

Desarrollo metroológico de los patrones de alta corriente del LCOE

Pascual Simón⁽¹⁾, Fernando Garnacho^{(1), (2)}, Javier López⁽¹⁾,
Abderrahim Khamlichi^{(1), (2)}, Tomás García⁽¹⁾, Ángel Ramírez⁽¹⁾

- ⁽¹⁾ Centro Tecnológico de Alta Tensión y Metrología del Laboratorio Central Oficial de Electrotecnia (LCOE) de la F2I2.
- ⁽²⁾ Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Diseño Industrial de la UPM, Madrid.

RESUMEN: Las medidas de alta corriente tienen gran aplicación en distintos sectores tecnológicos e industriales. Los intercambios de energía en baja o alta tensión requieren de la medida de altas corrientes de frecuencia industrial. Por otra parte, el incremento de las tormentas y de los parques eólicos emplazados en las cumbres de las montañas con aerogeneradores provistos de palas de grandes dimensiones hacen que el impacto de rayos sobre instalaciones eléctricas se incremente, lo que ha propiciado nuevas necesidades metroológicas. Se requiere medir la corriente impulsional del rayo para poder prevenir y mitigar sus efectos o para instalar dispositivos de protección adecuados. En este artículo se describe el desarrollo de las capacidades metroológicas del LCOE para la medida de altas corrientes, reconocido mediante la publicación del RD 207/2022 que amplía la designación como depositario de los patrones nacionales de medida de alta tensión a nuevos patrones nacionales de medida de alta corriente.

1. INTRODUCCIÓN.

Las medidas de alta corriente son necesarias para conocer la energía eléctrica intercambiada en alta tensión, para garantizar un funcionamiento seguro de las redes eléctricas, para mejorar la eficiencia energética y para prevenir o mitigar los efectos de las caídas de rayo en las redes eléctricas y en las aeronaves.

Los intercambios de energía en alta tensión en las fronteras entre las actividades de generación, transporte, distribución y consumo de energía eléctrica y en las conexiones internacionales o extra peninsulares requieren de la medida de altas corrientes (a 50 o 60 Hz), siendo necesario medir alta tensión y corrientes elevadas simultáneamente. El reglamento de puntos de medida [1] regula las características y condiciones para la medida de estos intercambios, mientras que las instrucciones que lo desarrollan [2] regulan las configuraciones de los puntos de medida o puntos frontera, siendo preciso para medir la energía intercambiada la combinación de medidas trifásicas de alta tensión y de alta corriente, estando el circuito cuya corriente se desea conocer conectado a alta tensión.

Desde un punto de vista de seguridad de las redes eléctricas en caso de sobrecarga o de cortocircuito, los transformadores, los propios contadores y el material eléctrico de la instalación deben soportar el paso de altas corrientes, tanto en alta como en baja tensión, en consonancia con la reglamentación aplicable en seguridad industrial [3], [4]. Igualmente es necesario monitorizar la calidad de onda de la corriente que circula por las redes, en especial su contenido de armónicos. Para ello los relés de protección y los analizadores de potencia necesitan conocer el valor instantáneo de la alta corriente, información que reciben a través de una señal digital mediante "Sampled Values" conforme IEC 61850 o bien mediante una salida analógica que se obtiene de un transformador de intensidad inductivo o de un sensor basado en cualquier otro principio de funcionamiento, por ejemplo, un sensor óptico. El documento [5] incluye características técnicas de los tipos de sensores y transformadores de medida o protección necesarios para medir corrientes elevadas en alta tensión.

Con objeto de reducir las pérdidas en transformadores de potencia estos bienes de equipo deben cumplir con la directiva europea de ecodiseño [6] y con el reglamento que la desarrolla [7], en vigor desde 2015, de manera que se reduzcan las pérdidas del transformador en toda su vida útil y mejore su eficiencia energética. El ahorro estimado en pérdidas es de 16,2 TWh/año para toda Europa en 2025, lo que equivale a la mitad del consumo eléctrico de Dinamarca y supone una disminución de las emisiones de CO₂ a la atmósfera de 3,7 Mt /año.

La medida de los impulsos de alta corriente originados por las caídas de rayos es un campo de creciente interés. La caída de rayos es uno de los fenómenos naturales que puede poner en peligro a las personas, a la aviación, a los edificios, al transporte y distribución de energía y a las propias instalaciones eléctricas receptoras o generadoras, con especial atención a los parques eólicos. Numerosos estudios [8] y [9] afirman que el cambio climático y el incremento de temperatura en la superficie de la tierra incrementarán la caída de rayos, dependiendo los cambios del nivel cerámico del perfil de temperaturas en la troposfera y de la carga de aerosoles en la atmósfera.

Es necesario medir las corrientes del rayo para conocer, prevenir y mitigar sus efectos. Los daños provocados por el rayo pueden ser muy destructivos cuando circula su corriente a través de materiales no conductores, por ejemplo, por la estructura de un edificio o por las palas de los aerogeneradores. Para evitarlo, la corriente debe ser conducida a tierra por los pararrayos de los edificios, por los cables de guarda y pararrayos de las líneas aéreas, por los cables de tierra embebidos en las palas de los aerogeneradores o por los cables de las instalaciones de baja tensión, hasta los dispositivos de protección de sobretensiones, DPS, encargados de drenar a tierra estas corrientes. Esta es la forma de proteger los receptores industriales y domésticos y los equipos electrónicos e informáticos. El efecto del rayo es incluso más amplio, destacando el estudio de la caída de rayos sobre aeronaves, aerogeneradores o mástiles de barcos. Para caracterizar estos efectos, mejorar los diseños o realizar ensayos según normas, los laboratorios independientes y los fabricantes requieren de sistemas de medida de alta corriente con trazabilidad metrológica, capaces de medir la duración de la corriente, la carga transferida mediante la integración de la corriente y la energía asociada a la descarga del rayo:

$$\text{Carga de una corriente de choque, } Q = \int_0^{\infty} |i(t)| dt \quad (1)$$

$$\text{Energía específica o integral de Joule, } I^2t = \int_0^{\infty} i^2(t) dt \quad (2)$$

Los desarrollos metrológicos del LCOE para la medida de alta corriente han sido respaldados mediante la publicación del RD 227/2002 que reconoce al LCOE de la F2I2, como laboratorio asociado al Centro Español de Metrología para el campo metrológico de la alta corriente eléctrica, además del ya reconocido de la alta tensión. Mediante este real decreto el LCOE pasa a ser depositario de los patrones nacionales de corriente eléctrica por encima de 1000 A, tanto para baja frecuencia (50/60 Hz) como para impulsos. En este artículo se presentan las capacidades de medida del LCOE en este campo.

2. PATRONES DE ALTA CORRIENTE DEL LCOE

2.1 Medidas de alta corriente a frecuencia industrial.

Los patrones son comparadores de corriente con múltiples relaciones, cuyo funcionamiento se asemeja al de un transformador de intensidad, pero con errores de relación y ángulo mucho más

pequeños. La trazabilidad se obtiene del laboratorio nacional suizo METAS tal y como se indica en el diagrama de niveles, siendo necesaria también la trazabilidad procedente del CEM para la calibración que realiza el LCOE a los puentes de relación utilizados en estas medidas.

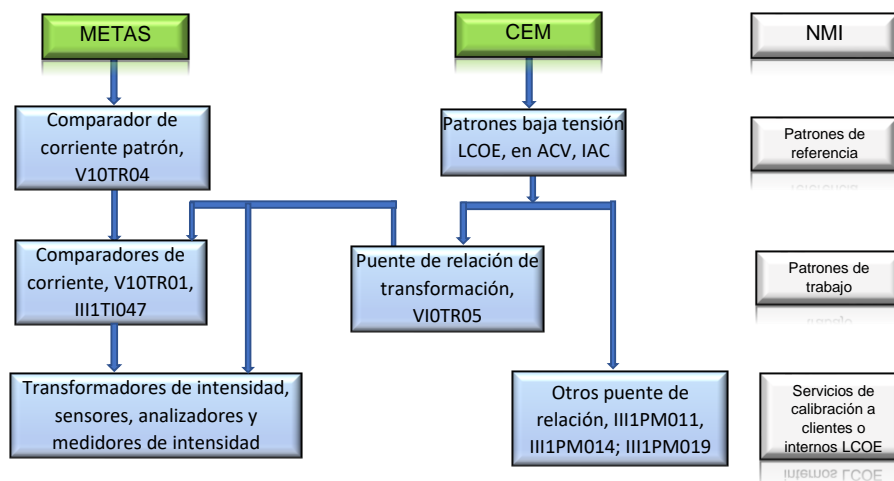


Fig. 1. Diagrama de niveles para medidas de alta intensidad a frecuencia industrial.

El comparador de corriente se diferencia del transformador de intensidad convencional en que el flujo magnético que provoca la fuerza electromotriz necesaria para alimentar la carga conectada al circuito secundario se reduce a un valor casi nulo mediante un circuito de compensación. Su funcionamiento está profusamente descrito desde 1961 por Kusters, Moore, Miljanic y otros, a través de los trabajos realizados principalmente en el NRC de Canadá, [10], [11] y [12].

Los comparadores de corriente del LCOE disponen de cuatro arrollamientos (primario, secundario, de compensación y de detección) y de tres núcleos magnéticos (principal, auxiliar externo y auxiliar interno). Los arrollamientos primario y secundario abrazan tanto el núcleo magnético principal como los dos auxiliares, el arrollamiento de compensación abraza los dos núcleos auxiliares y el de detección únicamente el núcleo auxiliar interno. En la figura 2 se puede apreciar su principio constructivo.

En un transformador de intensidad ideal su relación de transformación coincidiría con la relación del número de vueltas de los arrollamientos secundario y primario.

$$k_n = \frac{I_{p,nominal}}{I_{s,nominal}} = \frac{N_s}{N_p} \quad (3)$$

En un transformador de intensidad inductivo real los amperios vuelta del secundario ($N_s \cdot I_s$), difieren de los amperios vuelta del primario ($N_p \cdot I_p$) en una cantidad ($N_s \cdot I_\Delta$), que coincidiría con el error de un comparador en ausencia de compensación, es decir:

$$N_s \cdot I_\Delta = N_s \cdot I_s - N_p \cdot I_p \quad (4)$$

Este desequilibrio de amperios vuelta ($N_s \cdot I_\Delta$) es lo que provoca el flujo y al mismo tiempo el error de relación y ángulo del transformador. Si mediante un arrollamiento de compensación con el mismo número de vueltas que el secundario se inyecta una corriente I_c proporcional al flujo se

puede compensar este desequilibrio de amperios vuelta hasta alcanzar un error residual (de relación y ángulo) muy pequeño, I_{Δ}^* .

$$N_s \cdot I_{\Delta}^* = N_s \cdot I_s + N_c \cdot I_c - N_p \cdot I_p \quad (3) \quad \text{tal que: } I_{\Delta}^* \ll I_{\Delta}$$

En los comparadores del LCOE el flujo residual se mide con un arrollamiento de detección que alimenta un circuito amplificador de manera que se varía la corriente de compensación I_c hasta que la tensión inducida por el flujo sea prácticamente nula. Con esta técnica se obtienen errores menores de 0,001% en relación y 0,1 minutos en ángulo, con corrientes de excitación comprendidas entre el 1% y el 200% de la intensidad nominal de la relación del comparador. En la figura 2 se representa también el principio básico de funcionamiento descrito.

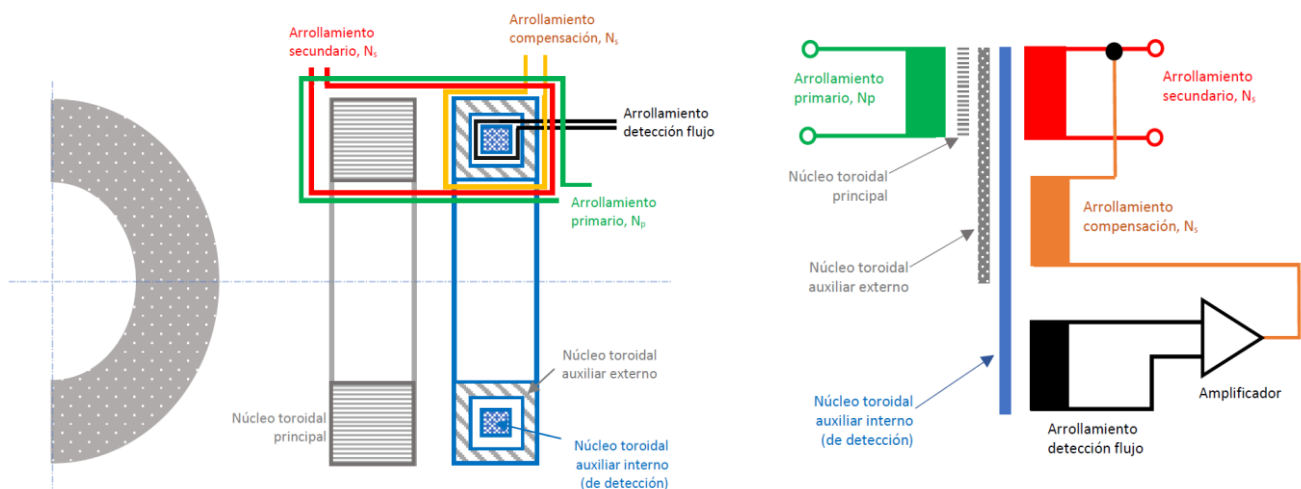


Fig. 2. Dibujo constructivo y principio de funcionamiento de los comparadores de corriente del LCOE.

El error de relación residual, I_{Δ}^* , tiene dos causas, por una parte, los efectos del flujo magnético disperso y del campo magnético ambiental y el otro y más importante la corriente de fugas capacitiva que provoca que la corriente que entra por un extremo del arrollamiento no sea exactamente igual a la que abandona el otro extremo. Los errores de tipo magnético se minimizan mediante la elección de núcleos con reluctancia uniforme en toda su sección, mientras que las fugas capacitivas se reducen mediante pantallas conectadas a tierra.

Las calibraciones con alta corriente requieren de una serie de precauciones recogidas en un procedimiento interno que si no se respetan pueden aportar más incertidumbre al resultado de la calibración que los patrones utilizados (puente de relación y comparador de corriente). Por ejemplo:

- Colocación de los cables que transportan la alta corriente (algunos kA) de forma que se minimice el campo magnético creado por los bucles de corriente en la proximidad de los comparadores de corriente y del transformador o sensor a calibrar.
- Alimentación de los patrones activos (comparadores y puente) a una frecuencia ligeramente distinta a la del circuito de potencia para disminuir la variabilidad de las lecturas.

- Desmagnetización previa de los transformadores a calibrar y sentido del ciclo de calibración, para minimizar la histéresis, generalmente con corrientes decrecientes.
- Efecto del puente de medida de relación, especialmente cuando los factores de escala del calibrando y patrón no coinciden y el puente funciona comparado corrientes muy distintas.

El LCOE dispone de varios comparadores para medir corrientes de hasta 12 kA, realizando calibraciones tanto en laboratorio como in situ. Los transformadores de medida de alta corriente con aislamiento de alta tensión tienen dimensiones de varios metros por lo que el servicio de calibración “in situ” resulta muy atractivo para los laboratorios de alta tensión al evitar el embalaje y envío de sus patrones al laboratorio de referencia.



Fig. 3. Calibración “in situ” de transformadores de intensidad en un laboratorio de alta tensión.

Para demostrar sus capacidades de medida y compararlas con las de otros NMI y DI europeos el LCOE participó en la intercomparación EURAMET S-37. Los resultados de esta intercomparación permitieron el reconocimiento de las capacidades de medida del LCOE en la base de datos KCDB del BIPM (<https://www.bipm.org/kcdb>). Un ejemplo de estos resultados en forma de gráfico se muestra en la figura 4 y en el informe de la intercomparación [13].

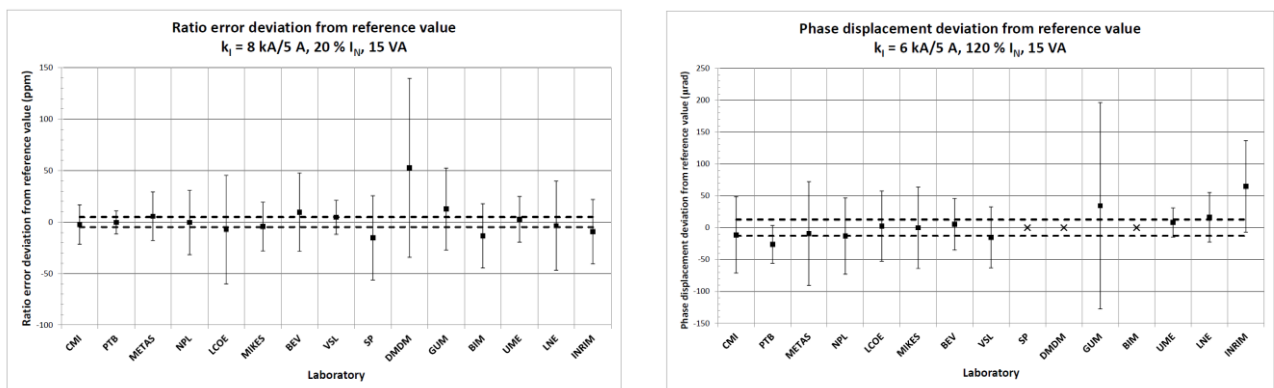


Fig. 4. Resultados del LCOE en la intercomparación EURAMET EM S-37.

2.2 Medidas de alta corriente transitorias o impulsionales.

La medida de impulsos de corriente, también llamados corrientes de choque (tanto en valor de pico, como en parámetros temporales o duración) se utiliza en ensayos de pararrayos, ensayos de compatibilidad electromagnética (EMC) de diferentes componentes, así como en los ensayos de protección contra descargas directas en las estructuras de aviación.

Las formas de onda son múltiples, según el tipo de ensayo a realizar y están definidas en las normas aplicables, por ejemplo, en [14] para aeronáutica. Las formas de onda de los impulsos de corriente más habituales son dobles exponenciales, [15], y se definen por un tiempo de frente T_1 y un tiempo hasta el valor medio o T_2 , tal y como muestra la tabla 1. En aeronáutica se utilizan las formas de onda impulsionales de la tabla 2.

Forma del impulso	Duración del frente, $T_1, \mu\text{s}$	Duración hasta el valor medio, $T_2, \mu\text{s}$	Intensidad máxima en LCOE
4/10	$4 \mu\text{s} \pm 12,5\%$	$10 \mu\text{s} \pm 10\%$	100 kA
8/20	$8 \mu\text{s} \pm 20\%$	$20 \mu\text{s} \pm 20\%$	200 kA
10/350	$10 \mu\text{s} \pm 30\%$	$350 \mu\text{s} \pm 20\%$	200 kA

Nota: tolerancias de los parámetros temporales según [15], aunque los Comités de estudios de normalización pueden especificar otros valores de tolerancia en sus normas de producto.

Tabla 1. Ejemplos de tipo de corrientes de choque exponenciales.

Tipo del impulso	Duración	Tiempo de frente μs	Acción integral	Intensidad
A	$\leq 500 \mu\text{s}$	$T_1 < 50 \mu\text{s}$	$2 \cdot 10^6 \text{ A}^2\text{s} \pm 20\%$	Pico $200 \text{ kA} \pm 10\%$
B	$\leq 5 \text{ ms}$	-	$10 \text{ C} \pm 10\%$	Media $2 \text{ kA} \pm 20\%$
C	$0,25 \text{ s} - 1 \text{ s}$	-	$200 \text{ C} \pm 20\%$	$200 - 800 \text{ A}$
D	$\leq 500 \mu\text{s}$	$T_1 < 25 \mu\text{s}$	$2,5 \cdot 10^6 \text{ A}^2\text{s} \pm 20\%$	Pico 100 kA

Tabla 2. Ejemplos de tipo de corrientes de choque en aeronáutica

Los sistemas de medida utilizados por los laboratorios de ensayo deberían garantizar una incertidumbre expandida con una probabilidad de cobertura del 95% del 3% en la medida de la corriente de ensayo y del 10 % en la medida de los parámetros temporales, para lo cual es necesaria su calibración con un sistema de referencia de menor incertidumbre. En la figura 5 se muestra el diagrama de niveles del LCOE que permite calibrar sistemas de medida aprobados

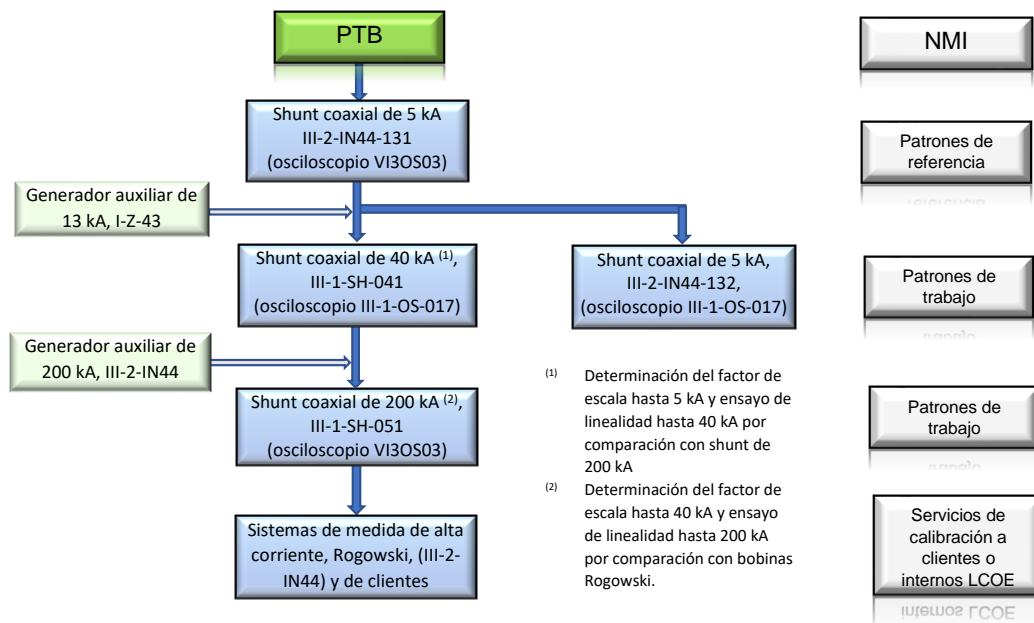


Fig. 5. Diagrama del LCOE para calibración de sistemas de medida aprobados.

Para realizar calibraciones de alta corriente uno de los retos es disponer de generadores con la suficiente estabilidad para su uso en calibración, no existiendo generadores comerciales de alta corriente capaces de variar con flexibilidad las formas de onda de los impulsos de alta corriente. El LCOE cuenta con generadores de hasta 200 kA diseñados y contruidos internamente, capaces de generar impulsos de corriente normalizados, (III-2-IN-44), con capacidad de variar la forma de onda.

Entre las precauciones de medida más significativas cabe destacar que cualquier conexión del circuito presenta una inductancia propia y mutua, de modo que para intensidades muy elevadas, partes del circuito aparentemente equipotenciales al estar unidas a través de un simple conductor pueden estar sometidas a decenas de kilovoltios si la pendiente de las ondas de corriente son del orden de decenas de kA/ μ s por lo que se deben utilizar distintos osciloscopios, aislados de red y de la tierra, para los dos sistemas de medida a comparar. Con tal fin se puede utilizar baterías de continua y un inversor para su alimentación. Igualmente se recalca la importancia de la validación del software mediante las formas de onda matemáticas de la norma [16].

3. CAPACIDADES DE MEDIDA, CMC.

Como consecuencia de los desarrollos metroológicos consolidados durante los últimos años, el LCOE puede ofrecer capacidades de medida y calibración para la medida de alta corriente, destacando respecto de laboratorios nacionales (NMI) o DI (Institutos designados) por alcanzar intensidades impulsionales de hasta 200 kA y por su capacidad de realizar algunas calibraciones "in situ". Estas capacidades se resumen de forma abreviada en la tabla 2.

Tipo de corriente	Calibraciones en:	Rango de intensidad y forma de onda	Incertidumbre, 95 % de probabilidad (1)
Frecuencia industrial, 50Hz, 60 Hz	Laboratorio permanente	Hasta 8000 A Onda senoidal	17.10 ⁻⁶ (en relación) 0,1 min (en ángulo)
	“in situ”	Hasta 12000 A Onda senoidal	1,0.10 ⁻⁴ (en relación) 0,4 min (en ángulo)
Corrientes impulsionales o de choque	Laboratorio permanente	1 kA ≤ I ≤ 5 kA 8/20 y 10/350	0,6 % (en intensidad) 2,3 % (para T ₁) 1,9 % (para T ₂)
		5 kA < I ≤ 40 kA 8/20 y 10/350	0,72 % (en intensidad) 2,8 % (para T ₁) 2,0 % (para T ₂)
		40 kA < I ≤ 200 kA 8/20 y 10/350	1,1 % (valor de cresta) 3,3 % (para T ₁) 2,2% (para T ₂)
(1) La incertidumbre puede variar según los rangos de medida, se incluye una incertidumbre representativa a título informativo.			

Tabla 3. Capacidades de medida y calibración del LCOE

4. CONCLUSIONES

En este artículo se han descrito las capacidades metrológicas del LCOE para la medida de alta corriente tanto a frecuencia industrial como para ondas de choque o impulsionales. La importancia de este campo metrológico en nuestra sociedad es creciente debido por una parte al cambio climático y el incremento en la caída de rayos, por la importancia de los intercambios de energía a través de la red de transporte eléctrica en alta tensión, para medir la eficiencia energética de ciertos elementos de la red eléctrica y para garantizar su funcionamiento seguro. El LCOE dispone ya de capacidades de medida y calibración para atender estas necesidades reconocidas y acreditadas y tiene el objetivo de mejorar y ampliar estos reconocimientos en los años próximos.

5. REFERENCIAS

[1] Real Decreto 1110/2007, de 24 de agosto, por el que se aprueba el Reglamento unificado de puntos de medida del sistema eléctrico.

[2] Orden TEC/1281/2019, de 19 de diciembre, por la que se aprueban las instrucciones técnicas complementarias al Reglamento unificado de puntos de medida del sistema eléctrico.

[3] Real Decreto 337/2014, de 9 de mayo, por el que se aprueban el Reglamento sobre condiciones técnicas y garantías de seguridad en instalaciones eléctricas de alta tensión y sus Instrucciones Técnicas Complementarias ITC-RAT 01 a 23.

[4] Real Decreto 842/2002, de 2 de agosto, por el que se aprueba el Reglamento electrotécnico para baja tensión.

[5] IEC TR 61869-103:2012. Instrument transformers - The use of instrument transformers for power quality measurement.

[6] Directiva 2009/125/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 21 de octubre de 2009, por la que se insta un marco para el establecimiento de requisitos de diseño ecológico aplicables a los productos relacionados con la energía.

[7] Reglamento (UE) n.º 548/2014 de la Comisión, de 21 de mayo de 2014, por el que se desarrolla la Directiva 2009/125/CE del Parlamento Europeo y del Consejo en lo que respecta a los transformadores de potencia pequeños, medianos y grandes

[8] Osmar Pinto Jr, Atmospheric Electricity Group (ELAT). Earth Science System Center (CCST) "Lightning and climate: a review". 2013 International Symposium on Lightning Protection (XII SIPDA), Belo Horizonte, Brazil, October 7-11, 2013.

[9] I. Fisher, P.R.P. Hoole, K. Pirapaharan, S. Thirukumar, S.R.H. Hoole. Cloud to Ground and Ground to Cloud Flashes in Lightning Protection: And Future Severe Lightning and Climate Change. 2014 International Conference on Lightning Protection (ICLP), Shanghai, China.

[10] N.L. Kusters, W. J. M. Moore, The current comparator, and its application to the absolute calibration of current transformers. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems, 1961. Volume: 80. Issue: 3. Journal article.

[11] N. L. Kusters, W. J. M. Moore. The Compensated Current Comparator; A New Reference Standard for Current-Transformer Calibrations in Industry. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1964, Volume: IM-13. Issue: 2/3. Journal Article.

[12] N. L. Kusters. The precise measurement of current ratios. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1964. Volume: IM-13. Issue: 4. Journal Article.

[13] Karel Draxler, Renata Styblíková, Jan Hlaváček, Gert Rietveld, EURAMET EM S-37, Euramet Project 1187. Comparison of instrument current transformers up to 10 kA.

[14] EUROCAE-ED84 Aircraft Lightning Environment and Related Test Waveforms Standard (July 2013).

[15] UNE-EN 62475:2012. Técnicas de ensayo de alta intensidad. Definiciones y requisitos para los ensayos de intensidad y sistemas de medición.

[16] UNE-EN 61083-2:2014. Instrumentos y software utilizado para medida en ensayos de alta tensión y alta corriente. Parte 2: Requisitos para software para ensayos con impulsos de tensión y de corriente.

6. AGRADECIMIENTOS.

El LCOE quiere agradecer a EURAMET por organizar la intercomparación suplementaria EM-S37 para la medida de alta corriente de frecuencia industrial y al CMI, laboratorio nacional de Chequia, por actuar como laboratorio piloto.