOS DE ALTA TENSIÓN**

L. CATALANO*
IITREE-LAT
FI-UNLP
Argentina

P. MORCELLE
IITREE-LAT
FI-UNLP
Argentina

H. MAYORA
IITREE-LAT
FI-UNLP
Argentina

E. CALO
IITREE-LAT
FI-UNLP
Argentina

R. E. ÁLVAREZ
IITREE-LAT
FI-UNLP
Argentina

Resumen – Para los ensayos y mediciones de altas tensiones de frecuencia industrial, es necesario disponer de instrumental que, con adecuados niveles de exactitud, permitan medir los valores cresta y eficaz aplicados sobre el objeto bajo ensayo. Los criterios básicos para estas mediciones se establecen en las normas IEC 60060.

Con el avance tecnológico de los últimos años, las mediciones eléctricas se encuentran en un proceso de modernización, contemplando la implementación de instrumentos virtuales. Con ello, un sistema de medición consistiría de una placa adquisidora apropiada y de un software que cumpla los requisitos de medición necesarios. Debido a esto, están bajo estudio las normas IEC 61083-3 e IEC 61083-4 que tratan sobre el hardware y el software de medición respectivamente, para las mediciones de tensiones de frecuencia industrial en ensayos de alta tensión.

El sistema de medición de alta tensión de frecuencia industrial de 300 kV del IITREE está compuesto por un divisor de tensión capacitivo y dos voltímetros analógicos, uno de tensión eficaz y otro de tensión cresta (dividido raíz de 2). El instrumento de valor eficaz es del tipo electrostático y el de valor cresta posee un detector de valor máximo de la onda, que se convierte a corriente y finalmente es medida por un galvanómetro. Ambos poseen una indicación por haz de luz deflectada por un espejo y la cupla antagónica se obtiene con un fleje metálico calibrado. Las calibraciones y mantenimiento de dicho instrumental resultan lentos y costosos.

En el mercado convencional, fácilmente se disponen de instrumentos digitales de valor eficaz, no así de valor cresta de la onda. Por ello, se ha recurrido a la instrumentación virtual, mediante una placa adquisidora que registra la señal (tensión) y un software dedicado que realiza los cálculos correspondientes.

En el presente trabajo se describe la implementación de un nuevo sistema de medición digital virtual, indicando los requerimientos de la placa de adquisición y el desarrollo del software que realiza el cálculo del valor eficaz y cresta a partir de la señal adquirida. Además de las funciones principales de medición, se han podido desarrollar otras funciones respecto a un voltímetro convencional, como la adquisición de la forma de onda, el perfil de tensión y otros parámetros de interés establecidos por la norma. Adicionalmente se complementó con la corrección por condiciones ambientales

Palabras clave: Instrumentación virtual – Alta tensión – Ensayos – Calibración – Voltímetro

1 INTRODUCCIÓN

El reemplazo de los instrumentos analógicos por digitales no es nada reciente, sin embargo, la utilización de estos equipos en las pruebas de alta tensión de frecuencia industrial o continua no fue discutido hasta la década de 2010.

1.1 Normativa

El antecedente más emparentado con este tema tiene que ver con el uso de osciloscopios digitales para la medición de impulsos atmosféricos en pruebas de alta tensión. En este caso ya en el año 1991 IEC publica la norma 61083-1 “*Digital recorders for measurements in high voltage impulse tests - Part 1: Requirements for digital recorders*” [1] cuya última versión es 2001 y se planifica que en 2019 se publique una actualización de la misma. Luego de la normalización de los instrumentos fue necesaria una norma que contemple los softwares utilizados en el análisis de los registros digitales. Fue entonces que IEC publicó en 1996 la norma 61083-2 “*Instruments and software used for measurement in high-voltage and high-current tests - Part 2: Requirements for software for tests with impulse voltages and currents*” [2] cuya última versión es de 2013.

Volviendo a la medición de alta tensión alterna, que es el tema de este trabajo, IEC tiene en proyecto dos normas que serían los equivalentes de las 61083 partes 1 y 2 pero para altas tensiones o corrientes de frecuencia industrial o continua, las cuales serían la 61083-3 [3] para los instrumentos y la 61083-4 [4] para los softwares.

1.2 Instrumentación virtual

En la familia de instrumentos digitales la tendencia tecnológica evolucionó hacia lo que se conoce como instrumentación virtual. Los instrumentos virtuales (VIs) se componen por un transductor, que convierte una magnitud física (temperatura, presión, tensión) a una señal eléctrica de baja magnitud (10 V, 4 mA), una placa adquisidora (convertor A/D) y finalmente una computadora con software específico. Dicho software realiza el tratamiento/análisis de las señales adquiridas según se requiera y luego se realiza la presentación de la medición en una interface amigable en una pantalla [5].

La instrumentación virtual permite la implementación de soluciones a medida, rápidas, flexibles y económicas en comparación con los instrumentos convencionales. En estos últimos la flexibilidad de los instrumentos quedan definidas por el fabricante mientras que en los VIs, los usuarios pueden desarrollar una aplicación para un voltímetro, como es el caso de este trabajo, y con el mismo equipamiento (amen de los transductores) y otro software específico otra aplicación. Por ejemplo los autores han realizado con casi el mismo equipamiento un instrumento para ensayos de interruptores (medición de tiempos de apertura, simultaneidad de polos, desplazamiento de los contactos y corrientes de bobinas).

Los lenguajes de programación utilizados en los VIs suelen ser sencillos e intuitivos. Por lo general poseen librerías con indicadores, perillas y botones similares a los de los instrumentos reales, logrando una interface amigable. No es necesario ser un especialista de la programación o de sistemas y en poco tiempo se pueden realizar desarrollos simples. Claro que, cuanto más funciones y opciones tenga el VI, más complejo se hará el programa.

2 REQUERIMIENTOS

El instrumento virtual desarrollado debió ser capaz de medir los parámetros de tensión necesarios para los ensayos de alta tensión de frecuencia industrial normalizados en IEC 60060-1:2010 “*High-voltage test techniques - Part 1: General definitions and test requirements*” [6]. Esto implica la medición de la tensión cresta y eficaz y la frecuencia de la tensión aplicada.

La incertidumbre expandida en las mediciones tanto de tensiones como frecuencia (tiempo) debe ser menor al 1%.

Además se pretendían otras funciones que permitirían mayores prestaciones del equipo como por ejemplo:

- Almacenamiento de los datos sin procesar (raw data)
- Visualización de la forma de onda (osciloscopio)
- Registro del perfil de la tensión a lo largo de los ensayos
- Cálculo y verificación de la forma de onda de la tensión de ensayo (relación cresta/eficaz)
- Cálculo de los factores de corrección por condiciones ambientales
- Cronómetro

3 IMPLEMENTACIÓN

3.1 Equipamiento pre-existente

El sistema de medición de alta tensión de frecuencia industrial de 300 kV del IITREE estaba originalmente compuesto por un divisor de tensión capacitivo y dos voltímetros analógicos, uno de tensión eficaz y otro de tensión cresta (dividido raíz de 2). El instrumento de valor eficaz es del tipo electroestático y el de valor cresta posee un detector de valor máximo de la onda, que se convierte a corriente y finalmente es medida por un galvanómetro. Ambos poseen una indicación por haz de luz deflectada por un espejo y la cupla antagónica se obtiene con un fleje metálico calibrado. Las calibraciones y mantenimiento de dicho instrumental resultan lentos y costosos.

El VI fue pensado para ser el reemplazo de los antiguos instrumentos analógicos. En la Fig. 1 se muestra un esquema del sistema de medición original y en la Fig. 2 una fotografía de los antiguos voltímetros de cresta y eficaz.

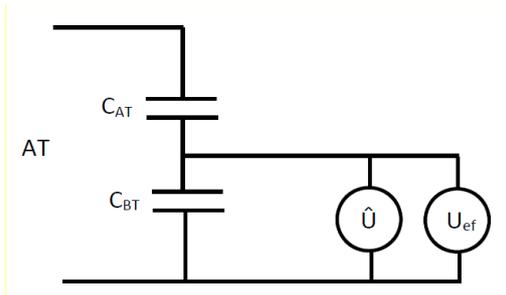


Fig. 1. Esquema de medición



Fig. 2. Voltímetros antiguos

El rango de medición de estos instrumentos era de 150 V.

3.2 Placa adquisidora y adaptación de la señal

En base a los requerimientos impuestos por las normas citadas y las del sistema de medición existente se seleccionó una placa adquisidora con las siguientes características técnicas principales:

- Tensión de entrada; ± 10 V
- Cantidad de bits: 14 Bit
- Máxima velocidad de muestreo: 20 kS/s
- Incertidumbre en vertical: 6 mV
- Incertidumbre de la base de tiempo: 100 ppm
- Impedancia de entrada: > 1 G Ω
- Ruido interno: 0,7 mV_{rms}
- Ancho de banda analógico: 300 kHz

La placa seleccionada se conecta a la PC por medio de un puerto USB. En la Fig. 3 se muestra la placa seleccionada y en la Fig. 4 una vista del instrumento virtual montado en el pupitre de comando.



Fig. 3. Placa adquisidora

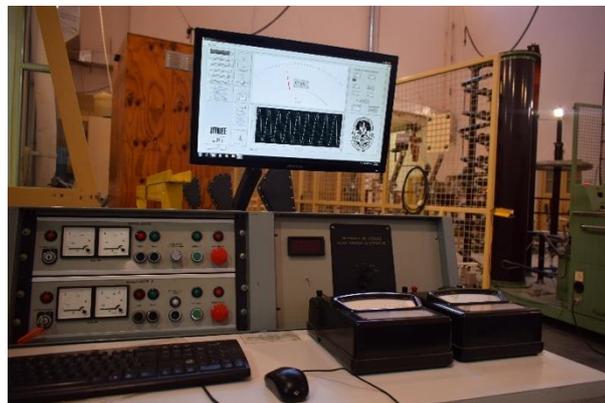


Fig. 4. Instrumento montado en el pupitre de comando

Como se puede ver el rango de entrada de la placa es ± 10 V mientras que la tensión a medir era de ± 150 V $\times \sqrt{2} = \pm 272$ V. Para la adaptación del rango de tensión se utilizó un divisor resistivo. Este dispositivo se construyó con resistores comerciales de $\frac{1}{4}$ W y tolerancia de 2%. En las pruebas de verificación demostró una estabilidad adecuada a las necesidades tanto de corto como largo término. La impedancia de entrada del cuadripolo equivalente del divisor resultó 1 M Ω y la de salida de 60 k Ω , adaptándose correctamente tanto a la salida del divisor de AT como a la entrada de la placa adquisidora.

3.3 Software

En la Fig. 5 se muestra el panel del VI desarrollado.

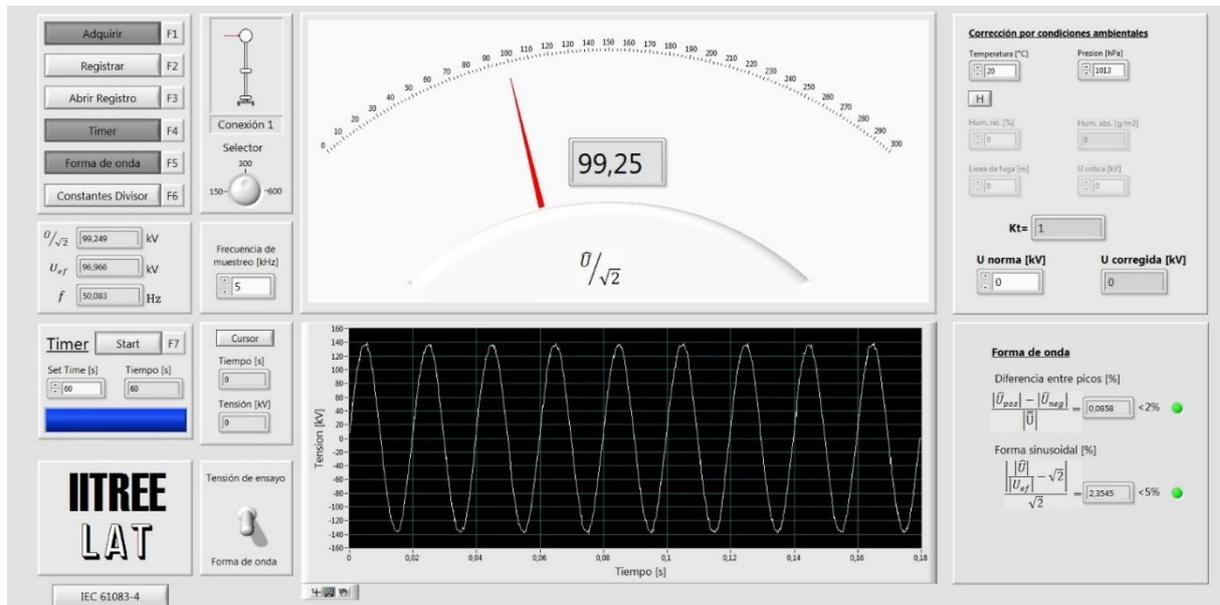


Fig. 5. Panel frontal del VI (forma de onda)

El VI posee un indicador de aguja (tipo analógico) en primer plano que se utiliza para el control de la tensión cresta de ensayo. Debajo de él se puede observar la forma de onda de la tensión aplicada. Utilizando el control “Tensión de ensayo/Forma de onda” el indicador inferior muestra el perfil de la tensión de ensayo, como se puede observar en la Fig. 6.

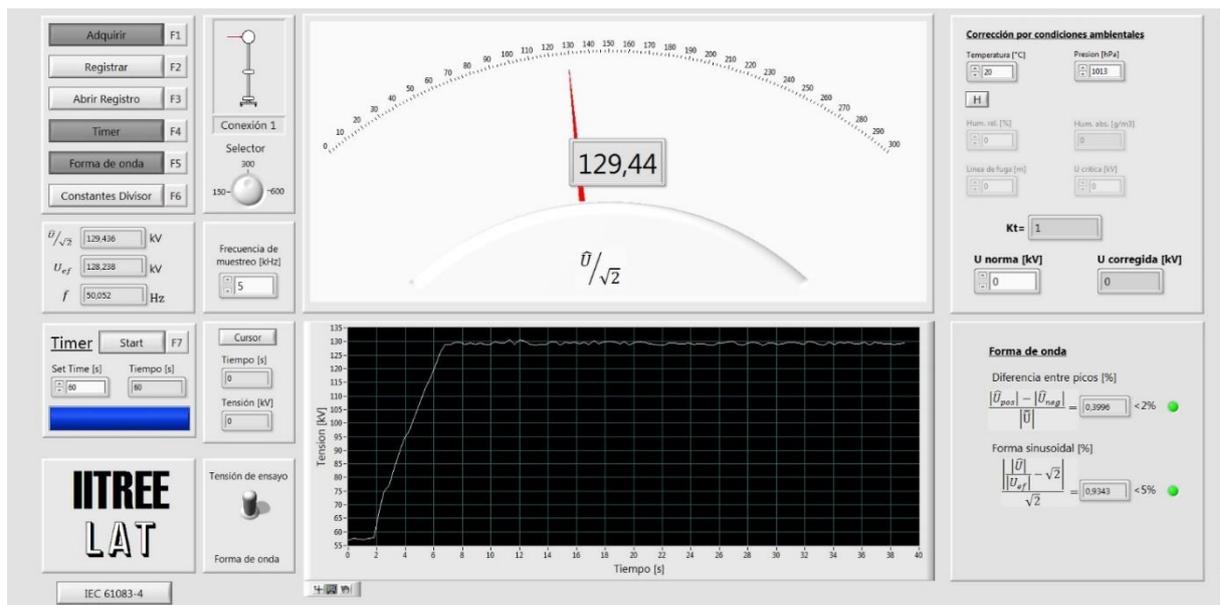


Fig. 6. Panel frontal del VI (tensión de ensayo)

Las lecturas de tensión cresta y eficaz y la frecuencia se obtienen del sub-panel del lado izquierdo y a la mitad de la pantalla. Debajo de este se ha incorporado un cronómetro para el control del tiempo de aplicación de la tensión de ensayo.

En el lado inferior derecho se observa el sub-panel “Forma de onda”. En este se calculan e indican dos parámetros del control de la forma de onda especificados en la norma IEC 60060-1 [6]. Uno de ellos controla la diferencia entre los picos positivos y negativos cuya diferencia no debe ser mayor a 2 % del valor cresta y el otro indicador realiza una evaluación de la deformación de la onda en base a la relación entre el valor cresta y el valor eficaz. Cabe aclarar que no es útil la comprobación de la deformación mediante el THD (Total Harmonic Distortion) debido a que dos señales con el mismo THD pueden tener tensiones cresta muy diferentes y en los ensayos dieléctricos la magnitud que gobierna los procesos de descarga es la tensión cresta y no la eficaz.

Sobre el sector superior derecho se ha incluido un sub-panel que realiza los cálculos de las constantes de corrección de la tensión de ensayo por condiciones atmosféricas según IEC 60060-1:2010 [6]. Se remarca la versión del año de la norma utilizada ya que las constantes de corrección debido a la humedad del aire han cambiado entre versiones de normas y aquí se puede remarcar una de las ventajas de la instrumentación virtual realizada por los usuarios. Si se imagina que una nueva versión de la norma cambie nuevamente, por ejemplo, la manera de corregir la tensión de ensayo, no se requerirán grandes esfuerzos para actualizar el programa y cumplir con los nuevos requerimiento, simplemente habrá que reprogramar una pequeña parte del código.

En la Fig. 7 se muestra el sub-panel, en él, el usuario debe ingresar la temperatura ambiente, la presión atmosférica y la humedad relativa.

Fig. 7. Sub-panel de corrección por condiciones atmosféricas

4 PUEBAS DE VALIDACIÓN

4.1 Pruebas sobre el software respecto al cálculo de la tensión cresta y eficaz

La primera prueba realizada al software se realizó con señales poliarmónicas generadas desde un software de cálculo a partir de su formulación matemática. En la Tabla I se presentan los resultados de esta verificación.

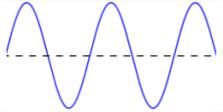
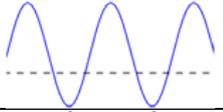
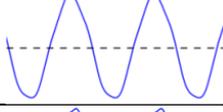
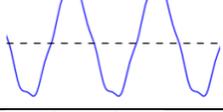
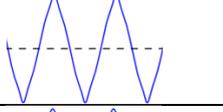
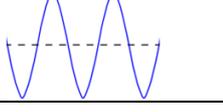
TABLA I. VERIFICACIÓN DEL SOFTWARE RESPECTO AL CÁLCULO DE LA TENSIÓN CRESTA Y EFICAZ

Señal	$\frac{\bar{U}}{\sqrt{2}}$		U_{ef}	
	Cálculo	VI	Cálculo	VI
$u(t) = sen(wt)$	0,7071	0,7071	0,7071	0,7071
Onda triangular 1V	0,7071	0,7071	0,5774	0,5774
$u(t) = 5 sen(wt) + 0.7 sen(5wt)$	4,0305	4,0305	3,5700	3,5698
$u(t) = 5 sen(wt) + sen\left(2wt + \frac{\pi}{9}\right) + 0.3 sen(3wt)$	3,6727	3,6727	3,6118	3,6116

Se observa en los resultados de la Tabla I perfecta correspondencia entre los parámetros calculados y los determinados por el software.

La siguiente verificación fue realizada utilizando registros patrones extraídos del proyecto de norma IEC 61083-4 [4], para señales alternas. Los registros patrones se obtienen de un software llamado TDG (test data generator.) Para esta verificación el VI posee un botón en el sector inferior derecho (ver Fig. 5) rotulado IEC 61083-4, que permite la carga de los archivos de verificación. Cabe resaltar que el proceso de cálculo es el mismo utilizado tanto en la verificación como en la adquisición real. En la Tabla II se presentan los resultados.

TABLA II. RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DEL SOFTWARE CON LOS REGISTROS PATRONES DE [4]

Designación en el TDG	Forma de onda de referencia	Descripción	$\hat{v}/\sqrt{2}$ [kV]		U_{ef} [kV]		Frecuencia [Hz]	
			[4]	VI	[4]	VI	[4]	VI
ACV-A1		Sinusoide ideal	1,000	1,000	1,000	1,000	50	50,000
ACV-A2		Sinusoide ideal con un gran offset de continua	1,000	1,000	1,000	1,000	60	60,000
ACV-A3		Distorsión de un armónico de orden 4	1,007	1,007	1,001	1,003	50	50,000
ACV-A4		Seno con un doble pico (distorsión de armónicos impares)	0,959 0,996*	0,996	1,005 1,002*	1,003	60	60,000
ACV-A5		Triangular (no cumple con [1])	1,130	1,130	1,003	1,003	50	50,000
ACV-A6		Triangular (cumple con [1])	1,050	1,050	1,000	1,001	60	60,000

*Los valores tomados de referencia son los publicados en [7] y [8].

La máxima diferencia encontrada fue de 0,2 % en los registros ACV-A3 y ACV-A4.

4.2 Pruebas sobre el voltímetro completo

El voltímetro completo (divisor resistivo, placa adquisidora y PC) fueron evaluados con señales reales generadas por un calibrador Fluke 5500A. Las pruebas estuvieron orientadas a verificar la linealidad respecto a la tensión y el comportamiento dinámico. En la Fig.8 se muestra la instalación preparada para las pruebas. La frecuencia de muestreo en todos los casos fue de 20 kHz.



Fig. 8. Calibración del VI

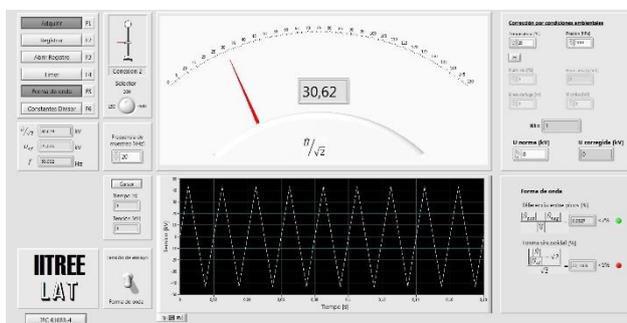


Fig. 9. Señal triangular

Para verificar el comportamiento del instrumento con distintos niveles de tensión se realizó una calibración en cinco puntos que cubrieron rango de medición del instrumento. En la Tabla III se presentan los resultados.

TABLA III. RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN A DIFERENTES NIVELES DE TENSIÓN

U calibrador	VI cresta		VI Eficaz	
$U_{ef} = \hat{U} / \sqrt{2}$ [V]	$\hat{U} / \sqrt{2}$ [V]	Error [%]	U_{ef} [V]	Error [%]
50,000	50,17	0,35	49,86	-0,27
75,000	75,23	0,30	74,90	-0,13
100,000	100,28	0,28	99,83	-0,17
125,000	125,37	0,30	124,77	-0,19
150,000	150,41	0,27	149,80	-0,13

Siendo que la incertidumbre expandida en la medición de tensión (cresta o eficaz) según [3] debe ser menor al 1 %, se considera alentador que el máximo error determinado en las pruebas sea de 0,35 %.

Cabe aclarar que la determinación de la incertidumbre expandida de medición requiere la evaluación del comportamiento del instrumento ante otras condiciones que pueden influir en la medición, por ejemplo, efecto de la temperatura ambiente o deriva en los elementos utilizados. Esta evaluación se programó para realizar en el futuro.

En cuanto a la evaluación del comportamiento dinámico se realizaron dos pruebas. La primera fue un barrido en frecuencia desde 50 Hz hasta 550 Hz. La segunda fue la medición de una señal triangular de 50 Hz.

En la Fig. 9 se muestra la pantalla del VI en la medición de la señal triangular y en las Tablas IV y V se presentan los resultados de las pruebas.

TABLA IV. RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN A DIFERENTES FRECUENCIAS

Frecuencia calibrador	Tensión calibrador	VI cresta		VI eficaz		VI Frecuencia	
[Hz]	$U_{ef} = \hat{U} / \sqrt{2}$ [V]	$\hat{U} / \sqrt{2}$ [V]	Error [%]	U_{ef} [V]	Error [%]	[Hz]	Error [%]
50,00	100,000	100,28	0,28	99,83	-0,17	50,002	0,004%
150,00	100,000	99,57	-0,43	99,73	-0,27	150,003	0,002%
250,00	100,000	99,67	-0,33	99,83	-0,17	250,007	0,003%
550,00	100,000	99,74	-0,26	100,25	0,25	550,013	0,002%

TABLA V. RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN CON UNA ONDA TRIANGULAR

Tensión calibrador [V]		VI cresta		VI Eficaz		
$U_{pico-pico}$	$\hat{U} / \sqrt{2}$ *	U_{ef} **	$\hat{U} / \sqrt{2}$ [V]	Error [%]	U_{ef} [V]	Error [%]
50,000	17,677	14,434	17,665	-0,07	14,38	-0,37
90,000	31,820	25,980	31,724	-0,30	25,96	-0,09

*Valor calculador como: $U_{pico-pico} / 2\sqrt{2}$ ** Valor calculado como: $U_{pico-pico} / 2\sqrt{3}$

En la medición de tensiones se apreció un comportamiento adecuado. Los errores son del mismo orden que los informados en la Tabla III y no se observó una correlación con el aumento de la frecuencia.

La medición de las tensiones de una señal altamente distorsionada de una senoide como fue la onda triangular arrojó también errores del orden del de la Tabla III.

Los errores en la determinación de la frecuencia son realmente bajos (0,004% el más grande). Este resultado se condice con la alta calidad que poseen hoy en día los cristales de los osciladores que dan la exactitud de la base de tiempo de la placa adquisidora (incertidumbre de 100 ppm).

5 DESARROLLOS FUTUROS

El VI deberá ser evaluado respecto a las versiones finales de las normas [3] y [4] estableciendo la incertidumbre expandida con un nivel de confianza no menor al 95 %. Esto incluye la evaluación del comportamiento del instrumento ante condiciones que pueden influir en la medición como las mencionadas en el punto anterior.

Una variable poco estudiada por el momento fue el nivel y tipo de ruido presente en la señal. Aunque es una evaluación importante se destaca que la relación señal/ruido es alta ya que se están midiendo tensiones del orden de los kilovolt.

Dado que la placa adquisidora, además de las entradas de medición, posee salidas que pueden ser programadas como salidas analógicas o digitales se prevé realizar una rutina de programación que controle la velocidad de incremento de la tensión (kV/s) en la subida desde cero a la tensión de ensayo.

6 CONCLUSIONES

El instrumento virtual desarrollado logró cumplir con los requerimientos especificados por la normativa y resulta una herramienta muy útil y versátil en realización de ensayos dieléctricos con tensión alterna.

Se destaca la facilidad de adaptación de los VI sobre los convencionales, pudiendo modificar sin grandes esfuerzos métodos de medición, constantes de multiplicación / corrección, maneras de visualizar las magnitudes de interés etc.

Aunque en este trabajo no se presentó formalmente una evaluación económica entre distintas soluciones es destacable que el costo de este instrumento es relativamente bajo dado las prestaciones y ventajas que ofrece respecto a otros del tipo convencional.

7 AGRECIAMIENTOS

Los autores agradecen al Ingeniero Orsino Borges Filho y su equipo del Laboratorio Cepel de Brasil por la colaboración prestada para la realización de este trabajo.

8 REFERENCIAS

- [1] IEC 61083-1:2001 “Digital recorders for measurements in high voltage impulse tests - Part 1: Requirements for digital recorders”.
- [2] 61083-2:2013 “Instruments and software used for measurement in high-voltage and high-current tests - Part 2: Requirements for software for tests with impulse voltages and currents”
- [3] Proyecto de norma IEC 61083-3/Ed1: Instruments and software used for measurement in high-voltage and high-current tests – Part 3: Requirements for digital instruments for tests with alternating and direct voltages and currents”
- [4] Proyecto de norma IEC 61083-4 Ed. 1.0: Instruments and software used for measurements in high-voltage and high current tests - Part 4: Requirements for software for tests with alternating and direct currents and voltages”
- [5] Jovitha Jerome “Virtual Instrumentation Using LabVIEW”. PHI Enero de 2010
- [6] IEC 60060-1:2010 “High-voltage test techniques - Part 1: General definitions and test requirements”
- [7] S. Sato.; Y. Saikawa, Y. Okamoto, S. Nishimura y H. Shimizu “Parameters Determination for a.c. Voltage and Current Waveforms: IEC 61083-4 TDG Waveform analyses”, 10th International Power and Energy Conference, IPEC, 578-582, 2012
- [8] Y.R. Oliveira, C.R.H. Barbosa, M.T. Silva, L.C. Azevedo, V.R. Santos, M.V.B. Lopes. “Instrumento virtual de medição em ensaios de alta e ultra alta tensão em corrente alternada” XVII ERIAC 2017.