

# PATRONES ELÉCTRICOS EN TENSIÓN CONTINUA. MANTENIMIENTO, MEJORAS Y DESARROLLO

*Heriguatí de Souza, Daniel Slomovitz*

UTE, Montevideo, Uruguay, hdesouza@ute.com.uy

**Resumen:** Para calibrar el nivel de 10 V de fuentes patrones de tensión continua se usan divisores resistivos especiales, autocalibrables, con los cuales poder realizar la transferencia de 1 V (asociado a pilas patrones) a 10 V. En este trabajo se describe las características de uno de estos equipos, el cual fue investigado, construido y desarrollado en el Laboratorio de UTE.

El sistema está basado en un divisor de 10 resistores iguales, en el cual se mide la caída de tensión en cada resistor individualmente, y la caída total. La relación entre el promedio de las caídas individuales y la caída total es, teóricamente, 10:1.

**Palabras clave:** Patrones Nacionales, Mantenimiento de tensión DC, Transferencia de tensión.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los Patrones Nacionales en magnitudes eléctricas en Uruguay, desde 1994, son mantenidos por la Administración Nacional de Usinas y Trasmisiones Eléctricas (UTE), por convenio con el Laboratorio Tecnológico del Uruguay (LATU). El patrón viajero en la magnitud tensión continua está basado en una fuente patrón Zener marca Fluke, modelo 732 B, con salida en dos niveles de tensión: 1V y 10 V [1]. Esta fuente es calibrada en el exterior periódicamente, contra un sistema Josephson, en su salida de 1 V. Sin embargo, la salida en el nivel de 10 V es más estable en el tiempo, por lo cual su valor de tensión es mantenido en este nivel (10V).

Fue necesario, entonces, el desarrollo y construcción de un divisor resistivo el cual se presenta en este trabajo, para transferir los valores desde 10 V a 1V, o de 1 V a 10 V. Luego, el valor de 1 V es transferido y mantido en bancos de pilas patrones.

Tradicionalmente, los patrones secundarios de tensión continua estaban basados en bancos de pilas patrones del tipo WESTON saturadas y no saturadas (1.018 V). La estabilidad en el tiempo de estas pilas es relativamente buena. Bien mantenidas, pueden esperarse variaciones alrededor de 1  $\mu$ V/año. Usualmente se trabaja con bancos de 4 pilas de manera de poder verificar el desvío de cada una de ellas contra el valor promedio. Si bien poseen una alta estabilidad, presentan varios inconvenientes. Deben evitarse consumos, traslados, movimientos bruscos y cambios de temperatura. Vibraciones o movimientos pueden cambiar el

valor hasta varios  $\mu$ V, y en cuanto a la temperatura, ésta debe mantenerse estable en pocas centésimas de grado, ya que el coeficiente térmico está alrededor de 60  $\mu$ V/°C. Corrientes de carga, aún de tan solo 0.1  $\mu$ A, pueden afectar permanentemente la pila. Cualquier variación importante de estos factores hace variar la tensión de la pila, no sólo durante el tiempo en que ellos ocurren, sino que dicha variación se prolonga en el tiempo por semanas e incluso meses.

Estos inconvenientes han llevado al desarrollo de patrones de tensión continua basados en diodos zeners en rangos de 1 V y 10 V [2]. Éstos poseen estabilidades similares a las pilas, sin sus problemas. Puede extraérsele corriente y pueden moverse sin cambios en la tensión de salida. Sin embargo, todavía es necesario mantenerlos permanentemente a temperatura constante.

Para su calibración, se usan equipos basados en efecto Josephson. Éstos mayoritariamente poseen niveles de 1 V.

## 2. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

El divisor 10:1 está compuesto por 10 resistores conectados en serie, siendo posible acceder a cada unión individual. 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

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

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

$$Y = I \sum_{i=1}^{10} R_i \quad (2)$$

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 ½ 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. 1 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 GND). 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.

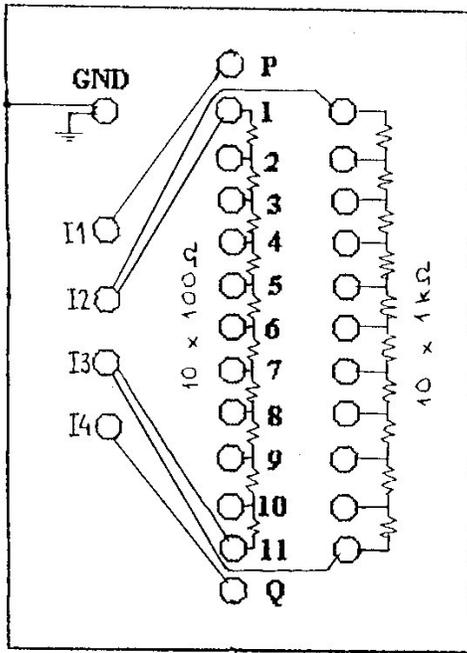


Fig. 1 Esquema eléctrico del divisor.

### 3. PROCEDIMIENTO DE MEDIDA

Se conecta la fuente de 10 V (FLUKE 732B) a la entrada del divisor. La impedancia del mismo (909 Ω) es compatible con la máxima corriente admitida por la fuente (12 mA). Las guardas se conectan de acuerdo a la Fig. 2. Es importante que los cables usados sean los previstos. El cable A debe tener baja resistencia, pues la corriente que se deriva por él es importante y produce significativas caídas de tensión. Se construyó un cable de 6 mm<sup>2</sup> de sección y unos 25 cm de largo. El mismo se atornilla a los bornes de salida de la fuente (10 V) y a la entrada del divisor (bornes I<sub>2</sub> e I<sub>3</sub>). Para el cable C, es posible usar un conductor con bornes banana de uso general dado que sólo conecta los potenciales de guarda. Se usa un cable comercial (Pomona). El cable B debe poseer baja FEM termoeléctrica y tener los terminales necesarios para la conmutación de los resistores. Este cable se diseñó de ese modo (terminales de cobre). Su otro

extremo posee terminales de cobre tipo uña aptos para conectarse al voltímetro.

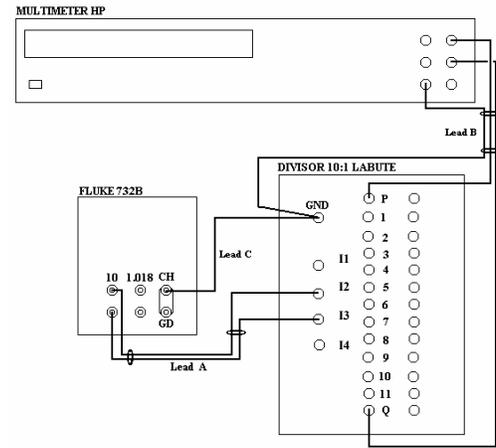


Fig. 2. Conexión de guardas.

Para las medidas directas de las salidas de 10 V y 1.018 V se usa un cable comercial de baja FEM (FLUKE 738716).

El voltímetro se conecta 12 h antes, por precalentamiento, seleccionando las condiciones: DVC, NPLC 200, AZERO ON, NDIG 8, GUARD open. Se promedian 3 lecturas consecutivas en cada medida. Previamente, se realiza el procedimiento de auto calibración en DC. Se espera 1 hora para continuar, para lograr estabilidad en las medidas. A los efectos de reducir la influencia de derivas en los valores de los resistores, en la tensión de la fuente y en el propio voltímetro, se procede en forma ascendente y descendente. Primero, en la escala de 10 V se mide la entrada del divisor (bornes 1 y 11). Seguidamente, en la escala de 1 V se mide la salida de cada resistor (bornes 1-2, 2-3, hasta 10-11), invirtiendo la polaridad en cada medida. Se vuelve a medir la entrada de 10 V y se repite la medición sobre resistores individuales, ahora en sentido inverso (bornes 10-11 hasta 1-2). Finalmente se vuelve a medir la entrada de 10 V. En las medidas de 10 V se usa siempre la misma polarización pues los efectos de offset son despreciables en esta escala.

### 4. CÁLCULOS

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

$$\varepsilon_d = \frac{\frac{Y_1 + Y_2}{2} - \sum_{i=1}^{10} Z_i}{\sum_{i=1}^{10} Z_i} \quad (3)$$

$$\varepsilon_u = \frac{\frac{Y_2 + Y_3}{2} - \sum_{i=1}^{20} Z_i}{\sum_{i=1}^{20} Z_i} \quad (4)$$

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  $\varepsilon_i$  corresponden a los errores. El error promedio  $\varepsilon$  vale

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_d + \varepsilon_u}{2} \quad (5)$$

Esto es, un valor de  $\varepsilon$  positivo indica que la lectura de 10 V del voltímetro es mayor a 10 veces la lectura de 1 V.

Una vez calibrada la relación 10:1 del voltímetro se procede a medir la tensión en vacío de la fuente de 10 V y las tensiones de fuentes o pilas patrones de 1.018 V. Se asume que el error hallado para la relación 10:1 es el mismo que para la relación 10:1.018. Para estas últimas mediciones, se desconecta el cable A y se conecta un cable comercial de baja FEM a los bornes I1 e I4. Sucesivamente, los otros terminales se conectan a la salida de 10 V y la de 1.018 V de la fuente FLUKE. El cable B se conecta a los bornes P y Q, los cuales están directamente conectados a los bornes I1 e I4, respectivamente. De esta forma queda calibrada la salida de 1.018 V respecto a la de 10 V. Esta salida se intercompara con bancos de pilas patrones, transfiriendo la calibración a las pilas.

## 5. FUENTES DE INCERTIDUMBRE

### 5.1 TIPO B

- **FEMs termoeléctricas.** Se determinaron conectando todos los cables y el propio divisor según el circuito de la Fig. 2, sin tensión a la entrada. Los cables de entrada se conectaron a los bornes 10V COM y GUARD de la fuente, estando éstos unidos con una barra de cobre. Se midió la tensión registrada para cada salida usada durante el ensayo (bornes 1-2 a 10-11), promediando lecturas del voltímetro con polaridad opuesta. El valor promedio medido (en la escala de 1 V) fue de 0.03  $\mu$ V. Esto corresponde a 0.03  $\mu$ V/V en medidas de 1 V. Los valores fueron menores a 0.01  $\mu$ V/V en medidas de 10 V.

- **Impedancia de entrada del voltímetro.** De acuerdo al manual del fabricante, la impedancia de entrada es mayor a 10 G $\Omega$ , lo cual comparado con la impedancia del divisor (100  $\Omega$  máxima al medir la salida de 1 V) afecta en menos de 0.01  $\mu$ V/V. Adicionalmente, se realizó una medida real de dicha impedancia de entrada con el cable B incluido. Las escalas usadas fueron 10 V y 1 V, en cada caso con la tensión nominal aplicada. Los resultados fueron:

Escala 10 V: 500 G $\Omega$

Escala 1V: 77 G $\Omega$

Estos valores muestran que incluso la medida directa de la salida de 1.018 V de la fuente Fluke cuya impedancia es de 1000  $\Omega$ , introduce un error menor a 0.02  $\mu$ V/V.

- **Estabilidad de las lecturas de 1 V y 10 V.** La estabilidad en cada lectura afecta el resultado de la medida. La parte aleatoria se toma en cuenta al calcular la incertidumbre tipo A de toda la medición. Para evaluar el efecto de las derivas en la estabilidad del sistema, se procedió a medir las variaciones en las lecturas con el sistema conectado en igual forma que durante el ensayo. La deriva es menor a  $1 \times 10^{-7}$   $\mu$ V/V en todos los casos.

- **Resolución de las lecturas.** En ambas escalas la incertidumbre debida a la resolución de lecturas es  $10^{-8}$ .

- **Tensiones de offset.** Se encontró que el voltímetro presenta tensiones de offset del orden de 0.5  $\mu$ V en las escalas de 1 V y 10 V. Sin embargo, su desvío estándar en el tiempo que toma el ensayo es inferior a  $3 \times 10^{-8}$ . Esta fuente de incertidumbre representa unas 0.03 ppm en las medidas de 1 V. A nivel de 10 V es despreciable.

- **Cable de conexión.** La resistencia del cable que conecta la fuente de 10 V con el divisor es de 2 m $\Omega$ . La caída de tensión vale, por lo tanto, 20  $\mu$ V aproximadamente. El cobre varía su resistividad con la temperatura en  $0.4\%K^{-1}$ ; por lo cual la caída de tensión en el cable variará  $8 \times 10^{-8} VK^{-1}$ . Dado que la temperatura ambiente está controlada en  $\pm 1$  K, la incertidumbre agregada por este factor estará en  $9 \times 10^{-9}$ .

La Tabla I muestra los factores contribuyentes a la incertidumbre tipo B.

### 5.2 TIPO A

Cada medida se determina a partir de 3 mediciones individuales realizadas en días consecutivos. En ensayos realizados se estimó las incertidumbres tipo A en  $1.8 \times 10^{-8}$ .

### 5.3 INCERTIDUMBRE COMBINADA

La combinación de los tipos A y B resulta en un total de  $4.8 \times 10^{-8}$ . Con un factor de cobertura de  $k=2$ , la incertidumbre total estimada es de  $1.0 \times 10^{-7}$ .

Tabla I. Incertidumbre tipo B

FUENTE	DISTRIBUCIÓN	CONTRIBUCIÓN (x10 <sup>-8</sup> )
FEM termoelec.	Normal	3
Impedancia de entrada	Rectangular	0.6
Resolución	Rectangular	0.6
Tensión de offset	Normal	3
Cable	Rectangular	0.05
<b>Total tipo B</b>		<b>4.3</b>

## 6. CONCLUSIONES

Se describió la construcción de un divisor resistivo patron, de relación 10:1, para transferir tensiones de fuentes patrones entre los niveles de 10 V y 1 V, con incertidumbres en el orden de  $1.0 \times 10^{-7}$ . Adicionalmente, el resistor es útil como calibrador de la linealidad de multímetros de muy alta precisión, lo cual justifica ampliamente su utilidad y desarrollo. Con posteriores calibraciones con laboratorios del exterior, se comprobó que los valores calculados previamente para las incertidumbres fueron correctos.

## 7. REFERENCIAS

- [1] FLUKE, "Fractional ppm traceability using your Fluke 734A/732B," *Fluke Application Note*, 1997.
- [2] D. Slomovitz, L. Trigo, H. de Souza, "Fuente patrón de tensión basada en múltiples zeners," IEEE 6to ENCUENTRO DE POTENCIA, INSTRUMENTACIÓN Y MEDIDAS, EPIM2005, Montevideo, Uruguay, Nov. 2005.

## 8. 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 desarrollado múltiples técnicas de medida.



**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 Ingeniero, 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 80 trabajos y el libro "Mediciones Eléctricas" del IEEE.