

## AVANCES EN LA IMPLEMENTACIÓN DE UN PATRÓN DE TENSIÓN POR EFECTO JOSEPHSON CON SUPERCONDUCTORES DE ALTAS TEMPERATURAS EN UTE

Heriguatí de Souza <sup>1</sup>, Leonardo Trigo <sup>1</sup>, Daniel Slomovitz <sup>1</sup>, Alexander Klushin <sup>2</sup>

<sup>1</sup> LABORATORIO de UTE, Montevideo, Uruguay, [hdesouza@ute.com.uy](mailto:hdesouza@ute.com.uy)

<sup>2</sup> Institut für Schichten und Grenzflächen, Germany, [a.klushin@fz-juelich.de](mailto:a.klushin@fz-juelich.de)

**Resumen:** Este artículo tiene como finalidad difundir los resultados obtenidos en el desarrollo de un patrón de tensión utilizando superconductores de alta temperatura (YBCO). Estos superconductores trabajan a temperatura del nitrógeno líquido el cual tiene un costo muy reducido y es de fácil adquisición. El desarrollo de este patrón usa un integrado superconductor el cual consta de varias juntas Josephson conectadas en serie a las cuales se puede acceder y seleccionar de acuerdo al nivel de tensión requerido en la salida, desde 10mV a 100mV.

**Palabras clave:** Patrones de tensión, efecto Josephson, superconductores de alta temperatura

### 1. SISTEMA PROPUESTO

El sistema está basado en superconductores llamados "de alta temperatura"; en este caso particular utilizamos el cristal denominado YBCO (Ytrio, Bario, óxido de Cobre). Estos cristales tienen la propiedad de comportarse como conductores perfectos a temperatura del nitrógeno líquido. Con estos superconductores se construyó un chip de juntas Josephson el cual fue desarrollado por un conjunto de científicos de Alemania y Rusia [1].

El chip consta de varias salidas, cada 10 mV, conectadas en serie, pudiéndose obtener valores múltiplos. El conjunto, es sumergido en un tanque de nitrógeno líquido, pero aislado del mismo por un tubo que contiene en su interior un ambiente con gas helio para que los elementos del chip se encuentren en un ambiente no corrosivo.

El tanque de nitrógeno líquido se conecta una bomba para generar cierto vacío necesario para mantener la temperatura en el chip en el entorno de los 75 K. Este sistema es controlado de forma automática a través de un dispositivo electrónico que comanda la bomba manteniendo la temperatura

estable en  $\pm 0.2$  K. En la Fig. 1. se observa un diagrama del sistema.

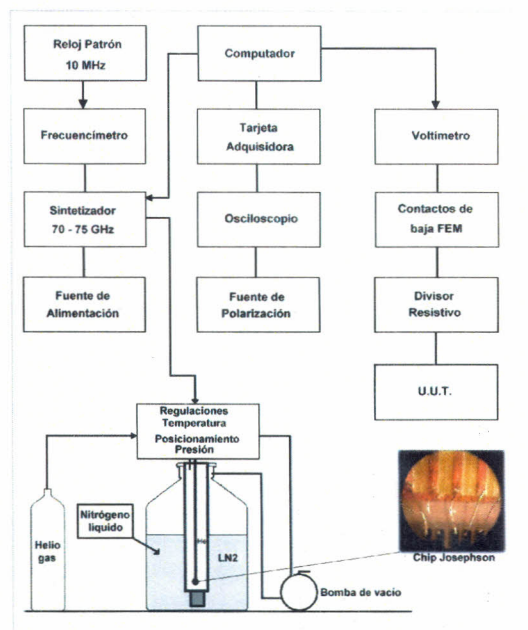


Fig 1. Diagrama en bloques del sistema.

En un computador se ejecuta un software con el cual se ajustan los valores de varios parámetros, se mide la temperatura, se visualizan en la pantalla la forma de los escalones cuánticos, se selecciona los niveles de corriente para los cuales estos escalones se visualizan verticales y estables (ver Fig. 2). Los parámetros a configurar son: frecuencia y potencia de la microonda, corriente crítica, temperatura, selección de corriente en el escalón, tiempo de inversión de polaridad, etc.



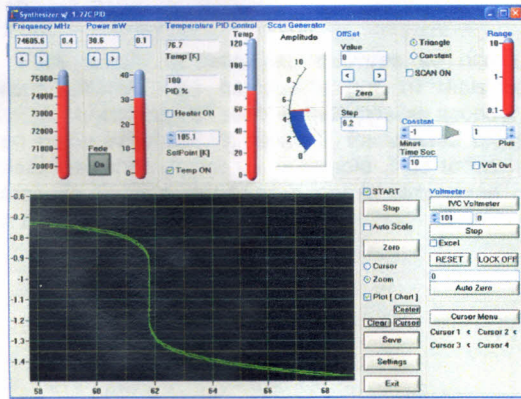
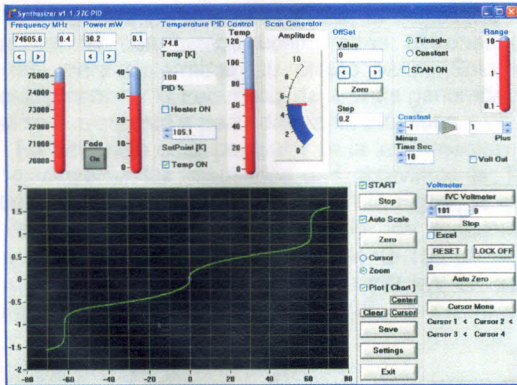


Fig 2. Pantallas del software

Un sintetizador (multiplicador de frecuencia) genera las microondas con las cuales se irradian las juntas. Éste se comunica vía RS232 con el computador y el software es quien se encarga de controlar la frecuencia y la potencia de la microonda. Ésta es generada a partir de una señal 10 MHz que proviene del Patrón de Frecuencia del Laboratorio (Reloj Atómico). El sintetizador entrega en su salida una frecuencia en el entorno de 70 a 75 GHz, la cual se acopla al chip por medio de una guía de onda y un resonador Fabry-Perot. El chip de juntas Josephson está dentro de un blindaje magnético de alta permeabilidad, al final de una puntera deslizante criogénica que hace la transición entre el helio el nitrógeno. Por un tubo central pasan varios pares de conductores de cobre desde el chip a los comandos.

Una tarjeta generadora y adquisidora es la encargada de generar la señal de corriente que se aplica a las juntas, realizar las medidas de la tensión en dichas juntas (en una función de osciloscopio, con 16 bits de resolución), realiza la medida de temperatura, controla los tiempos entre los cambios de polaridad de la tensión de salida, etc. Todas las funciones de la tarjeta son controladas vía comunicación USB por el software que se ejecuta en el computador.

La construcción de este patrón permite seccionar paquetes de juntas de 10 mV por separado o sumarlas hasta llegar a los 100 mV. Los paquetes de 10 mV contienen 67 juntas en serie. La salida de tensión seleccionada es medida y comparada contra otros patrones por divisores de tensión y un multímetro digital de alta impedancia y resolución

Dado que la tensión de salida es relativamente pequeña, se requiere de divisores de tensión para comparar contra fuentes patrones de 1 V o 10 V. Para esto se desarrolló un divisor resistivo de muy alta estabilidad, autocalibrable, que relaciona estos niveles de tensión [2].

## 2. EFECTO JOSEPHSON

Las juntas Josephson son utilizadas en metrología como estándares de voltaje, el concepto se basa en la interacción entre una microonda externa aplicada a una junta que da lugar a una caída de voltaje fundamental exacta a través de la junta. La tensión total en el chip vale

$$U_N = Nf / K_{j-90} \quad (1)$$

siendo  $N$  el número de juntas,  $f$  la frecuencia y

$$K_{j-90} = \frac{2e}{h} \quad (2)$$

$e$  es la carga del electrón y  $h$  la constante de Planck. El efecto está basado en el conocido efecto túnel, el que consiste en el pasaje de corriente eléctrica a través de una barrera aislante. Desde el punto de vista clásico esto no sería posible, pero la mecánica cuántica predice que si la barrera es fina, la posibilidad que los portadores de carga la atraviesen no es nula. Se observa por lo tanto, la existencia de una corriente continua como resultado de una tensión continua, si la junta es enfriada hasta temperaturas en que los materiales utilizados se tornan superconductores ( $r = 0$ ), Josephson predijo que adicionalmente aparecerá una corriente alterna cuya frecuencia  $f$  es directamente proporcional a la tensión  $U$  aplicada según la ecuación:

$$f = \frac{2e}{h} \times U \quad (3)$$

En sí misma la junta trabaja como un convertidor entre frecuencia y tensión, vinculando ambas magnitudes mediante constantes universales. Esta relación no depende de los detalles constructivos del dispositivo que la implementa, ni de elementos que envejecen y cambien lo que lo hace ideal para uso como patrón primario de tensión. Conociendo el valor



de la constante de proporcionalidad, el dispositivo no requiere ser contrastado contra otros patrones de tensión para determinar su propio valor. Solo se necesita conocer la frecuencia de la onda generada, lo cual se implementa a partir de relojes atómicos.

Para nuestro caso particular en la implementación de este patrón los resultados que obtuvimos en los escalones cuánticos se muestran en la Fig. 2, la que muestra la forma característica de los escalones cuánticos, con una amplitud de corriente 150  $\mu\text{A}$  para el mismo nivel de tensión de salida (60 mV en este ejemplo).

### 3. COMPARACIÓN CONTRA FUENTES PATRONES

Para escalar a tensiones mayores se usa un divisor resistivo 10:1 compuesto por 10 resistores iguales conectados en serie, siendo posible acceder a cada unión individual [2]. Sean  $R_i$  los valores de las resistencias individuales. El promedio  $Z$  de todas las caídas de tensión (producidas por la circulación de una corriente  $I$ ) vale

$$Z = \frac{I \sum_{i=1}^{10} R_i}{10} \quad (4)$$

donde  $I$  es la corriente por la serie. Por otro lado, la suma de las caídas vale

$$Y = I \sum_{i=1}^{10} R_i \quad (5)$$

Por tanto, la relación  $Y/Z$  vale 10, exactamente. En esto se basa el principio del divisor. Para la comparación de tensiones se usa un voltímetro de alta precisión (HP 3458A, 8  $\frac{1}{2}$  dígitos) en las escalas de 10 V para la suma total y 1 V para las caídas individuales. Obsérvese que no es necesario conocer los errores de dicho instrumento, pues sólo se usa en calidad de comparador. El único requisito que afecta esta medida es su estabilidad. Es más, el propio procedimiento calibra al voltímetro en lo concerniente a la relación 10:1, en las escalas usadas.

El divisor resistivo posee un divisor de guarda, como lo muestra la Fig. 3 y, si es necesario, se conecta la guarda del voltímetro a cada salida de guarda correspondiente a la salida de tensión usada. En caso que esto no fuera necesario, puede usarse la guarda general del divisor (borne G). Una sencilla prueba permite determinar la influencia de la conexión de guarda. Durante el comienzo de la medición se cambia la guarda de lugar y se observa la variación en el instrumento. Realizando esta prueba en el resistor

central de la serie y en ambos extremos, es suficiente para determinar su influencia en todos los puntos.

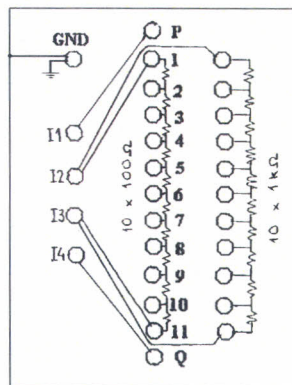


Fig. 3. Esquema eléctrico del divisor

Se calcula la relación 1:10 a partir de las mediciones. Las siguientes ecuaciones definen el error del voltímetro durante el procedimiento

$$\epsilon_d = \frac{\frac{Y1 + Y2}{2} - \sum_{i=1}^{10} Zi}{\sum_{i=1}^{10} Zi} \quad (6)$$

$$\epsilon_u = \frac{\frac{Y2 + Y3}{2} - \sum_{i=1}^{20} Zi}{\sum_{i=1}^{20} Zi} \quad (7)$$

donde  $Y_i$  son las lecturas de la tensión de 10 V, mientras que  $Z_i$  son las lecturas de 1 V correspondientes a cada resistor de la serie. Los valores de  $\epsilon_i$  corresponden a los errores. El error promedio  $\epsilon$  vale

$$\epsilon = \frac{\epsilon_d + \epsilon_u}{2} \quad (8)$$

Esto es, un valor de  $\epsilon$  positivo indica que la lectura de 10 V del voltímetro, es mayor a 10 veces la lectura de 1 V. Este mismo procedimiento se usa para calibrar el rango de 100 mV del multímetro, respecto a los anteriores.

Una vez calibrado el multímetro se procede a medir la tensión del patrón que se desea comparar con el Josephson (fuentes zener o pilas patrones de 1.018 V y 10 V). Se asume que el error hallado para la relación 10:1 es el mismo que para la relación 10:1,018.

La incertidumbre de esta comparación depende de los valores de FEMs termoeléctricas, impedancia de entrada del voltímetro, estabilidad de las lecturas, resolución de las lecturas, tensiones de offset y resistencia de los cables de conexión. Cada medida se determina a partir de 3 mediciones individuales realizadas en días diferentes. En ensayos realizados se estimó las incertidumbres tipo A en  $1.8 \times 10^{-8}$ . La combinación de los tipos A y B resulta en un total de  $3 \times 10^{-7}$ . Este valor es posible reducirlo con un diseño nuevo del divisor resistivo que permita comparar directamente el Josephson y la fuente patrón a calibrar, sin necesidad de usar el multímetro. Este proyecto está en desarrollo.

#### 4. CONCLUSIONES

Se desarrolló un sistema Josephson no convencional de alta temperatura. Este proyecto, que aún no está finalizado, ha logrado obtener escalones cuánticos para los niveles de 60 mV; siendo la próxima meta alcanzar 100 mV, con lo cual las incertidumbres mejorarían considerablemente.

Se está implementando un sistema automático de medidas y análisis estadísticos de las mismas y un divisor de tensión de relación variable de 3 décadas, controlado por el mismo sistema, para lograr incertidumbres menores, acordes a los sistemas Josephson convencionales.

#### REFERENCIAS

- [1] A. M. Klushin, M. He, A. S. Katkov, "Constant-Voltage Steps at 0.1 Volt from a Series Array of High-Tc Josephson Junctions," CPEM 2008, Broomfield, June 2008.
- [2] H. de Souza, D. Slomovitz, "Comparación de patrones eléctricos en tensión continua mediante un divisor 10:1," IEEE Lat. Amer. Transactions, vol. 4, No. 3, pp. 12-15, May. 2006.

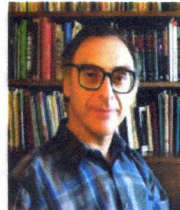
#### BIOGRAFÍAS



**Heriguatí de Souza** nació en Salto, Uruguay en 1955. Recibió el título de Ingeniero Tecnológico en la "Universidad del Trabajo del Uruguay" (UTU) en 2000. En 1978 ingresó en el Laboratorio de UTE como técnico en instrumentación. Al presente, trabaja como especialista en mediciones eléctricas de alta precisión en ese laboratorio. Su área de actuación es mediciones en baja frecuencia, donde ha investigado y desarrollado múltiples técnicas de medida.



**Leonardo Trigo (M'98)** nació en Montevideo, Uruguay, en 1969. Se graduó de Ingeniero Tecnológico en Electrónica, expedido por Instituto Tecnológico Superior en 1993. Desde 1994 se desempeña funciones en el Departamento de Electrotecnia, Subgerencia Laboratorio UTE.



**Daniel Slomovitz (M'86-SM'89)** nació en Montevideo, Uruguay, en 1952. Recibió el título de Ingeniero Eléctrico en 1977 y Doctor en Ingeniería en 2000, en la Universidad de la República, Uruguay. Actúa como Profesor Catedrático en la misma universidad. En 1977, se incorporó al Laboratorio de UTE como Ayudante de Ing., ocupando actualmente el cargo de Jefe del Laboratorio. Ha llevado a cabo investigación en mediciones de baja frecuencia y alto voltaje, habiendo publicado más de 100 trabajos y el libro "Mediciones Eléctricas" del IEEE.



**Alexander M. Klushin** nació en Gorka, USSR, el 29 de enero de 1946. Recibió el título de Dial.-Radio-phys. y Cand. Sci. en física y matemática en Gorky State University en 1969 y 1985, respectivamente. Ingresó en el Institute of Electronic Measurement KVARZ, Nizhny Novgorod, Rusia, en 1969. Desde 1993, se desempeña en el Research Center, Jülich, Alemania. Su tema de investigación actual se relaciona con junturas Josephson de alta temperatura  $T_c$  para aplicaciones en metrología cuántica de voltaje. Es autor de 54 publicaciones y posee seis patentes.