

Disminución de Ruido Electromagnético en el Patrón de Tensión Eléctrica Continua con base en el Efecto Josephson del CENAM

David Avilés Castro, Dionisio Hernández Villaseñor, Enrique Navarrete García

Centro Nacional de Metrología
km 4,5 Carretera a Los Cués, 76246, Querétaro, México.
caviles@cenam.mx

RESUMEN

El presente trabajo trata sobre las medidas que se han tomado en el laboratorio del volt para la disminución del ruido electromagnético del patrón nacional de tensión eléctrica continua en base al efecto Josephson. Se describen las acciones realizadas como son: utilización de una jaula de Faraday, diseño de un filtro pasa-bajas, cambio del detector de nulos; diseño de un transformador de aislamiento y de un filtro de armónicas para la línea de alimentación del sistema. El trabajo se concluye con una descripción de las nuevas tecnologías de los patrones de tensión Josephson así como sus perspectivas, posibilidades y ventajas.

1. INTRODUCCION

En 1962 Brian Josephson (premio Nobel de Física 1973) investigando sobre la ruptura de simetría en superconductores, descubre las supercorrientes túnel y el efecto que lleva su nombre [1, 2]. El efecto Josephson en corriente alterna (ca) se produce cuando dos superconductores separados por un dieléctrico muy delgado son radiados con microondas, en estas condiciones se genera entre las terminales de los superconductores una tensión eléctrica continua V que es proporcional a la frecuencia f de las microondas de acuerdo a la siguiente Ec.:

$$V = n \frac{h f}{2e} = \frac{n f}{K_j}, \quad (1)$$

donde V es la tensión Josephson generada, h es la constante de Planck, e es la carga del electrón, f es la frecuencia de la radiación electromagnética, n indica el nivel cuántico (1,2,3...), y K_j es la constante Josephson.

Este efecto permite reproducir el volt relacionándolo con el hertz y con la constante Josephson. La incertidumbre relativa con la que se ha determinado el valor de la constante Josephson es de $2,5 \times 10^{-8}$, aunque el experimento que permite la reproducción del volt tiene una reproducibilidad mucho mayor, debido a esto se adoptó en 1990 un valor convencional de la constante Josephson $K_{j-90} = 2e/h = 483\,597,9 \text{ GHz/V}$, lo que ha permitido disminuir las diferencias entre los laboratorios nacionales de metrología en dos ordenes de magnitud llegando a niveles de 1×10^{-10} .

Unos años después del descubrimiento del efecto Josephson la comunidad científica internacional se lanzó en la carrera de desarrollar un patrón de tensión eléctrica basado en el efecto Josephson. Los desarrollos más impresionantes han sido los del NIST (Laboratorio Nacional de Estados Unidos de América) y los del PTB (Laboratorio Nacional de Alemania) que después de cerca de 30 años de desarrollo lograron fabricar circuitos integrados superconductores o *chips* que integran decenas de miles de uniones Josephson en serie que permiten generar tensiones hasta de 10 V, con frecuencias de microondas del orden de 75 GHz.

1.1. Antecedentes

En Latinoamérica los primeros experimentos sobre el efecto Josephson se realizaron en el CINVESTAV-IPN a partir de una colaboración entre Argentina y México en el año 1979 [3].

En los años 90s había en México una decena de laboratorios de calibración en magnitudes eléctricas que tenían como referencias de tensión eléctrica continua pilas patrón, referencias Zener y multímetros de $8\frac{1}{2}$ dígitos con los cuales ofrecían servicios de calibración a la industria. Para satisfacer la demanda de servicios de calibración de estos patrones de referencia de alta exactitud, en el año 1994 el CENAM adquirió un Sistema de Efecto Josephson marca RMC, para reproducir el volt basado en *chips* de 1 V y 10 V desarrollados en el NIST, el cual ha sido modificado en el CENAM.

Actualmente, en el país, hay alrededor de 40 laboratorios de calibración en magnitudes eléctricas que calibran decenas de miles de instrumentos de mediciones eléctricas.

La decisión de contar con un sistema de efecto Josephson que fungiera como el patrón nacional de tensión eléctrica continua en México basado en el efecto Josephson, se debió principalmente a que esta magnitud constituye un pilar dentro de las mediciones eléctricas que se realizan en el país, ya que de ésta se derivan muchas otras magnitudes eléctricas como: corriente eléctrica continua, tensión y corriente eléctrica alterna, potencia y energía; magnitudes de alta frecuencia y de otras magnitudes físicas como presión, temperatura, etc.

2. OPERACIÓN DEL PATRÓN JOSEPHSON

La base del patrón es un circuito integrado o *chip* superconductor de cerca de 20 000 uniones Josephson conectadas en serie, llamado también un arreglo de uniones Josephson. La tensión entregada en las terminales del chip es un múltiplo entero de 155 μV (valor correspondiente a un nivel cuantizado $n=1$ y a una frecuencia de radiación de $f=75\text{ GHz}$ en una unión Josephson). Con este *chip* es posible generar tensiones entre -10 V y $+10\text{ V}$ en niveles cuantizados.

Los elementos fundamentales en el patrón de efecto Josephson se muestran en la Fig. 1, ellos son: el *chip*, el oscilador de microondas, el contador de frecuencia, la fuente de polarización, el filtro de RF y baja frecuencia incluido en el sistema comercial, el filtro adicional y el *Dewar* o contenedor especial del helio líquido como se muestra a continuación.

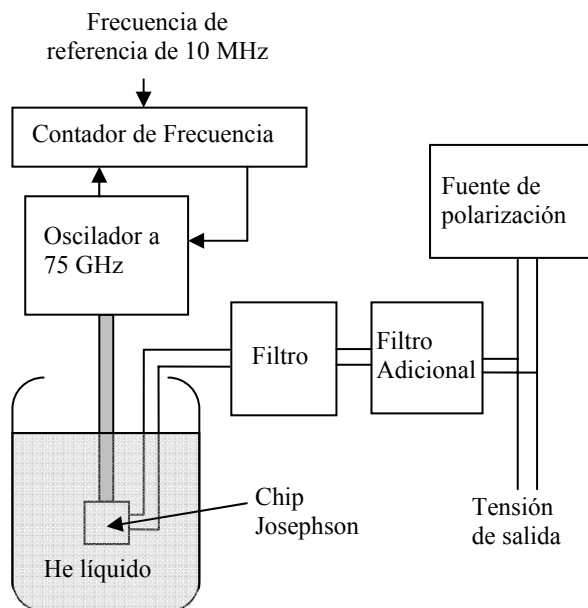


Fig. 1. Diagrama a bloques del patrón de efecto Josephson.

Debido a que el *chip* Josephson funciona en base a superconductores de baja temperatura crítica, Niobio (Nb), para su operación es necesario mantenerlo sumergido en helio líquido (a una temperatura aproximada de 4,2 K).

La fuente de microondas está basada en un oscilador de cavidad resonante a diodo Gunn de aproximadamente 75 GHz, su frecuencia se controla por medio de un contador de frecuencia que basa su exactitud en una referencia de frecuencia externa de 10 MHz proveniente de un reloj atómico de cesio (Cs). Las microondas se aplican al *chip* a través de una guía de onda dieléctrica.

La selección del nivel cuantizado de tensión de salida se hace aplicando al *chip* una tensión de polarización cercana al nivel de tensión de salida deseada, lo cual se hace con una fuente de tensión ajustable. Una vez que se ha polarizado el *chip*, se desconecta la fuente de polarización y el *chip* se mantiene en una tensión constante correspondiente al escalón cuántico más cercano a la tensión de polarización.

Explicaciones detalladas del funcionamiento del patrón Josephson se encuentran en las siguientes referencias [4, 5].

3. EL ORIGEN DE LA ALTA SUSCEPTIBILIDAD AL RUIDO ELECTROMAGNÉTICO

Una característica que permitió el desarrollo de los *chips* superconductores de efecto Josephson fue el uso de uniones de alta capacitancia de tecnología SNS (superconductor- metal -superconductor). Con esta tecnología se pueden generar escalones de tensión eléctrica continua con corrientes de polarización muy bajas, por lo que es suficiente generar una tensión similar a la requerida en la medición y conectarla al chip Josephson para polarizarlo en el nivel cuántico deseado. Sin embargo, un ruido electromagnético que provoque cambios de corriente del orden de 20 μA en los cables que se conectan al chip Josephson, hace que el escalón cuántico cambie de nivel. Debido a su baja impedancia los chips Josephson son mas susceptibles a ruidos originados por campos magnéticos que a ruidos originados por campos eléctricos. Estos chips son susceptibles a ruidos de baja frecuencia y de radiofrecuencia. El *Dewar* que contiene Helio líquido es el primer blindaje contra este tipo de ruidos. En sistema comercial tiene integrado un filtro de baja frecuencia y de RF en las terminales que se conectan al *chip*, además el

sistema cuenta con un filtro adicional descrito en este artículo. El *chip* está dentro de un blindaje de alta permeabilidad (μ -metal) que lo protege contra ruidos de origen magnético.

En la práctica cuando se hacen mediciones con este tipo de patrones son frecuentes los cambios repentinos del nivel cuántico ("brincos de escalón"), si estos cambios son menores de 10 mV es posible realizar calibraciones, para cambios mayores se incrementa la incertidumbre debida a la ganancia del detector de nulos.

Debido a lo anterior se puede decir que los chips de tecnología SNS tienen una alta susceptibilidad al ruido electromagnético.

4. MEDIDAS PARA LA DISMINUCIÓN DEL RUIDO ELECTROMAGNÉTICO

4.1. Uso de una Jaula de Faraday

El patrón de tensión Josephson se aloja en una jaula de Faraday para radiofrecuencia cuyo uso tiene muchas complicaciones: se requieren filtros de RF para la línea de alimentación, se deben aislar eléctricamente los ductos de aire para evitar ruido electromagnético proveniente del sistema de aire acondicionado, cualquier cable que entre a la jaula debe estar blindado y éste conectado a la jaula, se debe tener una tierra física de buena calidad (menor de 1Ω) para conectar la jaula, para evitar que las señales de RF entren al laboratorio a través de los ductos de aire acondicionado se debe tener filtros del tipo panel de abeja, no se pueden introducir señales de telefonía ni de datos a la jaula a menos de usar filtros especiales.

Finalmente aunque se tomen las medidas anteriormente descritas, el patrón Josephson así como los equipos adicionales del laboratorio como referencias Zener, pilas patrón, multiplexores, voltímetros, circuitos de carga de baterías, computadoras, etc. generan ruido electromagnético al interior de la jaula.

En relación al uso de una Jaula de Faraday nuestra experiencia es que si bien el patrón de efecto Josephson requiere de un ambiente con bajos niveles de ruido electromagnético el uso de una Jaula de Faraday para radiofrecuencia no es necesario. Basta con una jaula de Faraday para bajas frecuencias y sobre todo utilizar técnicas de eliminación de ruido locales como son: uso de blindajes y guardas, evitar la formación de lazos de tierra, usar cables de cobre trenzados con

aislamiento de teflón y blindados, filtrar las señales de polarización para evitar que entre ruido electromagnético al *chip*, así como tener un suministro eléctrico de buena calidad (con baja distorsión armónica y bajo ruido) y una tierra física de baja resistencia y bajo ruido.

4.2. Inclusión de un Filtro Pasa-Bajas

El ruido proveniente del sistema de polarización y del sistema de medición que llega al *chip* lo hace cambiar de nivel cuántico. Para disminuir este efecto fueron tomadas muchas medidas de reducción de ruido en el laboratorio, una de las más eficaces fue introducir un filtro adicional al filtro que tiene el patrón en los cables de tensión de salida y de polarización que se conectan directamente del *chip*. A continuación se muestra el circuito del filtro.

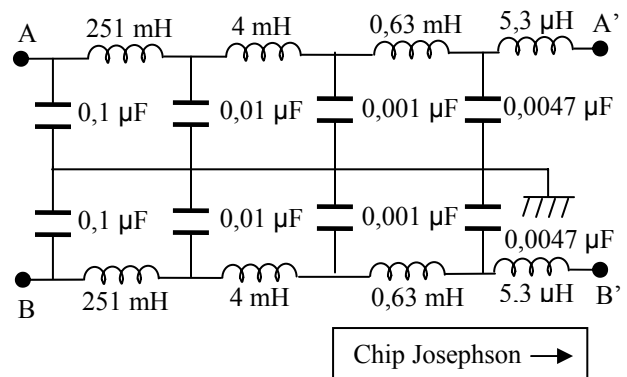


Fig. 2. Circuito eléctrico del filtro adicional.

El filtro fue diseñado para filtrar el ruido en modo diferencial y en modo común. Cada etapa del filtro se aloja en blindajes independientes para disminuir la interferencia electromagnética de alta frecuencia. La respuesta en frecuencia del filtro adicional descrito se muestra en la Fig. 3.

El filtro introduce un error en la tensión de salida del patrón debido a que a frecuencia cero tiene un efecto de divisor resistivo de la tensión Josephson V_J como muestra la Fig. 4. Este error puede ser estimado considerando que se forma un divisor resistivo entre la resistencia en serie R_s , que incluye la resistencia de los cables y la de los inductores en un hilo (resistencia de A-A' o de B-B') y la resistencia en paralelo R_p , que incluye la resistencia entre hilos formada por la resistencia de los dieléctricos de los capacitores del filtro (resistencia de A-B o de A' - B'). En realidad las resistencias en serie (R_s) y en paralelo (R_p) están distribuidas en las diversas etapas del filtro, por lo que la

estimación del error de esta manera representa el peor caso.

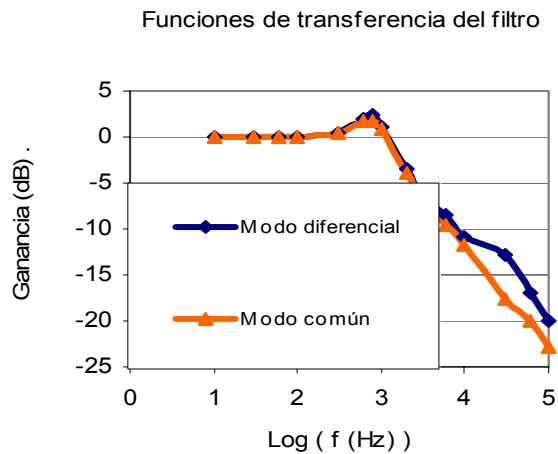


Fig. 3. Respuesta en frecuencia del filtro adicional medida en modo común, es decir, tomando la entrada en A-tierra y la salida en A'-tierra así como en modo diferencial, es decir, tomando la entrada en A-B y la salida en A'-B'.

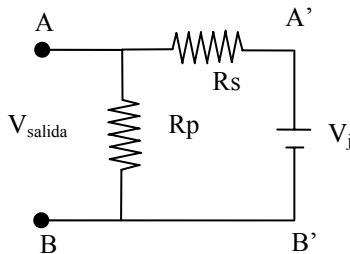


Fig. 4. Efecto de divisor resistivo por la introducción del filtro.

Los valores medidos son $R_s = 1,5 \Omega$ y $R_p = 5 \times 10^{11} \Omega$, por lo que el error por la introducción del filtro en el peor caso ($V_j = 10 \text{ V}$) es $< 0,1 \text{ nV}$, que se considera despreciable comparándolo con la incertidumbre del patrón que es de aproximadamente 6 nV .

Como ya se mencionó el sistema tiene integrado un filtro de baja frecuencia y RF adicional al presentado en esta sección. Haciendo un tratamiento similar de todo el sistema incluyendo ambos filtros y todos los cables, se llega a que hay un error de $0,3 \text{ nV}$ cuando el sistema se opera a 10 V como se muestra en la referencia [6].

4.3. Mejoras a la Calidad de la Línea de Alimentación

El Laboratorio del volt cuenta con energía ininterrumpible y regulada que proviene de un sistema motor-generator. Sin embargo, debido al incremento del equipamiento y a que muchas de las cargas conectadas al sistema son no-lineales, la

línea de alimentación está distorsionada y contaminada con ruido electromagnético, lo que en parte provoca los cambios espontáneos del nivel cuántico del patrón, la solución que implementamos para mejorar la calidad de la línea de alimentación fue diseñar y construir un filtro de armónicas y un transformador de aislamiento que se describen a continuación.

4.4. Filtro de Armónicas

Se diseñó un filtro tipo *Notch* para filtrar la línea de alimentación del patrón ($127 \text{ V} - 60 \text{ Hz}$). El filtro fue diseñado para soportar una carga de 600 VA , ver Fig. 5.

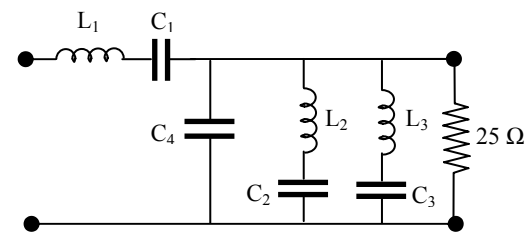


Fig. 5. Circuito eléctrico del filtro de armónicas.

$L_1 = 53,4 \text{ mH}$, $L_2 = 55,2 \text{ mH}$, $L_3 = 28,14 \text{ mH}$
 $C_1 = 133,1 \mu\text{F}$, $C_2 = 14,1 \mu\text{F}$, $C_3 = 10 \mu\text{F}$, $C_4 = 15 \mu\text{F}$

A 60 Hz la inductancia L_1 y la capacitancia C_1 están en resonancia por lo que su impedancia en serie es muy baja y la ganancia del filtro con carga es unitaria.

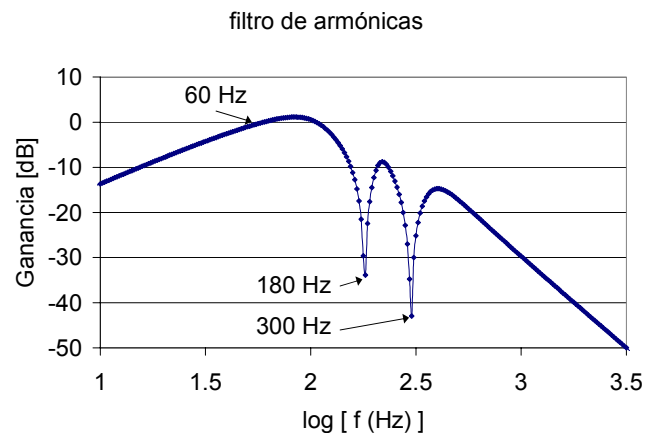


Fig. 6. Respuesta en frecuencia del filtro de armónicas.

A 180 Hz (tercera armónica) L_2 y C_2 están en resonancia y hay un efecto de rechazo de banda como muestra la Fig. 6, A 300 Hz (quinta armónica) el efecto de rechazo de banda se obtiene ya que L_3 y C_3 están en resonancia. A frecuencias mayores a 60 Hz , en la impedancia en serie L_1 , C_1 domina el

efecto inductivo que incrementa su impedancia con la frecuencia, mientras que la impedancia del capacitor C_4 disminuye con la frecuencia obteniéndose una atenuación que se incrementa con la frecuencia como muestra la Fig. 6.



Fig. 7. Fotografía del filtro de armónicas.

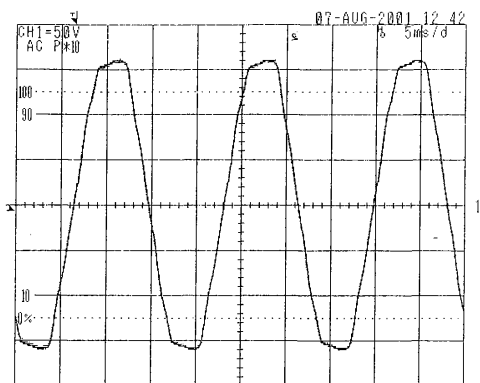


Fig. 8. Forma de onda de la línea de alimentación antes del filtro de armónicas.

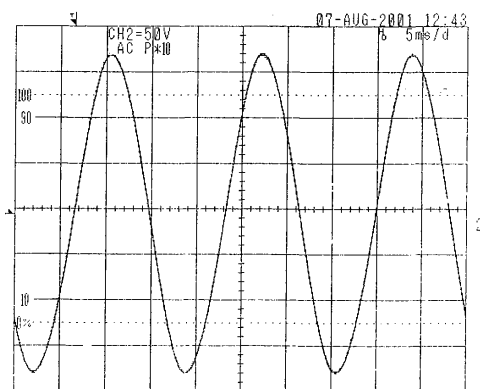


Fig. 9. Forma de onda de la línea de alimentación después del filtro de armónicas.

4.5. Transformador de Aislamiento

Se diseñó y construyó un transformador de aislamiento para filtrar el ruido de alta frecuencia que proviene de la línea de alimentación, Fig. 10. Se trata de un transformador con relación 1:1, es decir, se espera tener a la salida el mismo nivel de tensión que a la entrada.

Lo interesante de este transformador es que el primario y el secundario tienen blindajes independientes que permiten obtener una capacitancia muy baja entre primario y secundario, de modo que el ruido de alta frecuencia del primario no pasa al secundario a través de esta capacitancia.

Además, debido a la respuesta en frecuencia del material magnético con el que se construyó el núcleo del transformador (acero al silicio de grano orientado) el transformador filtra las frecuencias mayores a 1kHz.

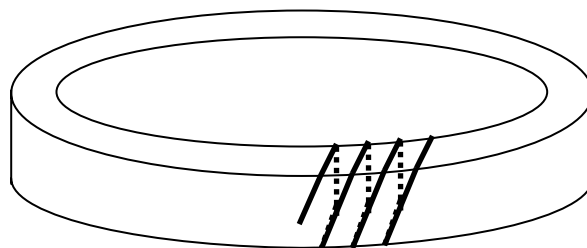


Fig. 10. Esquema del toroide y los devanados del transformador de aislamiento.

El transformador se forma de varias capas que se colocan en el siguiente orden:

- 1) Aislamiento eléctrico.
- 2) Embobinado primario con alambre magneto del número 14.
- 3) Blindaje metálico del primario hecho con papel aluminio.
- 4) Aislamiento eléctrico
- 5) Embobinado secundario con alambre magneto del número 14.
- 6) Blindaje metálico del secundario hecho con papel aluminio.
- 7) Aislamiento eléctrico.

Se debe tener especial atención en no crear una espira cerrada con los blindajes metálicos de modo que se evite formar un corto circuito en el transformador, para esto se colocan varias capas de blindaje metálico colocando cada capa aislada de la anterior. Finalmente los blindajes se conectan a tierra.

El núcleo del transformador está formado de lámina de acero eléctrico comercial, Fig. 11.



Fig. 11. Fotografía del transformador de aislamiento ya montado.

4.6. Tierra Física

Para disminuir el ruido proveniente de la tierra del sistema eléctrico se utilizó una tierra aislada como la utilizada en equipos sensibles a interferencias electromagnéticas, frecuentemente utilizada también en sistemas de cómputo.

El cable de neutro localizado en el secundario del transformador de aislamiento se conectó a una tierra física local independiente de la tierra del sistema eléctrico del CENAM. La tierra física se hizo utilizando una varilla de cobre soldada con soldadura tipo CADWELD al cable de tierra del sistema eléctrico del Laboratorio y conectada también a la jaula de Faraday. Se utilizó arcilla, trozos de metal y polvo en base a carbón (GEM) para mejorar la conducción a tierra.

Debido a que el sistema de tierra se ubicó en los jardines del CENAM se mantiene continuamente húmedo.

La tierra física independiente sirve también para disminuir la resistencia a tierra debida a lo largo del cableado de la tierra física del sistema eléctrico. La resistencia de la tierra física independiente se midió y tiene un valor $<1\Omega$.

4.7. Cambio del Detector de Nulos

El detector de nulos originalmente utilizado fue el multímetro HP 3458A que tiene un nivel de ruido de fondo del orden de 20 nV (ruido RMS, NPLC=100). Ahora se utiliza un nanovóltmetro Agilent 34420A

con un nivel de ruido de fondo del orden de 1,5 nV (ruido RMS, NPLC = 500). El cambio en el detector de nulos no tiene impacto en la calibración de referencias Zener ya que en este caso la principal fuente de ruido es la propia referencia Zener, sin embargo, cuando se hacen calibraciones a niveles de algunos mV con el patrón Josephson la disminución del ruido del detector de nulos disminuye la incertidumbre de calibración tipo A.

4.8. Iluminación

El laboratorio cuenta con dos sistemas de iluminación uno en base a lámparas fluorescentes y otro en base a lámparas incandescentes. Los balastos utilizados en las lámparas fluorescentes generan ruido electromagnético que afecta la operación del patrón Josephson, sin embargo, no producen tanto calor como las lámparas incandescentes las cuales son una carga térmica importante para el sistema de aire acondicionado del Laboratorio. Cuando se utiliza el patrón de tensión de efecto Josephson se emplea el sistema de iluminación incandescente que produce menores niveles de ruido electromagnético y cuando se utilizan otros sistemas de medición menos susceptibles al ruido electromagnético se utiliza la iluminación fluorescente.

4.9. Nuevas Tecnologías de Efecto Josephson

La alta susceptibilidad al ruido electromagnético del sistema con tecnología SNS tiene la desventaja de que los cambios espontáneos de nivel cuántico de la tensión de salida debido al ruido electromagnético, no permiten medir con seguridad pilas patrón ni es posible la automatización completa del patrón para aplicaciones en señales eléctricas de corriente alterna.

Actualmente está en desarrollo una nueva tecnología de *chips* Josephson basados en tecnología SINIS (superconductor –aislante – metal normal –aislante –superconductor) que usan uniones Josephson de baja capacitancia que requieren una corriente diferente de cero para ser polarizadas en un cierto nivel cuántico de tensión, estos *chips* Josephson tienen conjuntos de uniones Josephson en arreglos binarios (1, 2, 4, 8, ...) que permiten generar, hasta ahora, tensiones de hasta 1V, (los *chips* de 10V aún se encuentran en desarrollo). En estos *chips* cada conjunto binario de arreglos Josephson debe ser polarizado independientemente con una fuente de corriente que permite seleccionar el nivel cuántico de cada conjunto.

Lo más interesante de esta nueva tecnología es que las uniones Josephson son mucho menos susceptibles al ruido electromagnético que las fabricadas con la tecnología anterior, ya que soportan niveles de ruido en corriente del orden de 1 mA sin cambiar de nivel cuántico. Esto las hace completamente estables (no se producen cambios de nivel cuántico espontáneos como en la tecnología anterior) y permiten cambiar instantáneamente los niveles de polarización controlando los niveles de las fuentes de corriente de polarización. Estos sistemas llamados patrones de efecto Josephson programables, permiten además sintetizar señales de cualquier forma de onda en base a aproximaciones escalonadas, lo que abre la posibilidad de explorar aplicaciones en metrología eléctrica de corriente alterna.

5. CONCLUSIÓN

Gracias a las medidas descritas en este artículo actualmente el patrón nacional de tensión eléctrica continua en base al efecto Josephson funciona adecuadamente y los cambios espontáneos de nivel cuántico de tensión solo ocurren ocasionalmente. La disminución de los cambios espontáneos de nivel cuántico permite mantener un buen nulo en el sistema de medición ($< 0,5$ mV) con lo que la incertidumbre debida a la ganancia del detector de nulos se reduce a niveles despreciables.

El patrón ha sido comparado con un patrón similar del NIST obteniéndose buenos resultados que aseguran la exactitud de las mediciones que se hacen con el mismo [7]. Sin embargo, cabe mencionar que el actual patrón de tensión Josephson del CENAM tiene 14 años de uso y que el desarrollo de las nuevas tecnologías de mediciones eléctricas hacen necesaria su actualización, siendo la mejor opción para ello el patrón de efecto Josephson programable que es uno de los proyectos prioritarios de la División de Mediciones Electromagnéticas del CENAM.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al maestro Jorge Blancas y al estudiante Jonathan Jacob Hernández por su apoyo en la solución de los problemas de ruido electromagnético del Laboratorio del volt, en particular en la construcción del filtro de armónicas y el transformador de aislamiento.

REFERENCIAS

- [1] Brian D. Josephson, "The discovery of tunneling supercurrents, Nobel Lecture, December 12, 1973.
- [2] B.D. Josephson, "Possible new effects in superconductive tunneling", Physics Letters, pp. 21-22, volume 1, number 7, 1962.
- [3] E. Acosta, R. García, H. Nava, "Microwave match to point contact Josephson junction in a rectangular waveguide cavity", Conference on Precision Electromagnetic Measurements, Boulder Colorado USA, 28 de junio 1982.
- [4] C. Hamilton, R. Kautz, F. Lloyd, R. Steiner and B. Field, "The NBS Josephson Array Voltage Standard", IEEE Transactions on Instrumentation and Measurements, Vol. IM-36, No. 2, June 1987
- [5] F.L. Lloyd, C.A. Hamilton, J.A. Beall, D. Go, R.H. Ono and R.E. Harris, "A Josephson array voltage standard at 10 V", IEEE Electrom. Dev. Lett., Vol. EDL-8, pp. 449-450, oct. 1987.
- [6] Enrique Navarrete, Dionisio Hernández, David Avilés, "Estimación de la incertidumbre del patrón nacional de tensión eléctrica en corriente continua basado en el efecto Josephson", Memorias del Simposio de Metrología 2006, CENAM, México.
- [7] Dionisio Hernández, Enrique Navarrete, David Avilés, Yi-hua Tang "Final report on bilateral comparison of dc voltage references between CENAM and NIST (SIM.EM.BIPM-K11.b), 2007 Metrologia 44 01011, doi: 10.1088/0026-1394/44/1A/01011.<http://www.iop.org/EJ/abstract/0026-1394/44/1A/01011>