

Registrador universal de alta tensión para los laboratorios de ensayo

Universal high voltage recorder for testing laboratories

Abderrahim Khamlichi¹, Fernando Garnacho², Jorge Rovira³,
Pascual Simón⁴

Khamlichi, A; Garnacho, F; Rovira, J; Simón, P. Registrador universal de alta tensión para los laboratorios de ensayo. *Tecnología en Marcha*. Vol. 34, especial. ALTAE. Diciembre 2021. Pág 5-16.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v34i7.6008>



- 1 LCOE-FFII. Universidad Politécnica de Madrid, España. Correo electrónico: ak@ffii.es
- 2 LCOE-FFII. Universidad Politécnica de Madrid, España. Correo electrónico: fernando.garnacho@ffii.es
- 3 LCOE-FFII, España. Correo electrónico: jrovira@ffii.es
- 4 LCOE-FFII. España. Correo electrónico: psimon@ffii.es

Palabras Clave

Instrumento de medida universal; laboratorio de alta tensión; medida universal; divisor de tensión.

Resumen

Tradicionalmente los laboratorios de alta tensión (AT) han precisado diferentes instrumentos de medida para medir las tensiones alternas 50/60 Hz (AC), mediante voltímetros de cresta, impulsos de tensión tipo rayo, mediante medidores de tensiones de cresta y osciloscopios y la carga aparente, mediante instrumentos de medida de descargas parciales (DP). Todos ellos con requisitos técnicos muy diferentes recogidos en normas aplicables al hardware y software (normas de la serie IEC 61083 [1] y norma IEC 60270 [2]). Sin embargo, la evolución tecnológica de los instrumentos de medida ha permitido que estas medidas se puedan y deban realizarse a través de registradores digitales A/D de altas prestaciones. En este artículo se describe el nuevo sistema de medida desarrollado por el LCOE “*Registrador Universal de Alta Tensión*”, denominado como “*RUAT*”, capaz de ser utilizado para las cinco medidas típicas de alta tensión en un laboratorio: AC, DC, impulso tipo rayo (1,2/50 μ s), impulso tipo maniobra 250/2500 μ s) y DP.

Keywords

Universal measuring instrument; high voltage laboratory; universal measurement; voltage divider.

Abstract

Traditionally, high-voltage (HV) laboratories have required different measuring instruments to measure alternating voltages 50/60 Hz (AC), using peak voltmeters, lightning impulses, through peak voltage meters and oscilloscopes and the apparent load, by means of partial discharge (PD) measuring instruments. All of them with very different technical requirements included in standards applicable to hardware and software (standards of the IEC 61083 [1] series and IEC 60270 [2] standard). However, the technological evolution of measuring instruments has allowed these measurements could be carried out through high-performance digital A/D recorders. This article describes the new measuring system developed by the LCOE “*Universal High Voltage Recorder*”, known as “*RUAT*”, capable of being used for the five typical measurements of high voltage in a laboratory: AC, DC, lightning impulse (1.2/50 μ s), switching impulse (250/2500 μ s) and PD.

Introducción

Las medidas de las tensiones alternas se pueden realizar con registradores digitales con impedancia de entrada de 1 M Ω , anchos de banda de kilohercios (kHz) y velocidades de muestreo de decenas de kilosamples por segundo (kS/s). Las medidas de impulsos tipo rayo también se realizan con impedancia de entrada de 1 M Ω pero con anchos de banda de decenas de MHz y velocidades de muestreo de 100 a 200 kS/s. Por otro lado, los medidores de descargas parciales trabajan con anchos de banda y velocidades de muestreo similares a los requeridos para impulsos tipo rayo, pero con una impedancia de entrada de 50 Ω . Existen registradores digitales en el mercado que ofrecen soluciones en sus rangos de entrada capaces de adaptarse a los requisitos técnicos exigidos por todas las medidas mencionadas anteriormente, lo que permite disponer de un solo instrumento de medida, denominado como

universal, que pueda incluir todas las funcionalidades necesarias para los ensayos de AT. Con este fin, el laboratorio de I+D del LCOE ha desarrollado un nuevo sistema de medida universal denominado como “RUAT”, mostrado en las figuras 1 y 2.

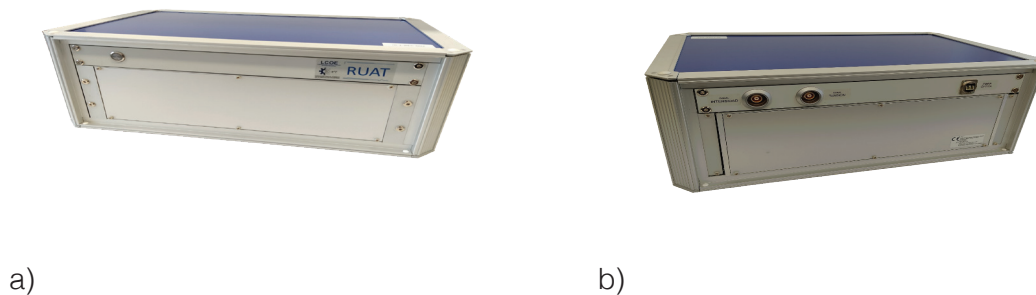


Figura 1. Sistema de medida universal “RUAT”: a) Vista frontal; b) Vista trasera.

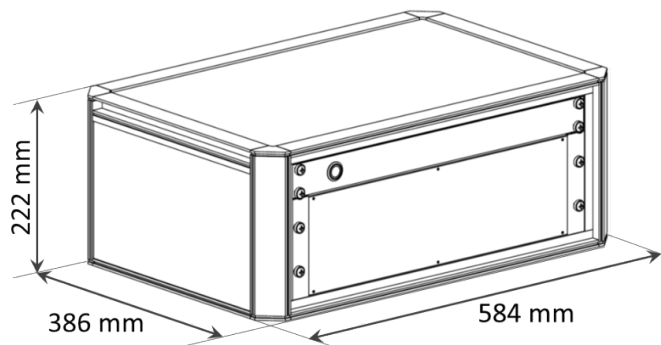


Figura 2. Plano del sistema de medida universal “RUAT”.

Uno de los principales problemas que tuvo que resolverse fue la adaptación del nivel de tensión e impedancia de entrada acordes a las necesidades de cada una de las medidas a realizar. Cuando el registrador trabaja acoplado a la salida de un divisor de alta tensión es preciso disponer de atenuadores de diferente tipo dependiendo de la rama de baja del divisor, así como cuando se acopla a un shunt para la medida de corriente. Por el contrario, cuando es utilizado para la medida de descargas parciales debe adaptarse a la impedancia de medida empleada para DP, siendo ésta de un valor de 50Ω .

Se ha empleado un registrador digital de adecuada respuesta en frecuencia y ancho de banda que garantiza su idoneidad para ser utilizado en las distintas técnicas de ensayo y medida de alta tensión. Su apantallamiento con chapa de cobre permite mitigar las interferencias electromagnéticas propias de las producidas durante los ensayos de alta tensión, especialmente en los instantes de descarga disruptiva. Se conecta a los diferentes sistemas de medida a utilizar: HVAC, HVDC, 1,2/50 y 250/2500 μs y opcionalmente DP a través de cables de medida coaxiales. El “RUAT” está diseñado para ser dispuesto en proximidad al divisor, tal y como se muestra en la figura 3, limitando de esta forma la longitud de los cables de medida.



Figura 3. Divisor de alta tensión con el “RUAT” conectado en la rama de baja tensión.

La salida por fibra óptica es enviada a la sala de control donde se debe disponer el ordenador que ejecuta el correspondiente software de procesamiento de señal, dependiendo del tipo de medida a realizar (ver figura 4). Los cables de fibra óptica tienen la ventaja de asegurar el aislamiento galvánico entre las instalaciones de generación y la sala de control donde los técnicos manejan los ordenadores y monitores de medida, además de evitar las interferencias electromagnéticas.

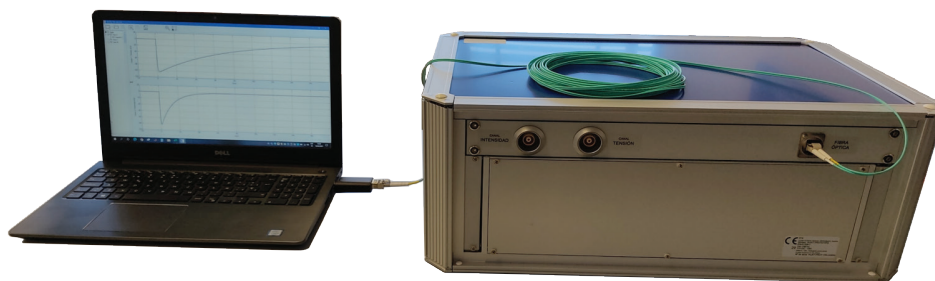


Figura 4. Conexión mediante fibra óptica del “RUAT” al ordenador.

El número de canales máximo del registrador desarrollado es de 4, lo que permite realizar medidas simultáneas de señales transitorias en distintas fases con una tensión de referencia de tensión. Asimismo, gracias los criterios establecidos en el proyecto EMPIR “HV-com²” [3] de EURAMET, el software desarrollado permite también la medida de ondas combinadas (diferencia de ondas generadas por dos generadores y medidas con dos sistemas de medida diferentes) y compuestas (suma de las dos ondas generadas con diferente generador y medidas con un solo sistema de medida), conforme a los requisitos establecidos en las normas de la serie IEC 60060 [4]. A título de ejemplo, este software permite medir de forma simultánea un impulso transitorio de tipo rayo cuando está aplicado sobre la tensión de servicio (HVAC o HVDC) que debe ser soportado por el objeto bajo ensayo.

En la figura 5 se muestra un ejemplo de ensayo de alta tensión con un generador de impulsos tipo Marx de cuatro etapas (a la izquierda) y un sistema de medida de impulsos compuesto por un divisor de alta tensión y el “*RUAT*” conectado a la rama de baja tensión del divisor (a la derecha).

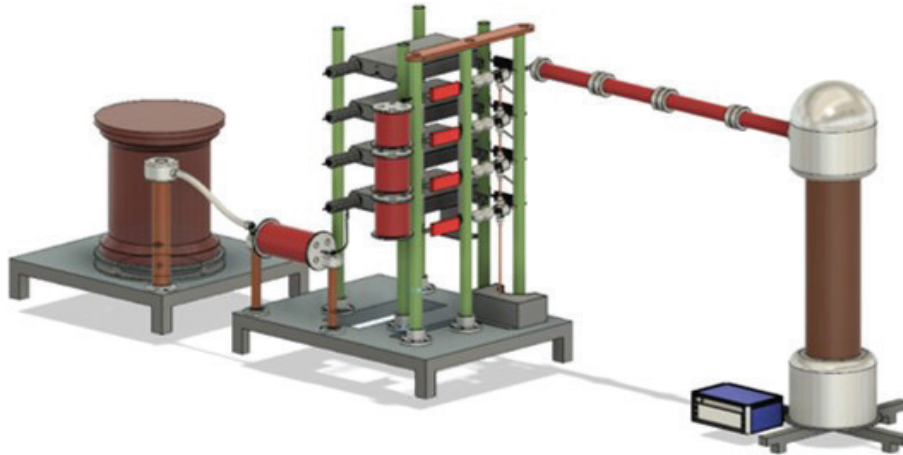


Figura 5. Ensayo de alta tensión y medida con el instrumento “*RUAT*”.

Diseño y construcción del *RUAT*

El instrumento de medida “*RUAT*” se compone básicamente de tres módulos:

- Módulo apantallado frente a campos electromagnéticos.
- Módulo de medida.
- Rack.

El módulo apantallado contiene la unidad registradora digital y tiene la función de evitar posibles interferencias de campos electromagnéticos en la medida. El módulo tiene cuatro conexiones BNC para los cables de medida que se conectan a los canales del registrador para las distintas medidas de alta tensión y una conexión USB para el cable de comunicación del registrador con el ordenador. En la figura 6 se muestra el diseño 3D del módulo apantallado.

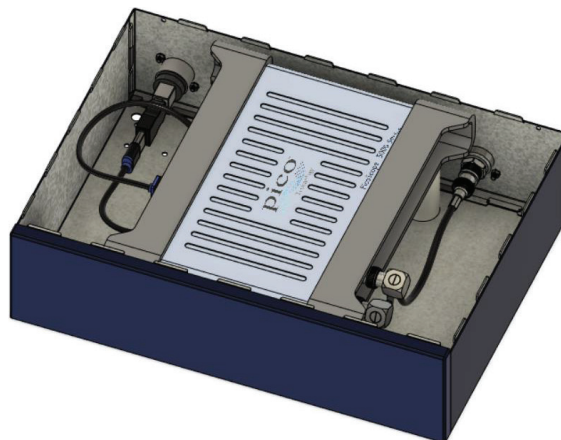


Figura 6. Diseño 3D del módulo apantallado.

El módulo de medida está formado a su vez por el módulo apantallado, los atenuadores requeridos para las medidas de alta tensión (capacitivos y/o resistivos) con impedancias adaptadas a los divisores, la impedancia de adaptación de 50Ω para DP y un dispositivo conversor de USB a fibra óptica.

Por último, el módulo de medida se incorpora dentro de un rack industrial. Este rack contiene una batería recargable, las conexiones de entrada al instrumento de los cables de medida coaxiales provenientes de los divisores y de la impedancia de medida de descargas parciales y la comunicación por fibra óptica. Además, el rack tiene un botón de encendido con indicación luminosa.

Registrador

El instrumento de medida “RUAT” lleva incorporado un registrador digital de cuatro canales (ver figura 7). El registrador tiene una adecuada respuesta en frecuencia de hasta 16 bits para medidas de frecuencia industrial (50/60 Hz), de hasta 12 bits con una velocidad de muestreo de 250 MS/s cuando es utilizado para medida de impulsos tipo rayo y descargas parciales, pudiendo llegar a trabajar a 1 GS/s con 8 bits. Su ancho de banda de hasta 200 MHz garantiza su idoneidad para ser utilizado en la medida de alta tensión en cualquier ensayo a realizar en un laboratorio de alta tensión.



Figura 7. Registrador digital de cuatro canales.

Atenuadores

El instrumento de medida “RUAT” incorpora atenuadores con las características técnicas de impedancia y relación requeridas por los divisores de alta tensión a los que van conectados (HVAC, HVDC, $1,2/50 \mu s$, $250/2500 \mu s$) o por el shunt en caso de medida de corriente. Los atenuadores para la medida de tensión son capacitivos y para la medida de corriente son resistivos. Los atenuadores incorporan además protecciones frente a sobretensiones y sobreintensidades. En la figura 8 se muestra el diseño 3D de un atenuador.

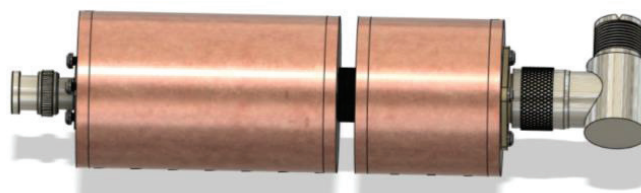


Figura 8. Diseño 3D de un atenuador.

Impedancia de adaptación DP

El instrumento de medida “*RUAT*” incorpora una impedancia de entrada de 50Ω , para ser utilizado para la medida de DP como adaptación de la impedancia de medida de descargas parciales (en lugar de la impedancia de $1 \text{ M}\Omega$ empleada en el resto de las medidas de alta tensión).

Ensayos y calibraciones

LCOE ha realizado los ensayos y calibraciones para la comprobación del correcto funcionamiento del instrumento de medida *RUAT* y sus elementos, de acuerdo a la normativa vigente. Los ensayos realizados han sido los siguientes:

- Calibración en frecuencia del registrador (procedimiento interno PS6.51 del LCOE, acreditado según la norma ISO 17025 [5]).
- Respuesta en frecuencia de los atenuadores (método interno del LCOE, indicado en el apartado 7.1.3 de la norma IEC 60060-2 [4]).
- Ensayo de impulsos tipo escalón (norma IEC 61083-1 [1]).
- Ensayo de impulsos tipo rayo (norma IEC 61083-1 [1]).
- Ensayo de inmunidad frente a campos eléctricos (norma IEC 61083-1 [1]).
- Ensayo de inmunidad frente a campos magnéticos (norma IEC 61083-1 [1]).
- Ensayo de compatibilidad electromagnética (norma IEC 61326-1, marcado CE [6]).

Registrador

Se ha realizado la calibración en frecuencia del registrador como medidor de tensión y la calibración de su base de tiempos (sistema de deflexión horizontal), según procedimiento interno PS6.51 del LCOE. La Figura 9 muestra como ejemplo el factor de corrección obtenido en todos los rangos desde $0,4 \text{ V/div}$ hasta 4 V/div de uno de los canales en función de la frecuencia. La caracterización del registrador en función de la frecuencia muestra un error máximo en 16 bits menor del $0,5 \%$ hasta la frecuencia de 200 kHz (correspondiente a pulsos plenos) y un error menor del 1% hasta 1 MHz .

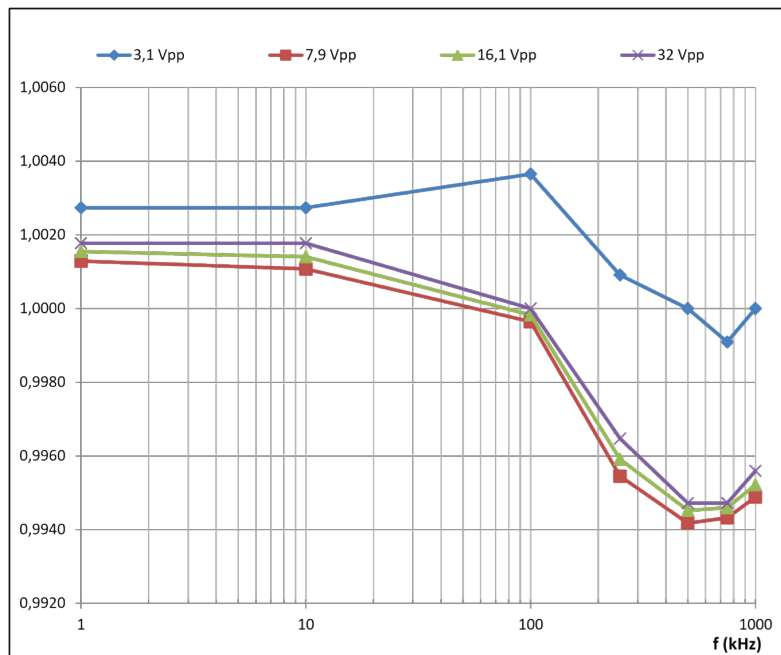


Figura 9. Factor de corrección en todos los rangos desde 0,4 V/div hasta 4 V/div en función de la frecuencia.

La figura 10 muestra como ejemplo la gráfica del ancho de banda para la resolución de 8 bits y 16 bits.

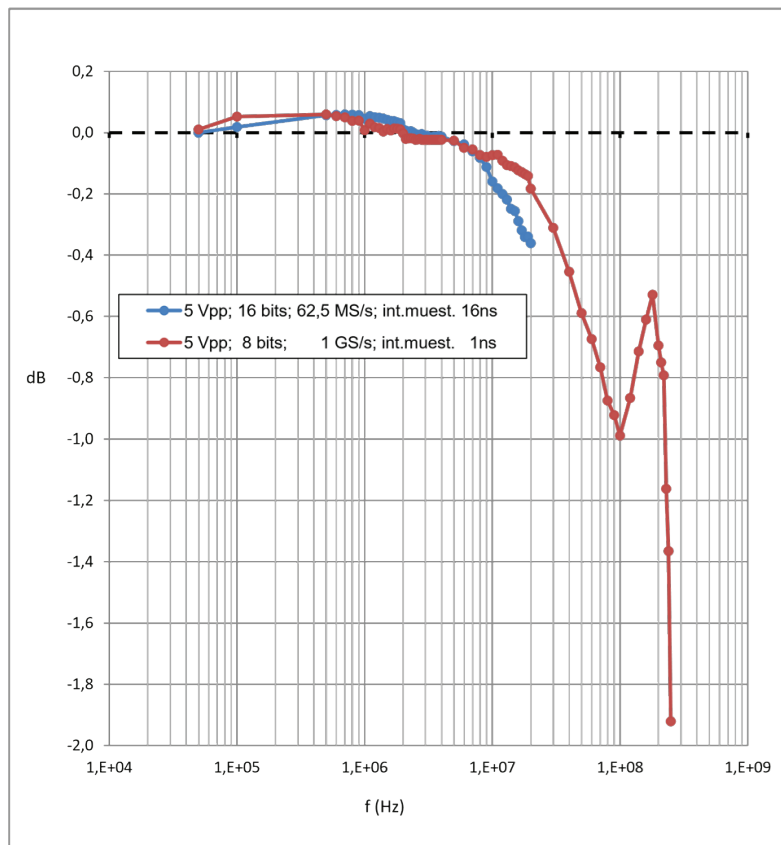


Figura 10. Gráfica del ancho de banda para la resolución de 8 bits y 16 bits.

Atenuadores

Se han efectuado barridos en frecuencia a los atenuadores para caracterizar su respuesta en frecuencia frente a señales de entrada de tensión de frecuencia variable. En la figura 11 se muestra un ejemplo de la respuesta obtenida para dos atenuadores capacitivos.

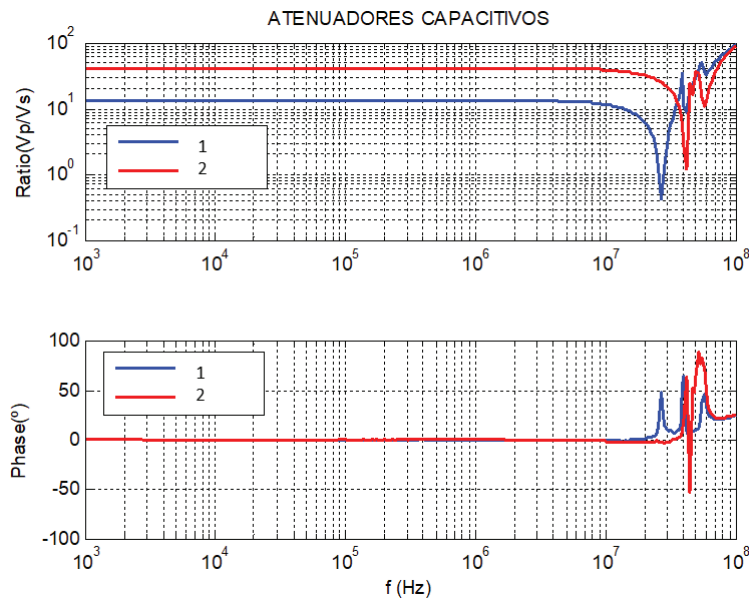


Figura 11. Respuesta en frecuencia de dos atenuadores capacitivos.

Se comprueba la respuesta plana de los atenuadores hasta frecuencias del orden de 1 MHz, lo que implica que la relación de atenuación se mantiene constante durante dicho intervalo de frecuencia.

Instrumento de medida *RUAT*

Se han realizado los ensayos al instrumento de medida *RUAT* completo para certificar su validez como equipo de medida de alta tensión: ensayo de impulsos tipo escalón, impulsos tipo rayo e inmunidad frente a campos eléctricos y magnéticos, según la norma EN 61083-1 [1].

Además, se han realizado los ensayos correspondientes a la obtención del marcado CE de la norma EN 61326-1 [6].

Ensayo de impulsos tipo escalón

Se ha realizado una calibración del instrumento de medida *RUAT* aplicando escalones de distintos niveles de tensión para evaluar su respuesta, según el apartado 1.5.2 de la norma [1]. Los niveles de tensión aplicados han sido: 50, 100, 200 y 300 V. En la figura 12 se muestra uno de los registros obtenidos como ejemplo.

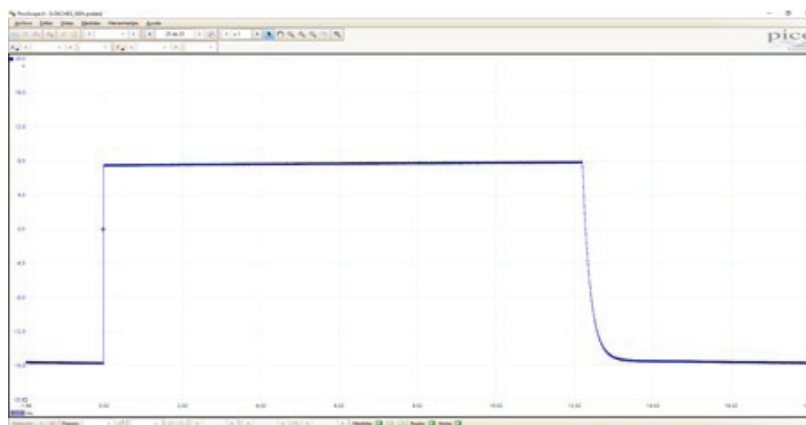


Figura 12. Ejemplo de impulso tipo escalón registrado con el “RUAT”.

Ensayo de impulsos tipo rayo

Se ha realizado una calibración del instrumento de medida *RUAT* aplicando diez impulsos tipo rayo de distintos niveles de tensión para evaluar su respuesta, según el apartado 1.5.1 de la norma [1]. Los niveles de tensión aplicados han sido: 400, 700 y 1400 V, todos en polaridad negativa. En el cuadro 1 se muestra como ejemplo los impulsos tipo rayo aplicados con un nivel de tensión de 700 V.

Cuadro 1. Ensayo de impulsos tipo rayo con un nivel de tensión de 700 V.

U_e (V)	Desviación U_e (%)	T_1 (ms)	Desviación T_1 (%)	T_2 (ms)	Desviación T_2 (%)
-753.63	-0.09	0.86	0.23	59.6	0.13
-753.9	-0.05	0.86	0.23	59.6	0.13
-754.39	0.01	0.86	0.23	59.5	-0.03
-754.21	-0.01	0.86	0.23	59.5	-0.03
-754.37	0.01	0.86	0.23	59.5	-0.03
-754.36	0.01	0.86	0.23	59.5	-0.03
-754.4	0.01	0.86	0.23	59.5	-0.03
-754.49	0.02	0.85	-0.93	59.5	-0.03
-754.72	0.06	0.86	0.23	59.5	-0.03
-754.57	0.04	0.85	-0.93	59.5	-0.03
-754.30		0.86		59.5	

Se ha comprobado que la desviación máxima de los valores de cresta de salida es inferior al 1% del valor medio y que la desviación máxima de cada parámetro de tiempo es inferior al 2% del valor medio, según se indica en la norma [1] como requisito.

Ensayo de inmunidad frente a campos electromagnéticos

Este ensayo se ha realizado de acuerdo al apartado B.3.2 del Anexo B de la norma [1] y sirve para comprobar la sensibilidad del instrumento a cada uno de los tipos de perturbaciones electromagnéticas.

El instrumento “RUAT” (sin cable de medida) se ha sometido a una variación rápida de campo eléctrico y magnético, representativo de los producidos en los circuitos de ensayo de alta tensión. En la figura 13 se muestra el circuito de ensayo.

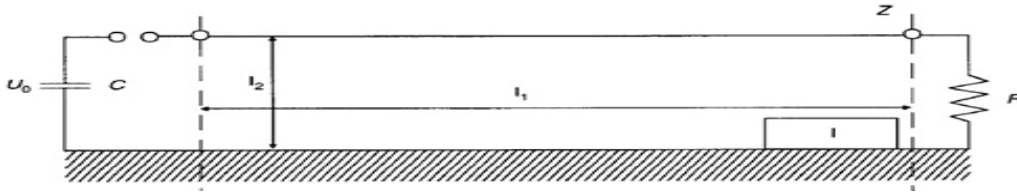


Figura 13. Ejemplo de impulso tipo escalón registrado con el “RUAT”.

Donde:

I: Instrumento de medida “RUAT” bajo ensayo, situado en el extremo de la línea.

Z: Impedancia característica. $C = 30 \text{ nF}$, $L_1 = 5 \text{ m}$, $L_2 = 1 \text{ m}$.

Ensayo de campo eléctrico: $U_0 = 40 \text{ kV}$ ($R = Z$).

Ensayo de campo magnético: $U_0 = 100 \text{ kV}$ ($R = 0$).

Ensayo de inmunidad frente a campo eléctrico

En la figura 14 se muestra una imagen del circuito de ensayo para campo eléctrico montado en el laboratorio.



Figura 14. Fotografía tomada en el laboratorio durante los ensayos de inmunidad frente a campo eléctrico efectuados al “RUAT”.

Se aplicaron un total de 8 impactos a 40 kV observándose que el equipo se comunicaba correctamente en todo momento a través de la fibra óptica, es decir, no pierde la señal ni se queda bloqueado y recoge las perturbaciones eléctricas provocadas por las descargas del condensador.

Ensayo de inmunidad frente a campo magnético

Se cortocircuita el extremo de la línea de transmisión mediante una banda de cobre ($R = 0$). En la Figura 15 se muestra el circuito de ensayo para campo magnético montado en el laboratorio.



Figura 15. Fotografía tomada en el laboratorio durante los ensayos de inmunidad frente a campo magnético efectuados al “RUAT”.

Se aplican un total de 8 impactos a 100 kV observándose que el equipo se comunica correctamente en todo momento a través de la fibra óptica y no pierde la señal debido a las perturbaciones magnéticas provocadas por las descargas del condensador.

Conclusiones

LCOE ha diseñado y desarrollado un nuevo instrumento de medida universal “RUAT” compuesto por un registrador digital, atenuadores adaptados y cables de medida, capaz de registrar los distintos tipos de medidas realizadas en un laboratorio de alta tensión: tensión alterna 50/60 Hz, impulsos de tensión tipo rayo y maniobra y descargas parciales.

LCOE ha certificado el correcto funcionamiento del “RUAT” mediante los ensayos indicados en las normas correspondientes a este tipo de instrumentos de medida de tensión.

Agradecimientos

This project 19NRM07 HV-com² has received funding from the EMPIR programme co-financed by the Participating States and from the European Union’s Horizon 2020 research and innovation programme.

Referencias

- [1] IEC 61083-1 “Instruments and software used for measurement in high-voltage impulse tests – Part 1: Requirements for instruments”, 2001.
- [2] IEC 60270 “High-voltage test techniques - Partial discharge measurements”, 2000.
- [3] Proyecto EMPIR de EURAMET, H2020, 19NRM07 HV-Com² “Support for standardisation of high voltage testing with composite and combined wave shapes”, 2020.
- [4] IEC 60060-2 “High-Voltage Test Techniques - Part 2: Measuring systems”, 2010.
- [5] ISO 17025 “Implantación y gestión de la calidad en laboratorios”, 2017.
- [6] IEC 61326-1 “Electrical equipment for measurement, control, and laboratory use – EMC requirements – Part 1: General requirements”, 2020.