

# FUENTE PATRÓN DE TENSIÓN BASADA EN MÚLTIPLES ZENERS

Daniel Slomovitz, Leonardo Trigo, Heriguatí de Souza

UTE, Montevideo, Uruguay, [d.slomovitz@ute.com.uy](mailto:d.slomovitz@ute.com.uy)

**Resumen:** En este trabajo se describe el estado de desarrollo actual de un patrón de tensión continua de 10 V basado en 140 zeners individuales. La idea es evaluar la conducta de cada zener continuamente, midiendo su valor contra el valor medio del banco. De esta manera, el ruido individual de cada zener puede computarse y puede predecirse su influencia sobre el banco. Un sistema automático tomará decisiones basadas en esa información. Las opciones, para cada zener, son: mantener el zener en el banco sin ningún cambio, sacar el zener, o reasignar un nuevo valor al zener. En los últimos dos casos se calcula un nuevo valor para el voltaje del banco (valor medio de los 140 zeners). Este método mejora la estabilidad y reduce la incertidumbre del banco, y permite extender el tiempo entre calibraciones externas.

**Palabras clave:** Zener, patrón, ruido, algoritmo de predicción, Josephson, desviación de Allan.

## 1. INTRODUCCION

La mayoría de los patrones de tensión comerciales tipo zener están basados en la selección de un único zener muy estable [1]. En algunos casos se usa un número pequeño de zeners, y el voltaje de salida es el valor medio. En todos los casos la única información que la fuente da es el voltaje de salida (además de su temperatura interior). Ninguna información sobre el comportamiento interior está disponible, por lo cual la predicción de su valor futuro se realiza según la conducta pasada de ese único parámetro, medido en calibraciones anteriores. El predictor matemático más común para estos dispositivos es la extrapolación lineal. Cualquier otro cambio se ve como una desviación al azar.

Por el contrario, el dispositivo propuesto se basa en una filosofía diferente. En lugar de usar un único zener seleccionado especialmente, la idea es promediar una cantidad grande de zeners comerciales convencionales, pero observando la conducta de cada uno continuamente. Quizás, el nivel de ruido de promedio es similar que las fuentes basadas en un solo zener especial, pero la diferencia radica en que en la fuente propuesta es posible observar sus partes interiores. Cualquier cambio del voltaje promedio de salida puede compararse contra los cambios de cada zener individual. Si sólo un zener es el principal responsable por ese cambio, éste debe ser 140 veces mayor que el cambio del promedio, lo que es fácilmente detectable. En el otro extremo, cambios pequeños al azar en todos los zeners también pueden producir variaciones del voltaje medio, pero la mayoría de ellos desaparecen al promediar el voltaje de salida en un corto periodo. Solamente ruidos

correlacionados no serán detectados por el sistema. Por ejemplo, si todos los zeners tienen el mismo coeficiente de temperatura, no habrá diferencia de voltaje entre cada zener y el voltaje medio, incluso bajo grandes cambios de temperatura. Una situación similar existe si la mayoría de los zeners tienen la misma deriva en el tiempo.

La meta del sistema propuesto es supervisar la salud de cada zener individual, midiendo su tipo de ruido y controlando que permanezca estable. Muchos trabajos sobre herramientas estadísticas para hacer esto han sido propuestos [2], [3].

Para caracterizar la conducta de fuentes zener, es una práctica común calibrarlas periódicamente contra patrones Josephson. El intervalo de tiempo entre las calibraciones depende de la estabilidad y confianza del dispositivo. Se piensa, con esta propuesta, poder extender estos periodos, lo cual es una gran ventaja por laboratorios que no poseen patrones de efecto cuántico.

## 2. DETALLES DEL CIRCUITO

La Fig. 1 muestra, esquemáticamente, el sistema propuesto. Cada zener de 10 V se conecta a la salida del voltaje promedio ( $V_a$ ) a través de un resistor de  $100 \Omega$  (resistencia  $R_j$ ). También cada voltaje individual ( $V_j$ ) se envía a un escáner para medir la diferencia de voltaje entre él y el voltaje medio de todo el grupo. Como las diferencias de voltaje entre los diodos son más bajas que 3 mV, las corrientes son menores que  $100 \mu A$ . Con este bajo valor, no hay necesidad de usar resistencias de alta precisión. Estabilidades del orden del 0.1% son suficientes, tal como lo muestran las ecuaciones siguientes. El valor promedio  $V_a$  es

$$V_a = \frac{\sum_{i=1}^N V_i}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{R_i}}. \quad (1)$$

Una variación  $\Delta R_j$  en la resistencia  $R_j$  causará un cambio en el voltaje promedio  $\Delta V_a^j$  dado, aproximadamente, por

$$\Delta V_a^j = \frac{V_a - V_j}{N} \frac{\Delta R_j}{R_j}. \quad (2)$$

Como  $|V_a - V_j| < 3 \text{ mV}$ , el valor de  $\Delta V_a^j$  será menor que  $2 \times 10^{-8} \text{ V}$ .

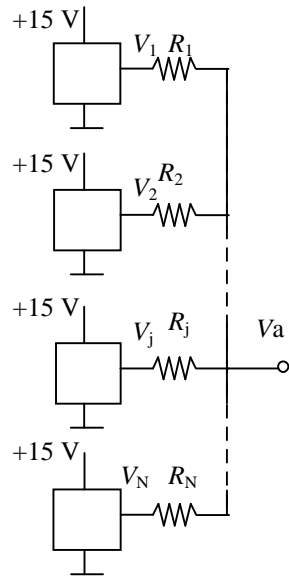


Fig. 1. Circuito esquemático del dispositivo propuesto.

La alimentación es proporcionada a través de cuatro fuentes de 15 V. La incidencia de la estabilidad de estas fuentes en el voltaje promedio es más baja que 1 parte en  $10^8$ .

Con respecto a la influencia de la temperatura ambiente, todos los zeners y los dispositivos electrónicos están dentro de un pequeño horno. El coeficiente de temperatura del valor medio fue determinado en  $1.0 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ . El control mantiene la temperatura en  $44 \text{ }^\circ\text{C}$  con una desviación estándar de  $0.01 \text{ }^\circ\text{C}$ . Por lo tanto, la incertidumbre debida a la variación de temperatura es más baja que 1 parte en  $10^8$ .

Para verificar la estabilidad a través del tiempo sería necesario comparar el banco contra un patrón Josephson en forma continua, pero pruebas preliminares pueden ser hechas comparando una mitad de la fuente (70 diodos) contra la otra.

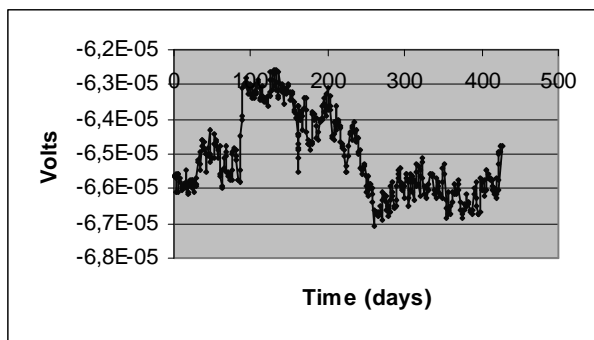


Fig. 2. Conducta del ruido de la fuente.

La diferencia de voltajes entre ambas mitades fue medida continuamente por unos dos años. Estos resultados fueron también verificados al comparar contra otra fuente patrón la cual fue calibrada en el exterior con un sistema Josephson. La Fig. 2 muestra el comportamiento real, sin ninguna compensación por la deriva. Cada punto representa

el valor medio de un día. La deriva para las medidas totales está alrededor de  $0.1 \text{ } (\mu\text{V}/\text{V})/\text{año}$ , y la desviación estándar de todos los puntos es  $0.1 \text{ } \mu\text{V}/\text{V}$ , aunque varía grandemente si se consideran periodo parciales. La Fig. 3 muestra el histograma de los datos. Éstos están expresados en voltios. Claramente se ve que no es una distribución normal.

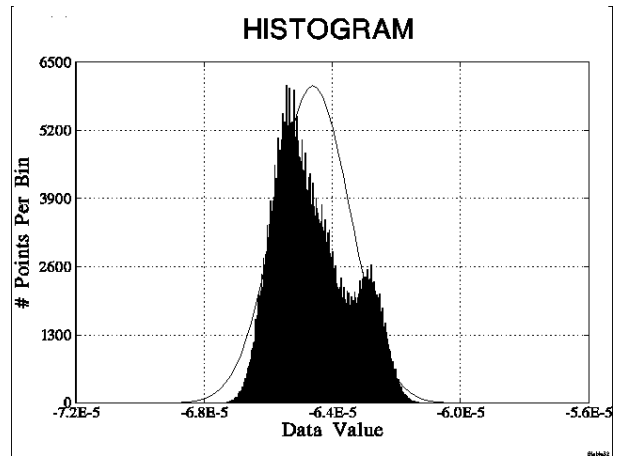


Fig. 3. Histograma de los datos completos.

La desviación de Allan de los datos es  $0.02 \text{ } \mu\text{V}/\text{V}$  [4]. Asumiendo que ambas mitades tienen ruido similar, la desviación normal para la fuente total (140 diodos) es  $0.05 \text{ } \mu\text{V}/\text{V}$ , y la desviación de Allan es  $0.01 \text{ } \mu\text{V}/\text{V}$ .

Estas medidas se realizan continuamente. En estudios anteriores se registraron medidas cada 10 s y analizando el espectro de frecuencias se observó ruido blanco para frecuencias mayores a  $10^{-2} \text{ Hz}$ . Debido que nos interesa la evolución a largo plazo se decidió registrar una medida por minuto para no saturar el sistema de análisis y evaluación del comportamiento de cada zener. Por esta razón en este estudio sólo observamos ruido espectral para frecuencias inferiores a  $10^{-2} \text{ Hz}$ .

La Fig. 4 muestra la evolución del desviación de Allan (voltios) contra el tiempo de promedio (minutos) [5]. Al principio (frecuencia alta, tiempo corto) el ruido blanco domina el comportamiento de la fuente, pero luego de algunos minutos el ruido cambia a tipo  $1/f$ . Después de eso, la desviación de Allan aumenta a medida que el tiempo de promedio crece, pasando a tipo  $f^{-2}$  al promediar tiempos alrededor de algunos meses. A largo plazo, este tipo de ruido domina, en lugar de  $f^{-1}$ , lo que la mayoría de las investigaciones [6] han atribuido a las fuentes basadas en zeners. Sin embargo, los valores del ruido son relativos bajo, alrededor de  $1 \text{ } \mu\text{V}$  en casi dos años. Este valor representa  $0.1 \text{ } \mu\text{V}/\text{V}$ .

La Fig. 5 muestra el horno con el banco de zeners. Posee cuatro promedios independientes (bornes negros abajo) que pueden conectarse en paralelo. Cada uno corresponde al promedio de 35 zeners. En el funcionamiento presente, los conjuntos 1 y 2 se conectan juntos, así como el 3 y el 4. De esta manera, el valor medio de 70 zeners se compara contra la otra mitad. Arriba, cuatro conectores rojos permiten medir las fuentes de alimentación internas. Cada fuente de

alimentación puede medirse externamente así como la temperatura interior del horno.

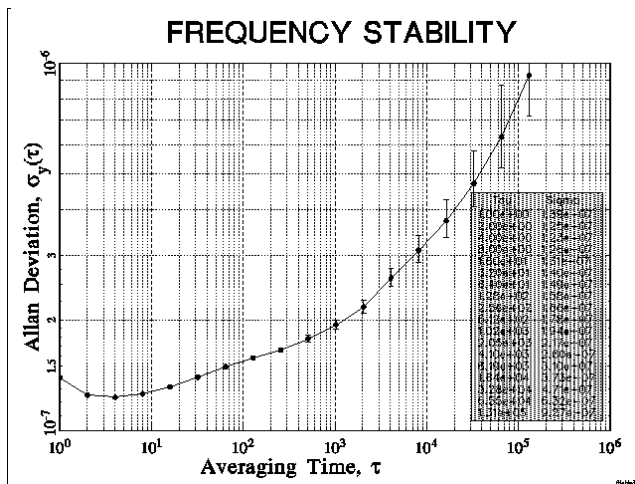


Fig. 4. Variación de la desviación de Allan (voltios) contra el tiempo de promedio (minutos). Ruidos del tipo  $f^{-2}$  dominan la conducta de la fuente a largo plazo.

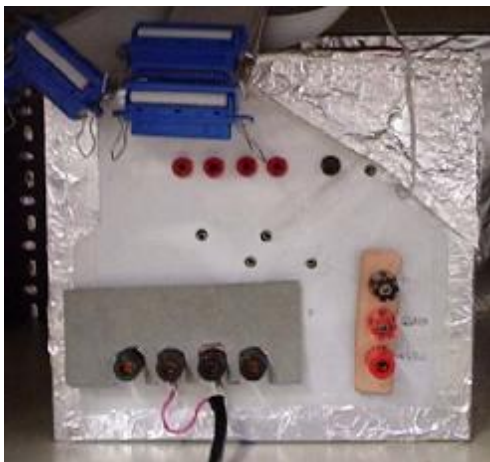


Fig. 5. Horno con el banco zener.

Un sistema convencional de blindajes con guarda y terminal de tierra se muestra al lado derecho.

La conexión de cada salida de los zener se envía al escáner a través de los cables tipo cinta.

### 3. TRABAJO FUTURO

El banco se completará agregando 140 zeners más, alcanzar 280 en total. El sistema automático para medir cada zener individual no está operativo aún. Una vez en funcionamiento, esperamos que la incertidumbre de la predicción se reduzca aún más. Cambios bruscos en el voltaje, como el mostrado en la Fig. 2 el día 90, o cambios grandes en la pendiente (como en el día 270), parecen ser causado por un cambio grande en la conducta de un único o pocos zeners, en lugar de pequeños cambios al azar de todos

los zeners en igual dirección. En tal caso, esos cambios pueden ser descontados en el valor de salida. Esto puede confirmarse, comparando el sistema propuesto por períodos de largo tiempo contra un patrón Josephson.

### 4. CONCLUSIONES

Una fuente patrón de tensión basada en múltiples zeners fue propuesta. La idea principal es observar la conducta del ruido de cada zener continuamente. Aunque este sistema de escáner automático no está todavía en funcionamiento, se han obtenido buenos resultados generales. En casi dos años de funcionamiento no hay ninguna tendencia detectable ( $0.1 \mu\text{V/V/año}$ ), la desviación normal calculada para la fuente total, de todas las medidas, es  $0.05 \mu\text{V/V}$  y la desviación de Allan es  $0.01 \mu\text{V/V}$ . El ruido de largo plazo es de tipo  $f^{-2}$ .

Una vez que el sistema propuesto esté en funcionamiento, una comparación contra un patrón Josephson será necesaria para confirmar la estrategia de predicción del voltaje.

### REFERENCIAS

- [1] FLUKE, "Fractional ppm traceability using your Fluke 734A/732B," *Fluke Application Note*, 1997.
- [2] M. S. Keshner, "1/f Noise," *Proc. IEEE*, vol. 70, No. 3, Mar. 1982.
- [3] T. J. Witt, "Low-Frequency Spectral Analysis of DC Nanovoltmeters and Voltage Reference Standards," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 46, No. 2, pp. 318-321, Apr. 1997.
- [4] D. W. Allan, "Should the classical variance be used as a basic measure in standard metrology?" *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 36, No. 2, pp. 646-654, Jun. 1987.
- [5] Stable 32 Program, Hamilton Technical Services.
- [6] T. J. Witt, D. Reymann, "Using the power spectra and Allan variances to characterize the noise of zener-diode voltage standards," *IEE Proc.-Sci. Meas. Technol.*, vol. 147, No. 4, pp. 177-182, July 2000.