

EVALUACIÓN DEL SERVICIO DE CALIBRACIÓN DE REFERENCIAS ELECTRÓNICAS EN BASE AL DIODO ZENER OFRECIDOS POR EL CENAM

Dionisio Hernández V., David Avilés C., Enrique Navarrete G.
Centro Nacional de Metrología, Dirección de Metrología Eléctrica
Carretera a Los Cués km 4.5, El Marqués, Qro. 76241 México
Tel: (442)2110500, Fax: 2153904,
e-mail: dhernand@cenam.mx ; caviles@cenam.mx ; enavarre@cenam.mx

RESUMEN: Se presenta la validación del servicio de calibración de referencias electrónicas en base a diodo Zener ofrecidos por el CENAM, a través de una comparación bilateral entre el CENAM y el NIST, donde se midió un conjunto de referencias Zener utilizando los patrones de tensión Josephson del CENAM y el patrón transportable Josephson del NIST. Se describe el método de medición y los resultados de la comparación.

OBJETIVO

Validación de los servicios de calibración de referencias Zener proporcionados por el CENAM a través de laboratorio de Tensión en corriente continua (c.c.) de la División de Mediciones Electromagnéticas.

AREA DE ESPECIALIDAD

Metrología eléctrica, tensión eléctrica continua.

INTRODUCCION

En el laboratorio de tensión en c.c. se tiene el Patrón Nacional del volt en base al Efecto Josephson. Su principal objetivo es ser la referencia nacional para las mediciones de la magnitud de tensión eléctrica continua que se realizan en el país. Las funciones básicas del laboratorio se establecen en la "Ley Federal Sobre Metrología y Normalización" y son: el establecimiento, el mantenimiento y la diseminación de la referencia nacional, al más alto nivel de exactitud, de la magnitud de tensión eléctrica continua, cuya unidad es "el volt", así como asegurar su consistencia con los laboratorios primarios de otros países.

Este patrón de nivel primario, esta al mismo nivel que los patrones utilizados en los países mas avanzados en este campo y constituye el primer eslabón en la cadena de calibración en México. La alta exactitud del patrón nacional se transfiere o disemina a la industria nacional a través de los servicios de calibración efectuados a patrones de referencia de tensión en corriente continua como son las referencias electrónicas en base a diodo Zener.

Estos patrones de nivel secundario, forman el segundo eslabón en la cadena de trazabilidad. Por consiguiente, desempeñan un papel muy importante

en la trazabilidad de las mediciones de tensión eléctrica en corriente continua, debido a que la mayoría de estas mediciones son de alta exactitud, las cuales están ligadas al patrón nacional de tensión Josephson. Por otra parte, este patrón nacional es importante porque de éste también se derivan otras unidades eléctricas.

Dado que el laboratorio opera bajo un sistema de calidad según los lineamientos de la *norma: ISO/IEC17025*, un requerimiento es la validación de los métodos de medición utilizados en los servicios de calibración ofrecidos por el laboratorio, tal es el caso de la calibración de patrones eléctricos de referencias de tensión c.c. basadas en el diodo Zener en los niveles de 1,018 V (1V) y 10 V.

Para asegurar la confiabilidad y el reconocimiento internacional de los servicios de medición y calibración ofrecidos por los laboratorios nacionales de metrología, CENAM firmó, el Acuerdo de Reconocimiento Mutuo (MRA) del CIPM, este acuerdo se basa en revisiones por pares de procedimientos y sistemas de calidad así como en la demostración de la equivalencia de los servicios de medición y calibración, la cual se determina por medio de comparaciones internacionales, de las cuales la comparación a nivel de 10 V usando referencias Zener forma parte.

Finalmente es importante señalar que los usuarios o clientes del laboratorio de tensión en c.c. de la División de Mediciones Electromagnéticas, son los laboratorios secundarios, industriales y universidades y centros de investigación (acreditados y no acreditados) que cuentan con referencias electrónicas Zener. Estos laboratorios desempeñan un papel relevante para armonizar las mediciones de tensión eléctrica en c.c. a nivel nacional refiriéndolas al patrón nacional mantenido en el CENAM.

ACCIONES IMPLEMENTADAS

En el CENAM se llevaron a cabo las siguientes acciones para dar confianza y reconocimiento internacional a los servicios de calibración de referencias Zener que se ofrecen:

- 1) Se realizó una comparación bilateral con el NIST de E.U. calibrando referencias Zener con patrones de efecto Josephson.
- 2) Un experto en mediciones de tensión eléctrica continua del NIST de Estados Unidos llevó a cabo una revisión exhaustiva del laboratorio, de las capacidades de los metrólogos, de los procedimientos de calibración y del sistema de calidad del laboratorio.

En este trabajo se presentan algunos detalles técnicos de la comparación y su impacto en la validación del servicio de calibración.

COMPARACIÓN BILATERAL CENAM-NIST

Del 21 al 13 de marzo de 2006, se llevó a cabo una comparación bilateral, en el nivel de 10 V, entre CENAM y el NIST. Esta comparación se realizó en las instalaciones del Centro Nacional de Metrología.

Uno de los propósitos de esta comparación fue la validación del servicio de calibración de referencias Zener a nivel de 10 V y el de ligar la referencia de tensión del CENAM con la del NIST.

Esta comparación ya fue aprobada por el grupo de trabajo de Baja Frecuencia (WGLF) del Comité Consultivo de Electricidad y Magnetismo (CCEM) y registrada en la base de datos de comparaciones clave (KCDB) del Comité Internacional de Pesas y Medidas (CIPM) como: *SIM.EM.BIPM-K11.b*.

PATRONES UTILIZADOS EN LA COMPARACIÓN

Patrones bajo calibración

Se utilizaron 4 referencias Zener (Fluke 732B), propiedad del CENAM. Este conjunto fue previamente seleccionado de un grupo de 12 referencias Zener por presentar menor dispersión a la salida de tensión

Patrón de Tensión Josephson del CENAM

El patrón de tensión Josephson del CENAM es un sistema comercial de la empresa Research and Manufacturing Company (RMC), actualmente HYPRES. Este sistema se estableció en 1994 y ha sido modificado con un filtro RF adicional. El arreglo

de uniones Josephson de 10 V utilizado con número de serie JA-62/7 (Diseño del PTB) es de la empresa PREMA Semiconductor GmbH de Alemania (1999).

La fuente de polarización del sistema Josephson (modelo JBS500) ha sido modificada para mejorar la selección de los escalones cuánticos de tensión. La frecuencia del diodo Gunn es amarrada en fase a través de un contador de microondas (EIP 578B) amarrado en fase. La operación del sistema es manual.

Se utilizó un voltmetro digital HP3458A para medir las diferencias de tensión entre la tensión Josephson y la referencia Zener.

Patrón de Tensión Josephson del NIST.

El patrón Josephson del NIST (*Compact Josephson System -CJVS*) es un sistema transportable diseñado y construido en el NIST que consiste de una fuente de polarización de VMETRIX Modelo JVS1000 un arreglo de uniones Josephson de 10 V (diseño del NIST) fabricado por HYPRES, una criosonda que aloja el arreglo o circuito integrado superconductor (chip) y un oscilador de microondas.

La fuente de microondas es una frecuencia fija de 76,76 GHz del oscilador amarrada en fase a una señal externa de 10 MHz. El sistema se utilizó en modo automático.

Como detector de nulos se utilizó un nanovoltmetro digital HP34420 para medir la diferencia de tensión entre el patrón Josephson y el la tensión de salida de la referencia Zener.

PROTOCOLO DE LA COMPARACIÓN

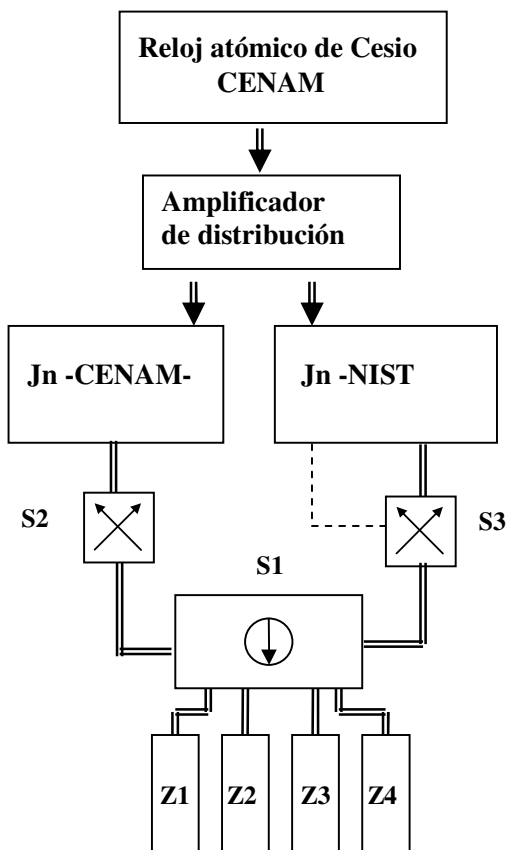
La comparación se realizó midiendo las 4 referencias Zener en 10 V utilizando los sistemas Josephson de forma alternada.

Antes de iniciarse la comparación, previamente el patrón transportable del NIST fue enviado al CENAM.

El protocolo de la comparación fue diseñado por el NIST.

DIAGRAMA A BLOQUES DE LA COMPARACIÓN

En la figura 1 se muestra el diagrama esquemático de la comparación.



- S1 – Conmutador para seleccionar el sistema Josephson (CENAM o NIST) y la polaridad de la Referencia Zener bajo medición.
 S2 – Conmutador de inversión manual
 S3 – Conmutador de inversión automático
 Jn- Sistema Josephson

Fig. 1 Diagrama esquemático

El reloj atómico de Cesio del CENAM es uno de alto desempeño de Agilent modelo 5071A, de la División de Tiempo y Frecuencia del CENAM, el cual proporcionó la frecuencia de referencia de 10 MHz para ambos sistemas. La conexión se realizó a través de un amplificador de distribución y un transformador de aislamiento los cuales fueron diseñados y construidos en el CENAM.

El conmutador S1 de bajas fem térmicas o potenciales de origen térmico, permite la conexión de uno de los 4 Zener al correspondiente sistema Josephson (ya sea del NIST o del CENAM) y la selección de la polaridad de un Zener (+ o -). En el sistema del CENAM se utilizó un conmutador rotatorio de bajo coeficiente térmico, mientras que el NIST utilizó un conmutador rotatorio de bajo coeficiente térmico automático S3.

LAS MEDICIONES

Los Zener se mantuvieron flotados (sin conexión a la tierra física). Cada uno de los Zener fue desconectado de la línea dos horas antes de ser medidos. Se cuantificaron las fem térmicas antes de comparación, midiendo un corto circuito. Los valores de las fems térmicas fueron de unos cuantos nanovolts para ambos sistemas.

La Tabla 1 indica la secuencia de medición, la cual se diseñó para tener el mismo tiempo promedio (dentro de unos minutos) para un par de mediciones de la referencia Zener (en polaridad positiva y negativa) realizadas por el NIST y el CENAM de tal forma que los efectos por la deriva de los Zener durante la comparación puedan ser cancelados.

NIST+	CENAM +	CENAM -	NIST-
CENAM +	NIST+	NIST -	CENAM -

Tabla 1. Secuencia de mediciones para cada uno de los Zener. La selección se realiza por medio del conmutador S1 para el Sistema Josephson (NIST o CENAM) y la polaridad (+ o -).

Cada una de las mediciones de CENAM se tomaron en 4 grupos de 12 mediciones simples utilizando la secuencia [+ , - , - , +]. La polaridad se invirtió utilizando el conmutador manual S1 como se muestra en la figura 1. Se aplicó un ajuste por mínimos cuadrados para obtener el mejor estimado del valor de la salida del Zener.

Cada una de las mediciones realizadas por el sistema del NIST se hicieron de manera similar excepto que los 4 grupos siguieron la secuencia [+ , - , + , -]. La inversión de la polaridad se realizó por medio del conmutador automático S3.

Un característica importante de ésta comparación es que no fue necesario hacer correcciones por efectos ambientales de temperatura, humedad y presión porque las mediciones fueron realizadas en el mismo lugar y un mismo tiempo promedio.

El tiempo total para una comparación de un par de mediciones de Zener realizadas por los sistemas del NIST y el CENAM fue de aproximadamente 30 minutos.

RESULTADOS DE LA COMPARACIÓN BILATERAL CENAM-NIST

Los resultados de la comparación entre NIST y CENAM, se muestran en la Tabla 2

Incertidumbre "Tipo A"	
Diferencia promedio	- 34,7 nV
Desviación estándar	96,8 nV
Número de mediciones	24
Grados de libertad	23
Desviación estándar de la media	19,8 nV
Incertidumbre estándar tipo A	19,8 nV

Incertidumbre "Tipo B" (offset)		
	NIST	CENAM
Corrientes de Fuga	0,4 nV	0,3 nV
Fem térmicas no compensadas	5 nV	5 nV
Error del contador de frecuencia	0 nV	1,2 nV
Incertidumbres tipo B	5,0 nV	5,2 nV
Incertidumbre total tipo B $U_B = [(U_{B-NIST})^2 + (U_{B-CENAM})^2]^{0.5}$	7,21 nV	

Resultados finales	
Diferencia promedio	- 34,7 nV
Incertidumbre estándar combinada	21,1 nV
Grados de libertad efectivos	23
Nivel de confianza	95%
Factor de cobertura k	2,07
Incertidumbre expandida (95%)	43,6 nV

Tabla 2. Resultados de la comparación.

Se realizaron estudios estadísticos ANOVA que muestran que no hay diferencias estadísticamente significativas entre las mediciones hechas con los diferentes Zeners. Usando el protocolo de esta comparación se ha demostrado que las diferencias CENAM-NIST son estadísticamente independientes [2], por lo que se utilizó la desviación estándar de la media para la evaluación de la incertidumbre tipo A.

Las fuentes de incertidumbre tipo B se dividen en fuentes de incertidumbre que generan variabilidad en las mediciones y fuentes de incertidumbre que generan offset en las mediciones. Las fuentes de incertidumbre que generan variabilidad en las mediciones están incluidas en la incertidumbre tipo A por lo que en las fuentes de incertidumbre tipo B solo se consideran las fuentes de incertidumbre que generan offset en las mediciones y que son

significativas para la estimación de la incertidumbre de la comparación.

De la Tabla 2 vemos que la diferencia promedio de los 24 pares de mediciones del CENAM y el NIST en 10 V fue de - 35 nV. La incertidumbre expandida de la comparación entre el CENAM y el NIST utilizando referencia electrónica Zener como patrón de transferencia se expresó como la desviación estándar de la media multiplicada por el factor t de student en la Tabla 2. La incertidumbre utilizando los 24 pares de mediciones de los Zener fue de 43,6 nV con un nivel de confianza del 95%.

La incertidumbre de muchas de las comparaciones entre sistemas Josephson utilizando referencia electrónica Zener como patrones viajeros entre dos sistemas Josephson situados en lugares diferentes reportan incertidumbres de partes en 10^8 . La mejora de la incertidumbre en un orden de magnitud de esta comparación se debe a la utilización de un Sistema Josephson Transportable (CJVS del NIST), de tal forma que las contribuciones de incertidumbre asociadas con derivas no lineales, impacto por transportación y efectos ambientales de presión atmosférica, temperatura y humedad relativa son eliminadas.

CONCLUSIONES

De los resultados podemos resumir que la diferencia promedio entre CENAM-NIST fue de $-3,5 \times 10^{-9}$ con una incertidumbre de $4,4 \times 10^{-9}$ relativas a 10 V. Expresando el resultado de la comparación en ($\mu\text{V}/\text{V}$) tenemos que,

$$D_{\text{CENAM-NIST}} = - 0,0035 \mu\text{V}/\text{V} \pm 0,0044 \mu\text{V}/\text{V}$$

Estos resultados nos dan confianza para sustentar técnicamente que las incertidumbres declaradas para el servicio de calibración de referencias Zener a 10 V con un nivel de confianza del 95% en las capacidades de medición y calibración (CMC) del CENAM, están suficientemente cubiertas por los resultados obtenidos de la comparación bilateral CENAM-NIST, de esta forma se valida el método de calibración de referencias electrónicas Zeners, donde se utiliza el patrón de tensión Josephson como el origen de la exactitud de las calibraciones.

REFERENCIAS

[1] "Josephson Voltage Standard," Recommended Intrinsic / Derived Standards Practice RISP-1 4th Edition, published by the National Conference of Standards Laboratories International (NCSLI), Boulder, CO, 2002.

[2] Y. Tang, S.L. Kupferman, and M.T. Salazar, "An evaluation of two methods for comparing Josephson voltage standards of two laboratories," *IEEE Trans. Instrum. Meas.* Vol.54, pp 398-403, February 2002.

[3] T.J. Witt, D. Reymann, Y. Tang and C.A. Hamilton, "Bilateral Comparison of 10 V Standards between the NIST, Gaithersburg, the NIST, Boulder, and the BIPM," Rapport BIPM-99/07.