

PATRÓN NACIONAL DE TENSIÓN EN CORRIENTE ALTERNA

Sara A. Campos, José A. Moreno
Centro Nacional de Metrología
km 4,5 Carretera a los Cués, El Marqués, 76241, Querétaro, Qro., México
Tel. +52 (442) 211 05 00, FAX +52 (442) 211 05 48, scampos@cenam.mx, jmoreno@cenam.mx

Resumen: El CENAM estableció su patrón nacional de tensión en corriente alterna, en colaboración con institutos metrológicos nacionales. Como resultado se tiene un alcance de medición de 1 mV a 1 kV a frecuencias de 40 Hz a 1 MHz y una considerable reducción de la incertidumbre de medición. El mantenimiento del patrón tensión en corriente alterna que se ha realizado en el CENAM, basado en la realización de escalamientos con termoconvertidores multiunión, es consistente dentro de las incertidumbres declaradas, desde su establecimiento hasta la fecha. En este documento se muestran los resultados.

1. INTRODUCCIÓN

Realizar mediciones de corriente alterna (c.a.) con la menor incertidumbre requiere del uso de termoconvertidores, dispositivos con los que se compara el valor raíz cuadrático medio de una señal alterna con su equivalente en corriente continua (c.c.)

Hasta 1998 el patrón nacional de tensión en c.a. establecido en el CENAM, estaba basado en un termoconvertidor comercial (TTS) cuya respuesta c.a.-c.c., o diferencia c.a.-c.c. ($\delta_{c.a.-c.c.}$), se conocía en el intervalo de tensión de 600 mV a 1 kV, a frecuencias de 10 Hz a 1 MHz. Estos valores eran trazables a los patrones nacionales mantenidos en el National Institute of Standards and Technology (NIST) de Estados Unidos. La incertidumbre expandida que se tenía con este dispositivo, para tensiones de 600 mV a 100 V, era de $\pm 15 \mu\text{V/V}$, en audiofrecuencias y se incrementaba a $\pm 0,07 \text{ mV/V}$ para frecuencias de hasta 1 MHz. Para tensiones de 100 V a 1 kV, la incertidumbre obtenida era de $\pm 0,02 \text{ mV/V}$ en audiofrecuencias y $\pm 0,05 \text{ mV/V}$ para frecuencias de 100 kHz.

El contar con un dispositivo comercial como patrón nacional, con el alcance e incertidumbre señalados, no atendía las demandas de trazabilidad e incertidumbre de instrumentos de medición de tensión en c.a. de exactitud similar. Adicionalmente, la calibración del TTS por un laboratorio extranjero, en el alcance citado, requería de un presupuesto muy alto. Por estas razones el CENAM estableció con el Physikalisch - Technische Bundesanstalt (PTB) de Alemania y con el Nederlands Meetinstituut Van Swinden Laboratorium (VSL) de

Holanda, proyectos de cooperación para establecer el patrón nacional de tensión en c.a. del CENAM utilizando termoconvertidores multiunión (PMJTCs), dispositivos que actualmente proporcionan la menor incertidumbre para la realización de mediciones de c.a., con los cuales, utilizando técnicas de medición adecuadas, se puede escalar hasta 1 kV y en baja tensión hasta 1 mV, empleando un PMJTC con valores conocidos de $\delta_{c.a.-c.c.}$ a 1 V y frecuencias de 10 Hz a 1 MHz.

A continuación se indican los resultados logrados en las etapas de colaboración con el PTB y el VSL, haciendo una comparativa de los logros en alcance e incertidumbre con respecto al anterior patrón comercial. Así mismo, se indica una comparativa de los resultados obtenidos con los sistemas de medición del VSL y del PTB y los resultados obtenidos con el sistema de medición del CENAM.

2. PATRONES DE 1 V, 1,5 V Y 2 V

El CENAM cuenta con un grupo de PMJTCs diseñados y fabricados por el PTB y el Institut für Physikalische Hochtechnologie (IPHT) de Alemania [1], cuyos alcances nominales son de 1 V, 1,5 V y 2 V, a frecuencias de operación de 10 Hz a 1 MHz. Uno de estos PMJTCs, con valor nominal de 1 V, es utilizado como referencia para el paso inicial de los escalamientos que permiten obtener los valores de referencia en el alcance de medición de 1 mV a 1 kV.

Los valores de la $\delta_{c.a.-c.c.}$ de dos PMJTCs fueron calibrados por el PTB en 1998 con incertidumbre expandida de $\pm 2 \mu\text{V/V}$ en audiofrecuencias, la cual se incrementa a $\pm 30 \mu\text{V/V}$ hasta 1 MHz

(ver figura 1). Desde esa fecha los dos PMJTCs no han sido calibrados, pero se han intercomparado en el CENAM para verificar que sus valores se mantengan dentro de la incertidumbre esperada. En la figura 1 se muestra el seguimiento metroológico de uno de ellos, donde se aprecia que los valores en los diferentes años de intercomparación son consistentes con los valores de la calibración realizada en 1998 por el PTB.

La incertidumbre expandida obtenida de 1999 al 2004 es de $\pm 4 \mu\text{V/V}$ en audiofrecuencias y de $\pm 35 \mu\text{V/V}$ a 1 MHz, la cual incluye, entre otras componentes, la incertidumbre del sistema de medición del CENAM. Contrastando estas incertidumbres con las incertidumbres a 1 V que se tenían con el TTS ($\pm 15 \mu\text{V/V}$ a $\pm 0,07 \text{ mV/V}$), la incertidumbre actual es al menos tres veces mejor.

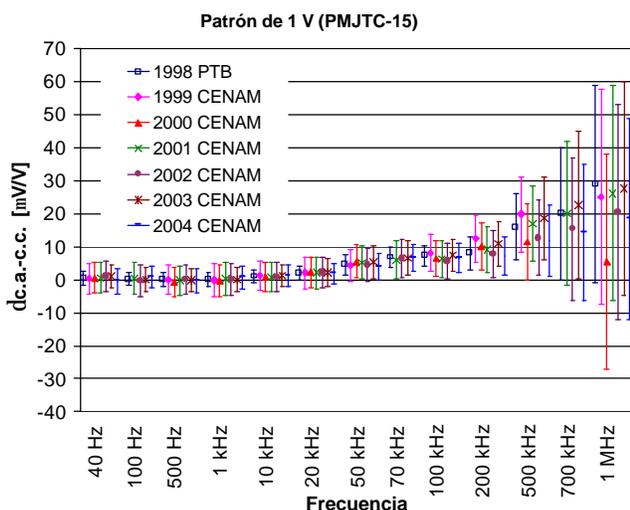


Fig. 1 Seguimiento metroológico de los valores de la $\delta_{c.a.-c.c.}$ del patrón de 1 V, que da trazabilidad a la escala de tensión en c.a.

Para utilizar los PMJTCs a tensiones mayores a 2 V se requiere de su uso en conjunto con resistores que limiten la corriente que circula al PMJTC, por lo que se debe conocer la $\delta_{c.a.-c.c.}$ del conjunto PMJTC-resistor.

Durante el proyecto de cooperación técnica con el PTB se aprendieron técnicas de escalamiento en tensión en c.a. para realizar mediciones desde 1 V hasta 1 kV. Así mismo se llevó a cabo la selección, construcción y caracterización de los resistores que se utilizan conjuntamente con los PMJTCs.

3. ESCALA DE TENSIÓN EN C.A. DE 1 V A 1 kV.

El CENAM cuenta con resistores coaxiales para el alcance de 5 V a 100 V, a frecuencias de 40 Hz a 1 MHz y con resistores de tipo planar para el alcance de 300 V a 1 kV a frecuencias de 40 Hz a 100 kHz. Estos últimos tienen mayor disipación de potencia y un diseño diferente para minimizar efectos de campos eléctricos [2][3].

Para conocer los valores de la $\delta_{c.a.-c.c.}$ de los conjuntos PMJTCs-resistores, se requiere calibrarlos contra un termoconvertidor cuya $\delta_{c.a.-c.c.}$ sea conocida en los puntos de tensión y frecuencia de interés. Las características de los conjuntos PMJTC-resistores con que cuenta el CENAM permiten llevar a cabo su calibración utilizando un proceso de escalamiento que consiste en calibrar un conjunto PMJTC-resistor a menos del 100 % de su alcance nominal, para posteriormente utilizar el conjunto calibrado al 100 % para calibrar otro conjunto de alcance superior, iniciando este proceso con un PMJTC de 1 V y repitiendo el proceso hasta la calibración del conjunto PMJTC-resistor de 1 kV.

La representación de este proceso se ilustra en la figura 2, en la que se muestran los diferentes conjuntos de PMJTCs - resistores del CENAM.

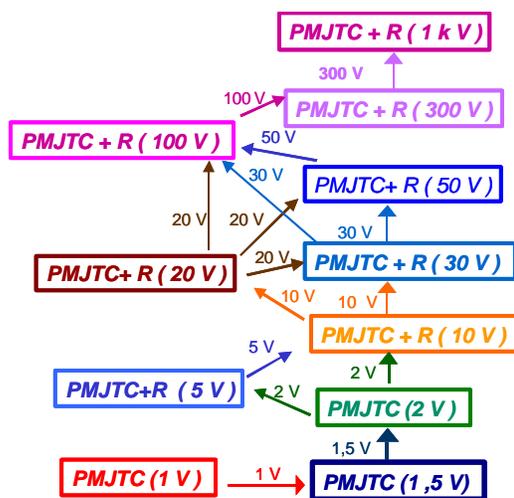


Fig. 2 Proceso de escalamiento en tensión en c.a. de 1 V a 1 kV con el conjunto de PMJTC-resistores del CENAM.

A partir de los valores de la $\delta_{c.a.-c.c.}$ del PMJTC de 1 V el proceso de escalamiento en tensión en c.a. de 1 V a 1 kV se ha realizado anualmente en el

CENAM. Este proceso da como resultado el conocimiento de los valores de la $\delta_{c.a.-c.c}$ de los patrones de 1,5 V, 2 V, 5 V, 10 V, 20 V, 30 V, 50 V, 100 V, 300 V y 1 kV, los cuales pueden ser utilizados a su tensión nominal y hasta el 20 % de la misma, adicionando valores redundantes de la $\delta_{c.a.-c.c}$ de referencia en la escala de tensión en c.a.

Los resultados durante los diferentes años en los que se ha realizado el escalamiento muestran consistencia con respecto a los resultados que se obtuvieron en el PTB, siendo los más representativos los valores de la $\delta_{c.a.-c.c}$ de los patrones que se utilizan en los últimos pasos del escalamiento, ya que representan la correcta realización de la escala desde 1 V hasta 1 kV.

La figura 3 muestra los valores de la $\delta_{c.a.-c.c}$ del conjunto PMJTC-resistor que constituye el patrón de 300 V, obtenidos durante los diferentes escalamientos realizados en el CENAM. En la figura se incluyen los resultados de las mediciones realizadas en el año 2000 con el sistema de medición y con los patrones del PTB, observándose consistencia en los resultados de los escalamientos realizados en el CENAM, dentro de la incertidumbre expandida reportada.

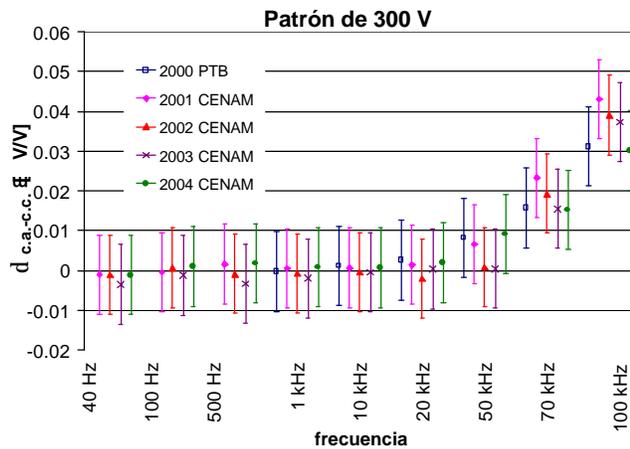


Fig. 3 Seguimiento metrológico de los valores de la $\delta_{c.a.-c.c}$ del patrón de 300 V.

La incertidumbre que actualmente se tiene con el patrón de 300 V en el intervalo de frecuencia de 40 Hz a 100 kHz es del orden de $\pm 0,01$ mV/V, la cual se ha mantenido de este orden desde el año 2000 a la fecha.

Realizando el escalamiento en el CENAM se pueden realizar mediciones en el intervalo de

200 mV a 1 kV, a frecuencias de 40 Hz a 1 MHz, con incertidumbre cinco veces menor que la que se tenía anteriormente con el TTS y sin el requerimiento de la calibración externa de diferentes puntos de la escala de tensión en c.a.

4. ESCALA EN TENSIÓN EN C.A. DE 200 mV A 1 mV.

En colaboración técnica con el VSL de Holanda, se estudiaron técnicas de escalamiento en baja tensión para ampliar la capacidad de medición hasta 1 mV a frecuencias de 10 Hz a 1 MHz.

Con los PMJTCs la mínima tensión que se puede medir es de 200 mV. Para los intervalos de tensión de 200 mV a 1 mV el CENAM utiliza un TTS, con el cual es posible medir hasta estos niveles de tensión y a frecuencias de 10 Hz a 1 MHz.

La trazabilidad para la calibración del TTS se obtiene de los valores de la $\delta_{c.a.-c.c}$ de un PMJTC de 1 V, utilizado a 200 mV. Para escalar hacia 1 mV el TTS es utilizado junto con un termoconvertidor de baja tensión o micropotenciómetro, con alcance de 200 mV a 2 mV. El micropotenciómetro integra un arreglo de resistores en serie que dividen la tensión para proporcionar siete salidas con diferente alcance. El micropotenciómetro sólo es utilizado para transferir los valores de $\delta_{c.a.-c.c}$ al TTS.

La $\delta_{c.a.-c.c}$ del TTS es dependiente del nivel de tensión aplicado, por lo que el proceso de escalamiento seguido con los PMJTCs no se puede aplicar con este dispositivo, sin embargo auxiliándose con el micropotenciómetro, cuya $\delta_{c.a.-c.c}$ sí es independiente del nivel de tensión aplicado, es posible realizar el escalamiento en baja tensión.

Durante el escalamiento las siete salidas del micropotenciómetro son calibradas al 100 % de su alcance nominal para posteriormente utilizarse al 50 % del mismo para calibrar al TTS. La figura 4 muestra esquemáticamente el proceso de escalamiento en baja tensión en c.a.

El escalamiento requiere de consideraciones particulares debido a que los circuitos de amplificación del TTS provocan que el valor de la parte resistiva de su impedancia de entrada disminuya su valor con la frecuencia, provocando efectos de carga.

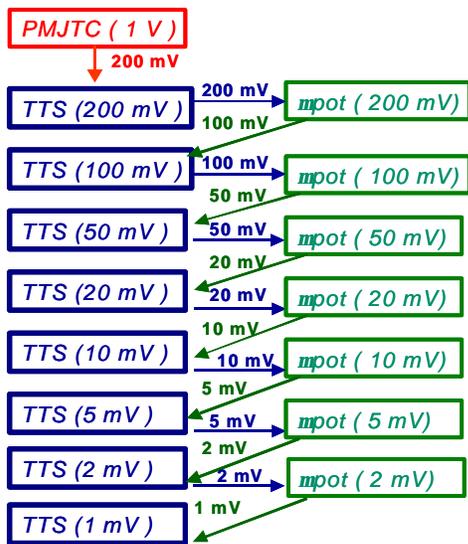


Fig. 4 Escalamiento en tensión en c.a. de 200 mV a 1 mV (mpot = micropotenciómetro).

A partir del 2001 el proceso de escalamiento en baja tensión se realiza anualmente en el CENAM, utilizando como referencia de 200 mV los valores de la $\delta_{c.a.-c.c}$ del PMJTC que fueron mostrados en la figura 1 y la combinación de un TTS y de un micropotenciómetro propiedad del CENAM.

Del 2001 al 2003 el escalamiento en baja tensión en c.a. se realizó hasta 2 mV y a partir del 2003 se realiza hasta 1 mV, a frecuencias de 40 Hz a 1 MHz.

El TTS utilizado para los valores de $\delta_{c.a.-c.c}$ de baja tensión es el termoconvertidor comercial que anteriormente era el patrón nacional de tensión en c.a., mismo que actualmente es el patrón de trabajo en todo el alcance de medición del patrón y del que se tiene conocimiento de sus valores de $\delta_{c.a.-c.c}$ en sus diferentes intervalos de tensión desde 1996, razón por la que los valores de la $\delta_{c.a.-c.c}$ en baja tensión, obtenidos a partir del 2001, pueden ser comparados con los obtenidos cuando se realizó el escalamiento en el VSL. En la figura 5 se muestran los resultados de los valores de la $\delta_{c.a.-c.c}$ a 2 mV del TTS del CENAM durante los escalamientos realizados en el CENAM, y se incluyen los resultados del mismo TTS obtenidos en el VSL, utilizando los patrones y el sistema de medición del VSL.

A medida que el escalamiento se realiza a tensiones de menor valor la incertidumbre se incrementa debido a la inestabilidad del comportamiento de los amplificadores del TTS, así como a las

componentes de incertidumbre que se integran en cada paso del escalamiento.

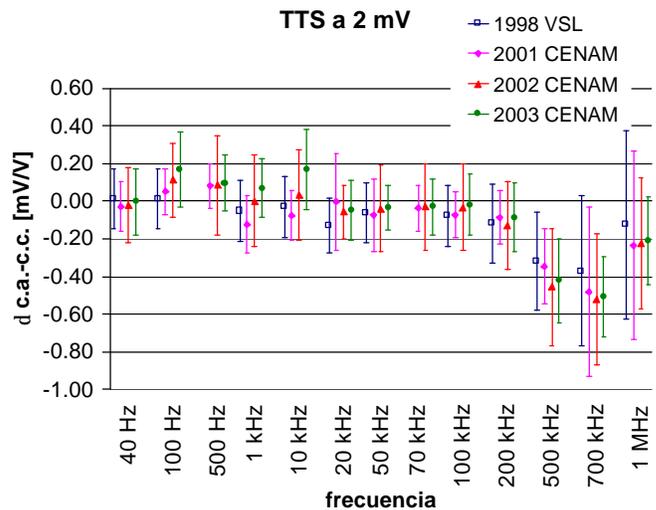


Fig. 5 Seguimiento metrológico de los valores de la $\delta_{c.a.-c.c}$ del TTS del CENAM a 2 mV.

Anteriormente la mínima tensión en la que se tenía trazabilidad con este dispositivo era de 600 mV mientras que ahora, realizando el escalamiento en el CENAM partiendo de un PMJTC con valores conocidos de $\delta_{c.a.-c.c}$, se puede obtener trazabilidad hasta 1 mV.

Durante los primeros años de la realización del escalamiento en baja tensión en el CENAM, se incluían componentes de incertidumbre tales como las diferencias entre los resultados obtenidos con respecto al VSL y una sobrestimación de la dependencia de tensión del micropotenciómetro. Estas componentes se han minimizado, con lo que se ha logrado reducir la incertidumbre que originalmente se obtenía ($\pm 0,5$ mV/V a 1 MHz), ver figura 5. Las incertidumbres que actualmente se logran a 2 mV, van de $\pm 0,18$ mV/V en audiofrecuencias a $\pm 0,23$ mV/V a 1 MHz, lo cual significa una mejora de al menos dos veces la incertidumbre anterior.

5. CONCLUSIONES Y TRABAJO A FUTURO

Con el trabajo de colaboración técnica con el PTB y el VSL se ha logrado que el alcance de medición del patrón de tensión en c.a. sea de 1 mV a 1 kV a frecuencias de 40 Hz a 1 MHz.

Los escalamientos realizados en el CENAM a partir de los valores de la $\delta_{c.a.-c.c}$ de un PMJTC, hasta 1 kV y hasta 1 mV, son consistentes con su realización

anual y también con su realización en el PTB y en el VSL.

Las incertidumbres de los valores de la $\delta_{c.a.-c.c}$, en todo el alcance de la medición del patrón, se han reducido, satisfaciendo y superando los requerimientos de los instrumentos de medición de tensión en c.a. de mayor exactitud que existen actualmente en México.

Para confirmar los valores de la $\delta_{c.a.-c.c}$ del PMJTC de 1 V de referencia y la correcta transferencia de sus valores durante los escalamientos, se verificarán algunos pasos estratégicos de los mismos, con la participación del CENAM en las comparaciones clave SIM-EM.k6a (3 V; 1 kHz, 20 kHz, 100 kHz, 1 MHz), SIM-EM.k9 (1000 V; 1 kHz, 10 kHz, 20 kHz, 50 kHz, 100 kHz;) y SIM-EM.K11 (100 mV; 1 kHz, 20 kHz, 100 kHz, 1 MHz), que actualmente se están llevando a cabo y cuyos resultados se ligarán a las correspondientes comparaciones clave del CCEM.

REFERENCIAS

- [1] M. Klonz, H. Laiz and E. Kessler, "Development of Thin Film Multijunction Thermal Converters in PTB/IPHT," Symposium on Microtechnology in metrology and metrology in Microsystems. The Netherlands, August 2000, pp. 7-11
- [2] M. Klonz, T. Spiegel, H. Laiz and E. Kessler, "A 1000 V Resistor for AC-DC Voltage Transfer," IEEE Trans. Instrum. Meas., Vol. 48, No. 2, April 1999, pp. 404-407
- [3] S.Campos, M. Klonz, "Termoconvertidores con resistores planos para la transferencia c.a. – c.c. de 100 V a 1000 V". Memorias del Simposio de Metrología. Querétaro, Qro. Mayo 30 y 31, 2001. pp. Ca16 – Ca19.
- [4] S.Campos, M. Klonz, C. J. van Mullem, "Improvements in AC-DC Voltage Transfer at CENAM". 2002 Conference on Precision Electromagnetic Measurements. Conference Digest ISBN 0-7803-7243-3. Ottawa Canada, June 2002, WeF4