

ESTIMACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE DEL PATRÓN NACIONAL DE TENSIÓN ELÉCTRICA EN CORRIENTE CONTINUA BASADO EN EL EFECTO JOSEPHSON

Enrique Navarrete, Dionisio Hernández, David Avilés
 Centro Nacional de Metrología, CENAM
 Carretera a Los Cués km 4,5. El Marqués, Qro. C.P. 76241
 Tel.: (442) 211-0500, Fax: (442) 215-3904
 Correo electrónico: enavarre@cenam.mx, dhernand@cenam.mx, caviles@cenam.mx

Resumen: Se describe la metodología seguida para estimar la incertidumbre del patrón nacional de tensión eléctrica en corriente continua basado en el efecto Josephson. Se aplicó un método general con el que se estimó la incertidumbre intrínseca del patrón y del sistema de medición. Dicho método consiste en identificar las fuentes de incertidumbre que no dependen de la tensión medida, para evaluarlas a través de mediciones de un cortocircuito. Por otro lado, las fuentes de incertidumbre que sí dependen de la tensión medida, se evalúan aparte considerando el peor de los casos. La estimación de incertidumbre que se describe en este documento considera nueve de las principales fuentes de incertidumbre de un patrón de tensión eléctrica Josephson. El valor de incertidumbre del patrón nacional que se obtuvo fue de $\pm 7,0$ nV (a 1σ) para una salida de 10 V, lo cual representa 7,0 partes en 10^{10} .

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

El volt y el ohm son actualmente las unidades eléctricas a partir de las cuales se derivan muchas otras unidades eléctricas del Sistema Internacional de Unidades (SI). De ambas se obtienen las unidades de tensión en corriente alterna, intensidad de corriente continua y alterna, potencia, energía, entre otras [1]. En México, desde 1994 se reproduce el volt mediante el patrón nacional de tensión eléctrica en corriente continua, el cual basa su funcionamiento en el *efecto Josephson*. La primera estimación de la incertidumbre de este patrón se realizó en 1996. La estimación más reciente, cuyos resultados se muestran en el presente trabajo, se realizó en 2005 en base a un método general [2] que cumple con la GUM [3].

1.2. Principio físico del patrón Josephson

Como se mencionó, el actual patrón nacional de tensión eléctrica en corriente continua se basa en el efecto Josephson. Este efecto es un fenómeno cuántico predicho por *Brian Josephson* en 1962 [4], el cual se presenta cuando dos superconductores separados por un aislante delgado (conjunto

llamado *unión Josephson*), se irradian con una señal de microonda (Figura 1).

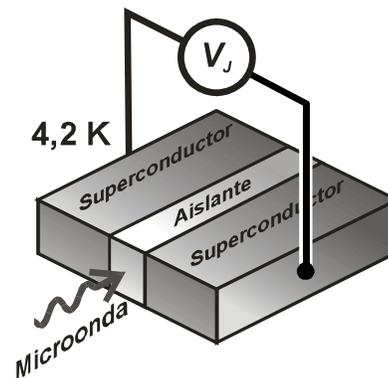


Figura 1. El efecto Josephson.

Bajo este esquema, entre los superconductores se genera una tensión continua cuantizada definida por

$$V_J = \frac{n}{K_{J-90}} f \quad (1)$$

donde n es un número entero, K_{J-90} es la constante Josephson cuyo valor de 483597,9 GHz/V se definió en 1990, y f es la frecuencia de la microonda. Esta

ecuación muestra que una unión Josephson es básicamente un convertidor de frecuencia a tensión, y debido a que la frecuencia es una magnitud física que actualmente se puede medir con muy baja incertidumbre (1 parte en 10^{15} [5]), resulta evidente la conveniencia de aplicar el efecto Josephson en patrones de tensión eléctrica en corriente continua. Irradiando una unión Josephson con una señal de microonda de 73 GHz se pueden generar niveles de tensión de 151 μ V. Para disponer de niveles de tensiones mayores, se agrupan uniones Josephson en serie en un solo circuito integrado llamado *arreglo Josephson*. El arreglo Josephson del patrón nacional de tensión eléctrica en corriente continua contiene 13 920 uniones Josephson, con lo que es posible generar tensiones de referencia en niveles discretos dentro del intervalo de -10 V a 10 V. Para alcanzar su estado de superconductividad, el arreglo Josephson se sumerge en helio líquido a 4,3 K dentro de un contenedor Dewar.

El patrón Josephson del CENAM está basado en un sistema comercial marca RMC, cuyos principales elementos son:

- Arreglo Josephson marca PREMA de +/- 10 V
- Oscilador de diodo *gun* a 75 GHz
- Contador de frecuencia de microondas EIP 578B con base de tiempo externa (reloj atómico de cesio)
- Guía de onda dieléctrica
- Fuente de polarización JBS 500
- Detector de nulos HP3458A

Se añadió un filtro externo para disminuir el ruido electromagnético inducido que producía cambios espontáneos de niveles cuánticos en las uniones Josephson.

1.3. Método de medición

Una de las aplicaciones del patrón nacional de tensión eléctrica en corriente continua es la calibración de referencias electrónicas en base al diodo Zener. Se usa el método diferencial debido a que permite determinar con menor incertidumbre que el método directo la tensión V_{DUT} del instrumento bajo calibración a partir de la tensión V_J del arreglo Josephson y de la diferencia de tensión V_{DVM} medida con un voltmetro [6]. Además, se aplica inversión de polaridad para reducir el efecto del *offset* del voltmetro y de potenciales termoeléctricos (fem térmicas) en el circuito de medición (Figura 2).

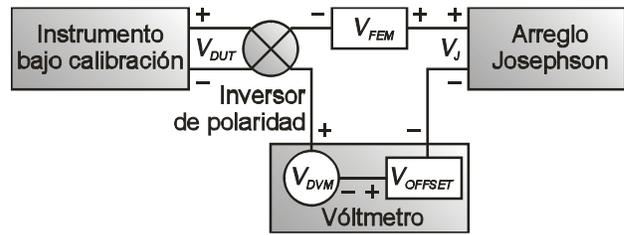


Figura 2. Medición diferencial con inversión de polaridad.

En este método se realiza una primera medición del instrumento bajo calibración

$$V_{DUT} = V_{J1} - V_{DVM1} - V_{FEM1} - V_{OFFSET1} \quad (2)$$

Se invierte la polaridad del instrumento bajo calibración mediante el inversor de polaridad, se selecciona una tensión inversa en el arreglo Josephson, y se realiza una segunda medición

$$-V_{DUT} = -V_{J2} - V_{DVM2} - V_{FEM2} - V_{OFFSET2} \quad (3)$$

Si ambas mediciones se realizan en tiempos muy próximos, las fem térmicas y el *offset* del voltmetro no cambian significativamente, por lo que se puede considerar $V_{FEM1} = V_{FEM2}$ y $V_{OFFSET1} = V_{OFFSET2}$. Resolviendo las ecuaciones (2) y (3) para V_{DUT} , se obtiene una expresión para la tensión del instrumento bajo calibración que es independiente de V_{FEM} y V_{OFFSET}

$$V_{DUT} = \frac{V_{J1} + V_{J2} - V_{DVM1} + V_{DVM2}}{2} \quad (4)$$

Para eliminar la deriva lineal de las fem térmicas y del *offset* del voltmetro, se aplica el método de inversión de polaridad de la siguiente manera: se realizan 10 mediciones de V_{DVM} en polaridad positiva, seguidas de 20 mediciones en polaridad negativa, y luego 10 mediciones en polaridad positiva. Un punto de medición SPM (*single point measurement*) de V_{DUT} se obtiene mediante un algoritmo que involucra estas 40 mediciones.

2. ESTIMACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE

Una vez descrito el patrón Josephson y el método de medición usado para determinar el valor de la tensión del instrumento bajo calibración, se procede a describir los pasos seguidos para estimar la incertidumbre de esta medición.

2.1. Identificación de fuentes de incertidumbre

Las principales fuentes de incertidumbre de un patrón de tensión Josephson se muestran en la Tabla 1.

1.	Corriente de polarización del voltmetro
2.	Offset, impedancia, no linealidad y ruido del voltmetro
3.	Potenciales termoeléctricos no corregidas
4.	Offset debido a rectificación de frecuencia
5.	Interferencia electromagnética EMI
6.	Escalones con pendiente debido a polarización
7.	Error en la ganancia del voltmetro
8.	Estabilidad de la frecuencia de referencia
9.	Corriente de fuga en el lazo de medición

Tabla 1. Principales fuentes de incertidumbre de un patrón de tensión Josephson.

Corriente de polarización del voltmetro. Esta corriente al pasar por impedancias distintas de cero del circuito de medición produce una tensión de offset que puede ser cancelada con el método de inversión de polaridad descrito a condición de que sea constante o tenga un corrimiento lineal. Corrimientos no lineales de la corriente de polarización producen errores que no se cancelan con el método de inversión de polaridad pero que pueden ser evaluados como una fuente de incertidumbre tipo A que no depende de la tensión a medir.

Offset. El offset del voltmetro es corregido por el método de inversión de polaridad a condición de que sea constante o con deriva lineal.

Impedancia del voltmetro. Si bien la impedancia del voltmetro es alta ésta podría producir un efecto de carga sobre el instrumento bajo calibración. En el caso de la impedancia de la salida de 10 V de una referencia Zener, esta es muy baja por lo que el efecto de carga sobre el voltmetro es despreciable, no siendo el caso de la salida de 1,018 V cuya impedancia de salida es relativamente elevada (del orden de 1 kΩ).

No linealidad del voltmetro. El comportamiento no lineal del voltmetro se refleja en errores de medición que dependen de la tensión diferencial medida V_{DVM} . Como ya se explicó, para obtener un punto de medición SPM de V_{DUT} se realizan 40 mediciones de V_{DVM} , las cuales cambian de valor debido a que en cada inversión de polaridad se seleccionan escalones diferentes (niveles Josephson cuantizados). Debido a lo anterior, los errores producidos por el comportamiento no lineal del voltmetro cambian de manera aleatoria, por lo que

pueden ser asimilados como otra fuente de incertidumbre tipo A.

Ruido del voltmetro. El ruido eléctrico interno del voltmetro es otra fuente de incertidumbre tipo A.

Fem térmicas no compensadas. El proceso de medición con cambios de polaridad solo compensa las fem térmicas estables o con variaciones lineales en el tiempo, las variaciones no lineales en el tiempo de las fem térmicas producen variaciones aleatorias en las mediciones las cuales se evalúan como otra fuente de incertidumbre tipo A.

Offset por microondas. Es producido por la corriente de aproximadamente 73 GHz (frecuencia de referencia) que fluye en el arreglo Josephson. Algunos contactos eléctricos defectuosos (no lineales) del arreglo se comportan como diodos y rectifican dicha corriente. Esto genera un offset similar al de las fem térmicas, por lo que el procedimiento de medición lo compensa. Sin embargo, en algunos chips este tipo de offset es demasiado alto y en estos casos hay que estudiar el efecto del mismo.

Interferencia Electromagnética. La interferencia electromagnética puede inducir corrientes eléctricas alternas en el circuito de medición, que en forma análoga al caso del offset por microondas, estas son rectificadas por contactos eléctricos no lineales presentes en el arreglo Josephson. Esto genera un offset que produce variaciones aleatorias en las mediciones. Estas variaciones constituyen otra fuente de incertidumbre tipo A que no depende de la tensión a medir. Este efecto puede incrementar sensiblemente la incertidumbre tipo A, sin embargo, con una prueba simple este problema puede ser detectado y corregido.

Escalones con pendiente. Normalmente la tensión de los escalones Josephson no debe cambiar al variar la corriente de polarización. Sin embargo, a veces aparecen escalones en que esta tensión sí varía con la corriente de polarización. Debido a que cuando se realizan las mediciones se abre el circuito de polarización, en estas condiciones la corriente de polarización es cero y el efecto de los escalones con pendiente desaparece. En caso de que la pendiente de los escalones sea muy alta se producen variaciones en la tensión Josephson, las cuales pueden ser evaluadas como otra fuente de incertidumbre tipo A.

Error en la ganancia del voltmetro. Debido a que las mediciones que se realizan son diferenciales, los valores medidos por el voltmetro son muy pequeños (< 0,5 mV). Los errores de ganancia del voltmetro cambian de acuerdo a la tensión diferencial a medir, estos cambios producen una componente aleatoria que puede ser evaluada como una incertidumbre

tipo A. El promedio de estos errores está considerado en la medida de los errores de medición \bar{V} que es tomada en cuenta en la ecuación (6) en el cálculo de u_z .

2.2 Clasificación de las fuentes de incertidumbre

De acuerdo a lo sugerido en la referencia [2], las fuentes de incertidumbre 1 a 7 de la tabla 1, pueden evaluarse en conjunto a través de la dispersión de las mediciones de un cortocircuito. Esto debido a que dichas fuentes de incertidumbre no son función del nivel de tensión a medir, es decir, no varían si se mide un Zener de 10 V o un cortocircuito (una referencia perfecta de 0 V). Esta componente de incertidumbre que agrupa las primeras 7 fuentes de incertidumbre de la Tabla 1 se conoce como “*incertidumbre por offset cero*”. Otras dos fuentes de incertidumbre que si dependen del nivel de tensión a medir son: la incertidumbre por frecuencia de referencia y la incertidumbre por corriente de fuga. Estas se evalúan considerando el peor de los casos, que se presenta cuando se miden referencias Zener de 10 V con el patrón Josephson.

2.3 Cálculo de componentes de incertidumbre

El segundo paso para estimar la incertidumbre del patrón de tensión Josephson consiste en determinar la contribución de cada fuente de incertidumbre:

- *Offset* cero
- Frecuencia de referencia
- Corriente de fuga

2.2.1. Incertidumbre por *offset* cero

Considérese un experimento hipotético en el cual se usa el patrón de tensión Josephson para obtener N mediciones V_i de la tensión de salida de una referencia de tensión (instrumento bajo calibración) ideal, invariante y que tiene un valor exacto conocido V_r . Tal referencia de tensión no existe en la realidad. Sin embargo, una referencia de tensión de valor $V_r=0$ muy próxima a la ideal puede implementarse mediante un cortocircuito. Cuando se usa un cortocircuito como instrumento bajo calibración, cualquier valor no nulo de V_i que se obtenga representa un error del sistema de medición, y la incertidumbre estándar combinada u_z de las mediciones del cortocircuito está dada rigurosamente por la raíz media cuadrática (*root-mean-square*) del conjunto de errores de V_j respecto a V_r [2]

$$u_z = \sqrt{\frac{\sum (V_i - V_r)^2}{N}} \quad (5)$$

Realizando la sumatoria de los cuadrados de las diferencias y completando los trinomios cuadrados perfectos, u_z también se puede expresar en función de la media $\bar{V} = \sum V_j / N$ y de la desviación estándar $\sigma = (\sum (V_j - \bar{V})^2 / N)^{1/2}$ de las mediciones del cortocircuito:

$$u_z = \sqrt{\frac{N-1}{N} \sigma^2 + (\bar{V} - V_r)^2} \quad (6)$$

La relevancia de esta ecuación es que muestra que el cálculo de la incertidumbre de las mediciones de un cortocircuito toma en cuenta tanto el valor medio como la dispersión de las mediciones obtenidas.

La incertidumbre por *offset* cero u_z del patrón nacional se estimó mediante la Ecuación 6, para lo cual se tomaron $N = 32$ puntos de medición SMP de la tensión V_i de un cortocircuito (referencia de tensión $V_r = 0$ V). Los 32 SMP se tomaron durante dos semanas, obteniéndose una media \bar{V} de -2 nV con una desviación estándar σ de 6,7 nV. El valor de la incertidumbre debida al *offset* cero de este conjunto de 32 mediciones es, por lo tanto

$$u_z = \sqrt{\frac{32-1}{32} (6,7 \text{ nV})^2 + (-2 \text{ nV} - 0)^2} = 6,9 \text{ nV} \quad (7)$$

2.2.2. Incertidumbre por frecuencia de referencia

Como se mencionó, el patrón de tensión Josephson del CENAM genera una tensión de referencia a partir de una señal de microondas de aproximadamente 73 GHz. La medición de esta frecuencia está basada en un contador de microondas, al cual se le aplica una frecuencia externa de referencia de valor nominal $f_0 = 10$ MHz que se obtiene de un reloj atómico de cesio. La desviación de la frecuencia externa de referencia respecto a su valor nominal está caracterizada por

$$\begin{aligned} \Delta f_{ref} &= (9,5 \times 10^{-14} \pm \sigma_y(\tau)) f_0 \\ &= (9,5 \times 10^{-7} \pm 8,29 \times 10^{-6}) \text{ Hz} \end{aligned} \quad (8)$$

donde $\sigma_y(\tau) = 8,29 \times 10^{-13}$ es la raíz de la varianza de Allan para un tiempo de observación $\tau = 320$ s correspondiente al tiempo en el que se obtiene un punto de medición SPM.

El valor de la frecuencia externa de referencia se obtiene de $f_{ref} = f_0 + \Delta f_{ref}$. Debido a que $f_0 \gg \Delta f_{ref}$, para fines prácticos se considera que $f_{ref} = 10$ MHz.

Con respecto al contador de microondas, la desviación de la frecuencia exhibida es, por especificación del fabricante

$$\Delta f = M + \Delta f_{ref} \tag{9}$$

donde M es el número de cuentas en que varía el valor de frecuencia que es exhibido por el contador de microondas. Para nuestro contador IIP 578B se observó que $M = 15$ Hz. Dado que $M \gg \Delta f_{ref}$, y asumiendo una distribución rectangular para M , se considera que $\Delta f = M / \sqrt{3}$

Finalmente, la incertidumbre de la tensión del patrón Josephson debida a la frecuencia del contador de microondas se obtiene al diferenciar la Ecuación 1

$$\Delta V_{ref} = \frac{n}{K_{J-90}} \Delta f \tag{10}$$

Se resuelve la ecuación (1) para n / K_{J-90} y se sustituye en la ecuación (10)

$$\Delta V_{ref} = \frac{\Delta f}{f} V_{ref} \tag{11}$$

$$\Delta V_{ref} = \frac{M}{\sqrt{3} \cdot f} V_{ref} \tag{12}$$

La contribución a la incertidumbre debida a la frecuencia de referencia es, por lo tanto

$$u_f = \frac{15 \text{ Hz}}{\sqrt{3} \cdot 73 \text{ GHz}} \cdot 10 \text{ V} = 1,2 \text{ nV} \tag{13}$$

2.2.3. Incertidumbre por corriente de fuga

La tensión V_{ref} generada por el arreglo Josephson en el interior del contenedor Dewar se conduce a las terminales de medición por medio de una línea de transmisión. Esta línea de transmisión consiste de cables, conectores y filtros rfi para interferencia de radiofrecuencia. Los filtros rfi se construyen generalmente mediante inductores y capacitores (Figura 3), y su función es proteger al arreglo Josephson contra ruido electromagnético, el cual puede incrementar el número de transiciones espontáneas en el arreglo Josephson al grado de imposibilitar una medición.

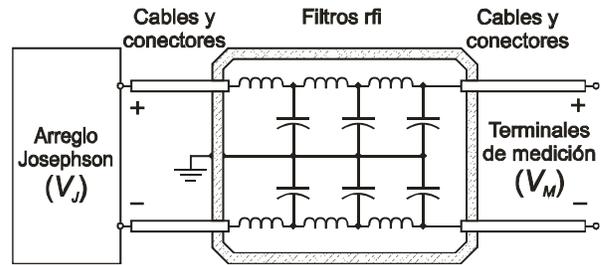


Figura 3. Línea de transmisión del patrón de tensión Josephson.

La resistencia eléctrica no infinita de los aislantes y capacitores permite que se generen corrientes de fuga (I_F) que en conjunto con la resistencia eléctrica no nula de los conductores provocan caídas de tensión a lo largo de la línea de transmisión. Como consecuencia, en las terminales de medición se obtiene una tensión V_M menor a V_J . El efecto de la corriente fuga se considera dentro de la incertidumbre de medición, pues aunque puede ser medida y compensada, su valor cambia y se estima con alta incertidumbre.

• Medición de la resistencia de conducción

La línea de transmisión de un patrón de tensión Josephson se caracteriza por su resistencia de conducción R_C baja (típicamente de algunos ohms), que resulta de la resistencia eléctrica de los conductores que la integran (cables, conectores e inductores). Debido a que la línea de transmisión generalmente es simétrica, se puede considerar sin introducir errores significativos que cada rama tiene una resistencia $R_C / 2$ (Figura 4).

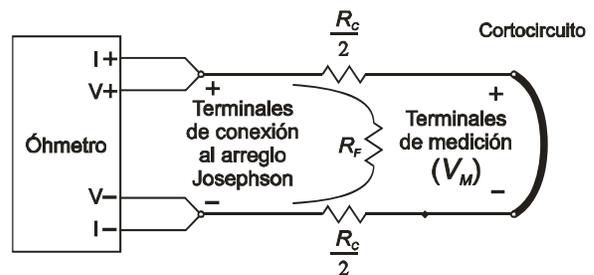


Figura 4. Determinación de la resistencia de conducción.

A la línea de transmisión también se le puede atribuir una resistencia de fuga R_F que es resistiva y dieléctrica y que está relacionada con la corriente de fuga I_F que se establece cuando se genera una tensión V_J en el arreglo Josephson. Esta resistencia de fuga R_F es alta (típicamente de decenas de GΩ).

Debido a que I_F recorre los diferentes materiales aislantes de la línea de transmisión, R_F realmente no se encuentra localizada entre dos puntos específicos. A pesar de esto, es posible estimar el valor de la resistencia R_C de la línea de transmisión aplicando un cortocircuito en las terminales de medición y midiendo la resistencia en las terminales de conexión al arreglo Josephson. El valor de la resistencia de conducción es

$$R_C = 3,7 \Omega \quad (14)$$

• Medición de la corriente de fuga

Para medir la corriente de fuga I_F de la línea de transmisión, se conecta un derivador de corriente R_D de 1 M Ω y un voltmetro con resolución de al menos 10^{-5} V, de manera que el conjunto se convierte en un ampermetro de resolución 10^{-5} V / 1 M Ω = 10 pA (Figura 5). Precisamente la tensión de 10 V del arreglo Josephson genera la corriente de fuga máxima, por lo que el valor nominal de la tensión de prueba V_P se fija en 10 V. Cualquier corriente de fuga I_L que fluya entre las ramas de la línea de transmisión generará en el derivador una tensión $V_{VÓLTMETRO} = I_L (1 \text{ M}\Omega)$.

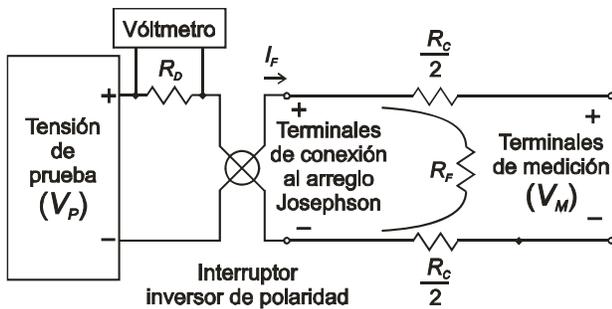


Figura 5. Determinación de la corriente de fuga.

Para medir la corriente de fuga I_F se armó el circuito de la Figura 5. Primero se invirtió la polaridad del circuito, se esperó 30 s y se registró el valor de la corriente. Luego, se volvió a invertir la polaridad del circuito, se esperó 30 s y se registró nuevamente el valor de la corriente. Se obtuvo el promedio de los dos valores registrados. El promedio obtenido es la corriente de fuga I_F de la línea de transmisión

$$I_F = (150 \pm 2) \text{ pA para } \sigma = 1 \quad (15)$$

Se puede estimar una resistencia de fuga efectiva como $R_F = V_P / I_F = (10,000153 \text{ V}) / (150 \times 10^{-12} \text{ A})$

$$R_F = (66,67 \pm 0,83) \text{ G}\Omega \text{ para } \sigma = 1 \quad (16)$$

Sin embargo, como se mencionó, R_F realmente no se encuentra localizada entre dos puntos específicos de la línea de transmisión. El peor caso sería que R_F se encontrara ubicada entre las terminales de medición, en serie con las resistencias $R_C / 2$, con lo que se forma un divisor de tensión. El error EV_M en la tensión de las terminales de medición debido a la corriente de fuga se calcula como sigue:

$$EV_M = V_{M \max} - V_{M \min} = V_J - V_J \frac{R_F}{R_C + R_F} \quad (17)$$

$$= V_J \frac{R_C + R_F - R_F}{R_C + R_F} = V_J \frac{R_C}{R_C + R_F} \quad (18)$$

Si se simplifica el resultado anterior para incluir la tensión V_{DUT} del dispositivo bajo prueba, se tiene que

$$EV_M = \frac{V_{DUT} R_C}{R_F} \quad (19)$$

Ya que este error se determinó para un intervalo limitado por los valores máximo y mínimo de la tensión en las terminales de medición, la incertidumbre estándar debida a la corriente de fuga se obtiene considerando la distribución rectangular de EV_M .

$$u_F = \frac{V_{DUT} R_C}{R_F \sqrt{3}} \quad (20)$$

Sustituyendo los valores obtenidos, se obtiene finalmente la incertidumbre debida a la corriente de fuga

$$u_F = \frac{(10 \text{ V})(3,7 \Omega)}{(66,5 \text{ G}\Omega)\sqrt{3}} = 0,3 \text{ nV} \quad (21)$$

3. RESULTADOS

Finalmente, el último paso para estimar la incertidumbre del patrón (incluyendo el método de medición) consiste en combinar las contribuciones y expresar el resultado. La combinación de las contribuciones de incertidumbre se realiza por suma cuadrática [3]

$$u_c = \sqrt{U_Z^2 + U_f^2 + U_F^2} \quad (22)$$

$$u_c = \sqrt{(6,9 \text{ nV})^2 + (1,2 \text{ nV})^2 + (0,3 \text{ nV})^2} \quad (23)$$

La incertidumbre del patrón nacional de tensión eléctrica en corriente continua, basado en el efecto Josephson, es por lo tanto

$$u_c = 7,0 \text{ nV para } 1\sigma \quad (24)$$

4. DISCUSIÓN

Se muestra a continuación una tabla con los resultados de este cálculo de incertidumbres, del realizado en 1996 al mismo patrón, y del correspondiente al patrón de tensión Josephson del laboratorio primario de Estados Unidos.

Componentes de incertidumbre	CENAM 2005	CENAM 1996	NIST 2005
u_z	6,9	---	4,4
u_f	1,2	0,1	1,1
u_F	0,3	0,6	3,0
$u_{FEMS \text{ no compensadas}}$	---	5,0	---
Calibración del voltmetro	---	3,0	---
$u_c \text{ para } 1\sigma$	7,0	6,6	5,4

Todos los valores están dados en nV.

Tabla 2. Resultados del cálculo de incertidumbre de patrones de tensión Josephson.

Aparentemente la incertidumbre del patrón del CENAM se incrementó de 1996 a 2005, en realidad, lo que sucede es que la metodología utilizada para estimar la incertidumbre del patrón cambió. En 1996 solo se consideran como fuentes de incertidumbre las fems termoeléctricas no compensadas, la frecuencia de referencia, las corrientes de fuga y la calibración del voltmetro y en 2005 se emplea el método propuesto en la referencia [2] que incluye muchas otras fuentes de incertidumbre no consideradas en 1996. Se observa una disminución en la incertidumbre por corrientes de fuga, una de las posibles razones de este cambio es que se hicieron cambios en los filtros del JVS del CENAM. Se observa un incremento en la incertidumbre debida a la frecuencia de referencia, debida posiblemente a que en 2005 se consideró la especificación del fabricante para estimar el número de cuentas en que varía la frecuencia exhibida por el contador de microondas, mientras que en 1996 este valor se estimó observando los cambios del contador durante una medición típica.

La incertidumbre por offset cero tomado en cuenta en 2005 incluye la incertidumbre por fems térmicas no compensadas y la incertidumbre por la

calibración del voltmetro consideradas en 1996, pero incluye muchas mas fuentes de incertidumbre no consideradas en 1996.

Comparando los valores dados por NIST con los dados por CENAM en 2005 se aprecia que la incertidumbre debida a la referencia de frecuencia es similar, sin embargo, la incertidumbre por corrientes de fuga del CENAM es mayor, esto puede deberse a que los filtros empleados en ambos sistemas son diferentes. También se aprecia que la incertidumbre por offset cero del CENAM es mayor a la de NIST esta incertidumbre se debe a muchos factores ya descritos, sin embargo, una diferencia importante entre los dos sistemas es que el CENAM usa como detector de nulos un voltmetro HP 3458 A y el NIST usa uno HP 34420, que presenta menor nivel de ruido.

5. CONCLUSIONES

Se mostró la aplicación de un método general con el que se estimó la incertidumbre del patrón de tensión eléctrica en corriente continua basado en el efecto Josephson del CENAM. Las componentes de incertidumbre evaluadas en 1996 y en 2005 son del mismo orden de magnitud. La incertidumbre de un patrón similar del NIST es también del mismo orden de magnitud. De lo anterior se puede concluir que el método es adecuado, se aplicó correctamente, y que los resultados obtenidos son confiables. Esto último se confirmó con los resultados de la reciente comparación bilateral de patrones Josephson CENAM-NIST.

REFERENCIAS

- [1] Centro Nacional de Metrología, www.cenam.mx/dme/410_Josephson.asp, 15/sep/2005.
- [2] C.A. Hamilton and Y.H. Tang, "Evaluating the uncertainty of Josephson voltage standards", *Metrologia*, 36, 1999, 53-58.
- [3] Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, Geneva, International Organization for Standardization, 1995.
- [4] B.D. Josephson, "Possible new effects in superconductive tunneling", *Physics Letters*, 1, 1962, 251-253.
- [5] Centro Nacional de Metrología, www.cenam.mx/dme/430.asp, 15/sep/2005.
- [6] Documento Interno. "Operación del Patrón de Tensión Eléctrica en Corriente Continua". Laboratorio de tensión eléctrica en corriente continua. CENAM.