

VALIDACIÓN DE LOS MÉTODOS DE CALIBRACIÓN EN TENSIÓN ELÉCTRICA CONTINUA DEL LABORATORIO MULTIFUNCIONES

David Avilés, Dionisio Hernández, Enrique Navarrete, Marco A. Rodríguez
Centro Nacional de Metrología, División de Mediciones Electromagnéticas
Carretera a Los Cués km 4.5, El Marqués, Qro. 76241 México
Tel: (442)2110500 Ext 3451, Fax: 2153904, e-mail: enavarre@cenam.mx

Resumen: En el Laboratorio Multifunciones del CENAM se calibran vóltmetros de alta exactitud en la magnitud de tensión eléctrica continua mediante diferentes métodos que dependen del valor de tensión a medir. Se realizó la validación de estos métodos de calibración en el Laboratorio de Tensión Eléctrica Continua en los puntos de 100 mV, 1 V, 10 V, 100 V y 1000 V, con trazabilidad al patrón nacional basado en el efecto Josephson. Se presentan los resultados de la validación, los cuales confirman la calidad de los servicios de calibración de vóltmetros de alta exactitud del Laboratorio Multifunciones, lo que contribuye al fortalecimiento del Sistema Metroológico Nacional.

OBJETIVO DE ESTE TRABAJO

Mostrar a la comunidad de usuarios de los servicios del Laboratorio Multifunciones los resultados de la validación de los métodos que se usan en dicho laboratorio para calibrar vóltmetros de alta exactitud.

ÁREA DE ESPECIALIDAD

Metrología eléctrica, tensión eléctrica continua.

INTRODUCCION

A. Laboratorio Multifunciones

En este laboratorio se realizan servicios de calibración de equipos multifunción en las cinco magnitudes eléctricas básicas: tensión eléctrica continua, tensión eléctrica alterna, corriente eléctrica continua, corriente eléctrica alterna y resistencia eléctrica; además de otras magnitudes como capacitancia y potencia. En la magnitud de tensión eléctrica continua, se realizan servicios de calibración de vóltmetros de alta exactitud, empleando para ello diferentes métodos de calibración que dependen del nivel de tensión a medir. Para calibrar vóltmetros de alta exactitud en el nivel de tensión de 10 V se usa el método de medición directa. En el nivel de 1 V se usa el método de la linealidad del vóltmetro, mientras que en los niveles de 100 mV, 100 V y 1000 V se usa el método del escalamiento. En las mediciones de niveles de 10 V o menores, adicionalmente se aplica la técnica de inversión de polaridad para compensar las fem térmicas del circuito de medición y el *offset* del vóltmetro.

B. Laboratorio de Tensión Eléctrica Continua

En este laboratorio se cuenta con el patrón nacional de tensión eléctrica continua basado en el efecto

Josephson, con el que se pueden generar niveles de referencia de -10 V a 10 V en pasos de 155 μ V. También de este laboratorio surgieron las propuestas de las técnicas de medición alterna para validar los métodos de calibración de vóltmetros del Laboratorio Multifunciones. Estas técnicas de medición alternas se describen adelante.

C. Procedimiento de validación

Para cada uno de los niveles de tensión (100 mV, 1 V, 10 V, 100 V y 1000 V), se realizó la calibración de un vóltmetro mediante el método del Laboratorio Multifunciones y mediante el método alterno del Laboratorio de Tensión Eléctrica Continua. Se usó el análisis del error normalizado como criterio para cuantificar la equivalencia entre los resultados obtenidos en ambos laboratorios.

MÉTODOS DE VALIDACIÓN

A. Medición directa con inversión de polaridad

Debido a que el patrón Josephson permite generar niveles de tensión entre -10 V y 10 V, en el Laboratorio de Tensión Eléctrica Continua se propuso el método de medición directa para validar los métodos de calibración del Laboratorio Multifunciones en los niveles de tensión de 100 mV, 1 V y 10 V. Para aplicar este método se conectó directamente el patrón Josephson al vóltmetro de alta exactitud a ser calibrado (Figura 1).

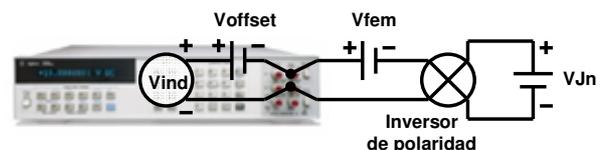


Figura 1. Medición directa con inversión de polaridad.

Se registró la tensión indicada por el voltmetro en presencia de fem térmicas y *offset* del voltmetro

$$V_{ind_1} = V_{offset_1} + V_{fem_1} + V_{Jn} \quad (1)$$

Se invirtió la polaridad de patrón Josephson y se realizó un segundo registro de la tensión indicada

$$V_{ind_2} = V_{offset_2} + V_{fem_2} - V_{Jn} \quad (2)$$

Cuando ambas mediciones se realizan en tiempos muy cercanos, se puede asumir que $V_{offset_1} = V_{offset_2}$ y $V_{fem_1} = V_{fem_2}$. Restando las dos ecuaciones y resolviendo para V_{Jn} se obtiene

$$V_{Jn} = \frac{V_{ind_1} - V_{ind_2}}{2} \quad (3)$$

La calibración del voltmetro en cada nivel de tensión (100 mV, 1 V y 10 V) consistió en generar con el patrón Josephson una tensión de referencia $V_{Jn\ ref}$, registrar el valor indicado por el voltmetro $V_{Jn\ ind}$, y calcular el error del voltmetro mediante

$$\epsilon = V_{Jn\ ind} - V_{Jn\ ref} \quad (4)$$

$$\epsilon = \frac{V_{i_1} - V_{i_2}}{2} - V_{Jn\ ref} \quad (5)$$

B. Medición con 10 referencias Zener en serie

Para validar el método de calibración en 100 V se usó un conjunto de diez referencias Zener de 10 V calibradas mediante el patrón Josephson y conectadas en serie, cuyo valor de referencia se definió como $V_{z\ ref} = V_{z1} + V_{z2} + \dots + V_{z10}$ (Figura 2).

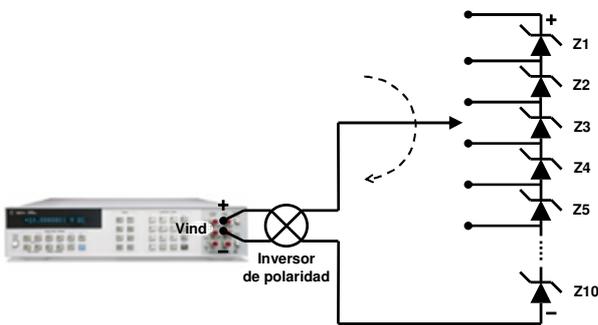


Figura 2. Medición con 10 referencias Zener en serie.

Se hizo la medición con la técnica de inversión de polaridad como en el caso anterior, y el error del voltmetro se obtuvo mediante

$$\epsilon = V_{z\ ind} - V_{z\ ref} \quad (6)$$

C. Medición con divisor resistivo y generador

Para validar el método de calibración en 1000 V se usó un divisor resistivo comercial con relación 100:1 y un generador de 1000 V haciendo las funciones de patrón de transferencia (Figura 3).

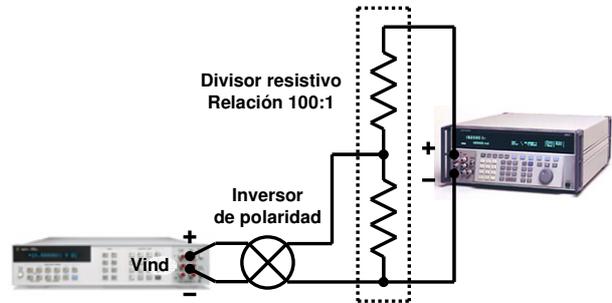
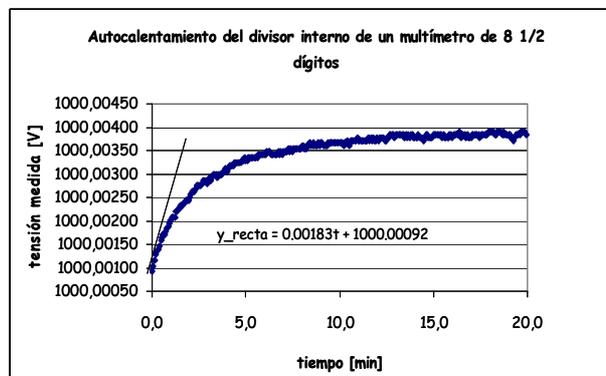


Figura 3. Medición con divisor resistivo y generador.

- Se ejecutó la autocalibración del divisor resistivo en la relación 100:1.
- Mediante el calibrador se generó un nivel de 1000 V con el que se alimentó el divisor resistivo.
- Se calibró la salida de 10 V del divisor mediante un voltmetro calibrado con un Zener de 10 V.
- A partir de los valores calibrados de la relación 100:1 y la salida de 10 V, se calibró la tensión de 1000 V proporcionada por el calibrador.
- Con la señal calibrada de 1000 V, se calibró el voltmetro en 1000 V mediante

$$\epsilon = V_{ind@1000V} - V_{ref@1000V} \quad (7)$$

Al realizar mediciones en la escala de 1000 V del voltmetro se observa el efecto siguiente: cuando se aplica una tensión cercana a 1000 V, la lectura indicada por el voltmetro varía como una función del tiempo (figura 4).



Error por estabilidad = 1 mV / 1000 V = 1 μV / V el primer minuto

Figura 4. Efecto de autocalentamiento, escala de 1000 V.

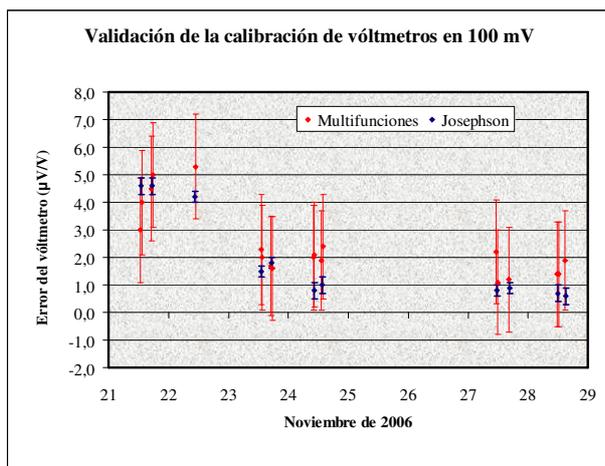
Esta característica es debida al calentamiento del divisor resistivo interno del voltmetro. Debido a que el Laboratorio Multifunciones nos proporcionó el valor del error del voltmetro en frío, se hicieron mediciones en función del tiempo y se determinó por un ajuste de curvas el error en $t=0$, es decir, en frío.

RESULTADOS

A continuación se muestran los resultados de la calibración del voltmetro obtenidos por los dos laboratorios involucrados, en los niveles de tensión ya mencionados.

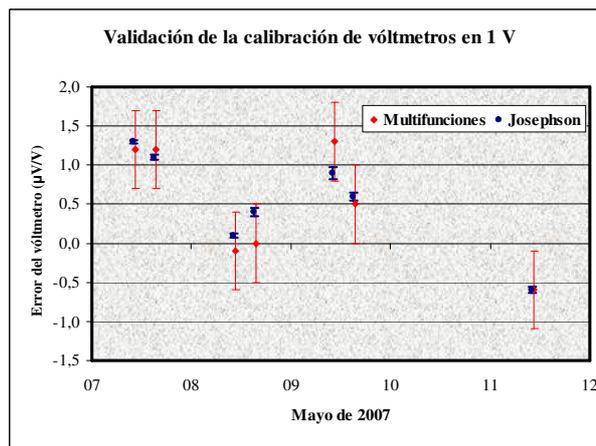
A. Validación en 100 mV

Fecha	Multifunciones		Josephson	
	Error $\mu\text{V/V}$	$U(\sigma=2)$ $\mu\text{V/V}$	Error $\mu\text{V/V}$	$U(\sigma=2)$ $\mu\text{V/V}$
21/11/2006 12:40	3,0	1,9	4,6	0,3
21/11/2006 13:20	4,0	1,9	4,6	0,3
21/11/2006 17:00	4,5	1,9	4,6	0,3
21/11/2006 17:40	5,0	1,9	4,6	0,3
22/11/2006 11:00	5,3	1,9	4,2	0,2
23/11/2006 13:00	2,3	2,0	1,5	0,2
23/11/2006 13:30	2,0	1,9	1,5	0,2
23/11/2006 17:00	1,7	1,8	1,8	0,2
23/11/2006 17:32	1,6	1,9	1,8	0,2
24/11/2006 10:00	2,0	1,9	0,8	0,3
24/11/2006 10:30	2,1	1,9	0,8	0,3
24/11/2006 13:15	1,9	1,8	1,0	0,3
24/11/2006 13:45	2,4	1,9	1,0	0,3
27/11/2006 11:15	2,2	1,9	0,8	0,2
27/11/2006 11:45	1,1	1,9	0,8	0,2
27/11/2006 16:15	1,2	1,9	0,9	0,2
28/11/2006 11:45	1,4	1,9	0,7	0,3
28/11/2006 12:15	1,4	1,9	0,7	0,3
28/11/2006 14:45	1,9	1,8	0,6	0,3



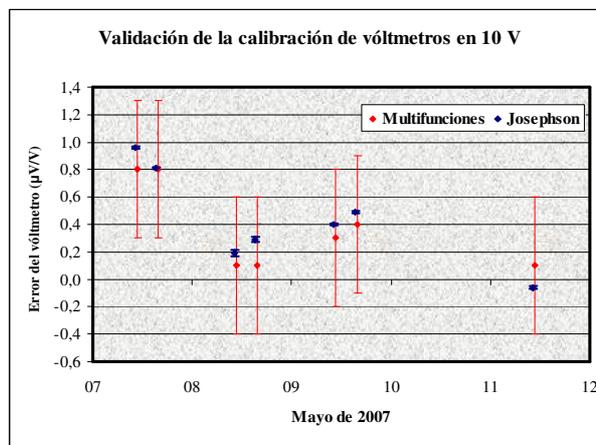
B. Validación en 1 V

Fecha	Multifunciones		Josephson	
	Error $\mu\text{V/V}$	$U(\sigma=2)$ $\mu\text{V/V}$	Error $\mu\text{V/V}$	$U(\sigma=2)$ $\mu\text{V/V}$
07/05/2007 10:30	1,2	0,5	1,3	0,02
07/05/2007 15:30	1,2	0,5	1,1	0,03
08/05/2007 10:30	-0,1	0,5	0,1	0,03
08/05/2007 15:30	0,0	0,5	0,4	0,05
09/05/2007 10:30	1,3	0,5	0,9	0,08
09/05/2007 15:30	0,5	0,5	0,6	0,05
11/05/2007 10:30	-0,6	0,5	-0,6	0,04



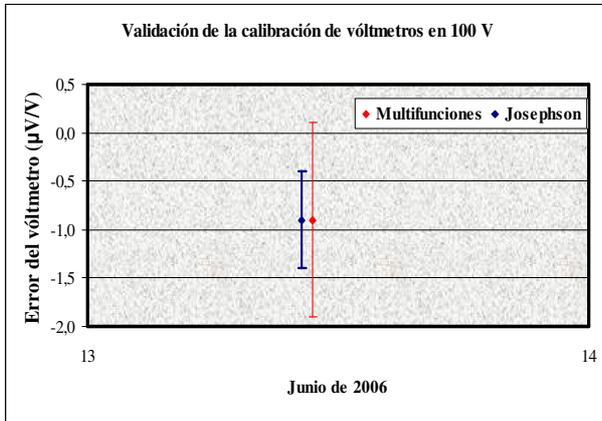
C. Validación en 10 V

Fecha	Multifunciones		Josephson	
	Error $\mu\text{V/V}$	$U(\sigma=2)$ $\mu\text{V/V}$	Error $\mu\text{V/V}$	$U(\sigma=2)$ $\mu\text{V/V}$
07/05/2007 10:15	0,8	0,5	0,96	0,01
07/05/2007 15:15	0,8	0,5	0,81	0,01
08/05/2007 10:15	0,1	0,5	0,19	0,02
08/05/2007 15:15	0,1	0,5	0,29	0,02
09/05/2007 10:15	0,3	0,5	0,40	0,01
09/05/2007 15:15	0,4	0,5	0,49	0,01
11/05/2007 10:15	0,1	0,5	-0,06	0,01



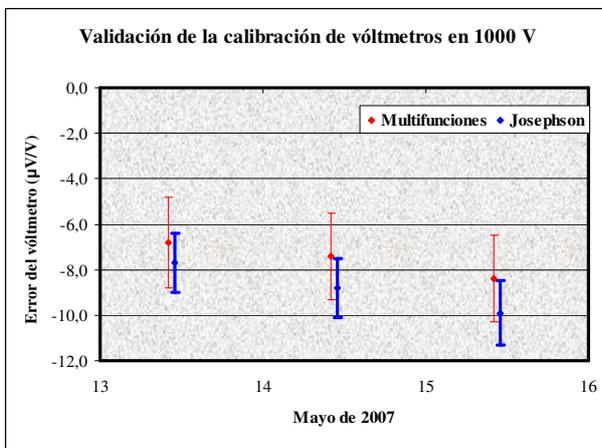
D. Validación en 100 V

Fecha	Multifunciones		Josephson	
	Error μV/V	U(σ=2) μV/V	Error μV/V	U(σ=2) μV/V
13/06/2006 10:15	-0,9	1,0	-0,90	0,5



E. Validación en 1000 V

Fecha	Multifunciones		Josephson	
	Error μV/V	U(σ=2) μV/V	Error μV/V	U(σ=2) μV/V
13/06/2006 10:00	-6,8	2,0	-7,7	1,3
14/06/2006 10:00	-7,4	1,9	-8,8	1,3
15/06/2006 10:00	-8,4	1,9	-9,9	1,4



ANÁLISIS DE ERROR NORMALIZADO

En cada uno de los niveles de tensión (100 mV, 1 V, 10 V, 100 V y 1000 V), se realizaron varios pares de mediciones del error del voltmetro. Cada par correspondió a una medición del Laboratorio Multifunciones y otra del Laboratorio de Tensión Eléctrica Continua. Se expresó el grado de equivalencia entre pares de mediciones mediante el análisis del error normalizado

$$En = \frac{x - X}{\sqrt{U_{lab}^2 + U_{ref}^2}} \quad (8)$$

Donde x Valor del mensurando reportado por el laboratorio bajo prueba
 X Valor reportado por el laboratorio de referencia
 U_{lab} Incertidumbre expandida (2σ) del valor reportado por el laboratorio bajo prueba
 U_{ref} Incertidumbre expandida (2σ) del valor reportado por el laboratorio de referencia

La siguiente gráfica muestra los valores calculados del error normalizado para los diferentes puntos de medición.

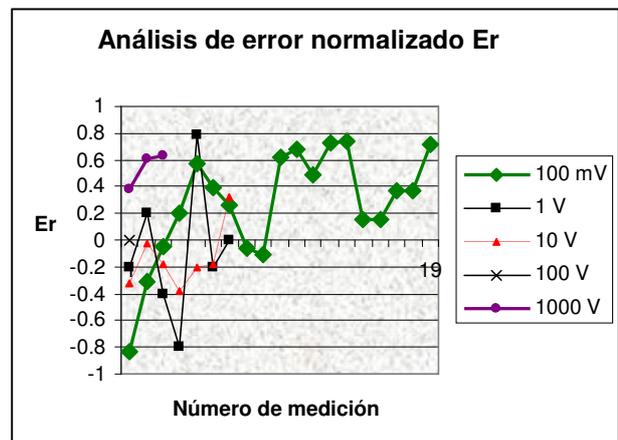


Figura 5. Resultado del análisis de error normalizado.

Este análisis considera que se tienen mediciones equivalentes entre los laboratorios cuando el error normalizado se encuentra entre -1 y 1. En la gráfica se puede observar que en todos los casos se obtuvieron puntos dentro de este intervalo.

OBSERVACIONES Y CONCLUSIONES

- En los servicios de calibración de equipos multifunción del GENAM se usa la técnica de inversión de polaridad para minimizar el efecto de las fem térmicas del circuito de medición y del *offset* del voltmetro. Los resultados expresados en los certificados de calibración son válidos solamente cuando el instrumento calibrado se usa en su laboratorio de origen con esta misma técnica.
- La concordancia entre los resultados obtenidos muestra que los métodos de calibración

alternativos que se propusieron para realizar la validación fueron adecuados.

- El análisis del error normalizado es un criterio para establecer la equivalencia entre las mediciones realizadas entre dos o más laboratorios. Sin embargo, falla cuando la incertidumbre de alguno de los laboratorios está sobreestimada. Debido a que este no fue el caso de los laboratorios involucrados, este estimador fue útil para concluir que la validación descrita fue conveniente, con lo que se cubrió el objetivo inicial.
- Este trabajo muestra la metodología para validar los métodos de calibración de voltímetros que realiza el Laboratorio Multifunciones del CENAM. No valida los servicios de calibración de otros laboratorios aún cuando utilicen patrones similares bajo condiciones parecidas.

REFERENCIAS

1. Calibration: Philosophy in Practice 2nd. Edition. Fluke
2. Manual de instrucciones del Multímetro Hewlett Packard modelo 3458A.
3. Guide to the expression of uncertainty in measurement, BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUAPAC, IUPAP, OILM (1995).
4. Low level measurement handbook, Precision DC Current, Voltage, and Resistance Measurements, Keithley, 6th. Edition.
5. Escalamiento en tensión eléctrica en c.c. basado en la linealidad de un multímetro de 8 ½ dígitos, ENME 2005, CENAM, Avilés David.
6. B.D. Josephson, "Possible new effects in superconductive tunneling", Physics Letters, 1, 1962, 251-253.
7. Centro Nacional de Metrología, www.cenam.mx/dme/430.asp, 15/sep/2005.
8. Documento Interno. "Operación del Patrón de Tensión Eléctrica en Corriente Continua". Laboratorio de tensión eléctrica en corriente continua. CENAM.