

Comparación de Patrones Eléctricos en Tensión Continua Mediante un Divisor 10:1

Heriguatí de Souza, Daniel Slomovitz, *Senior Member, IEEE*

Resumen- En este trabajo se presenta un divisor resistivo auto-calibrable para relacionar los niveles de 1 V y 10 V de fuentes patrones de tensión continua (pilas patrones, fuentes Zener, sistemas Josephson). El sistema está basado en un divisor formado por 10 resistores iguales, en el cual se mide la caída de tensión en cada resistor individualmente, y la caída total. La relación entre la caída total y el promedio de las caídas individuales es, teóricamente, 10:1. Este sistema de medida sólo requiere del propio divisor y de un multímetro de 8½ dígitos, como elementos auxiliares. La incertidumbre obtenida en mediciones usando este divisor está en el orden de 1×10^{-7} .

Palabras clave- Divisor resistivo, Josephson, Zener, pila patrón.

I. INTRODUCCIÓN

A mayoría de los patrones de tensión continua están basados en pilas patrones, fuentes Zener, o sistemas de efecto Josephson. Los niveles de tensión de sus salidas son de 1 V o 10 V, aunque las fuentes Zener poseen, por lo general, ambas salidas [1]. Es necesario, entonces, el uso de divisores de tensión de relación 10:1 para poder comparar estos patrones entre sí. Varios trabajos han sido propuestos sobre el tema. Algunos usan resistores del tipo Hamon [2], mientras que otros usan cadenas de resistores de igual valor [3]-[4]. Todos ellos comparan la fuente a medir contra una fuente patrón en un sistema de puente, el cual requiere también una o más fuentes adicionales altamente estables. Si bien se logra de esta forma resultados de alta exactitud, los sistemas son relativamente complejos, usando gran número de equipos auxiliares.

Como alternativa, se presenta en este trabajo un sistema de comparación 10:1 que sólo requiere un divisor y un multímetro auxiliar, como elementos adicionales a la fuente bajo ensayo.

II. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

El divisor 10:1 propuesto está compuesto por 10 resistores de muy alta estabilidad, conectados en serie, siendo posible acceder a cada nodo individual. Si R_i son los valores de las resistencias individuales, el promedio Z de todas las caídas de tensión (producidas por la circulación de una corriente I) vale

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

Por otro lado, la suma de las caídas vale

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

Entonces, la relación Y/Z vale 10, exactamente. En esto se basa el principio del divisor. Para la medición de las tensiones sobre cada resistor y sobre el total de la serie 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 elemento que afecta esta medición es su estabilidad. Es más, el propio procedimiento calibra al voltímetro en lo concerniente a la relación 10:1, en las escalas usadas.

A los efectos de evitar errores provocados por corrientes de fuga, el equipo posee un divisor de guarda, en paralelo con el divisor principal, como lo muestra la Fig. 1 (divisor de la derecha). Una sencilla prueba permite determinar la influencia de la conexión de guarda. Durante el comienzo de la medición se cambia la guarda desde el divisor auxiliar al punto de referencia (GND) y se observa la variación en el instrumento. Esta variación cuantifica la influencia de las corrientes parásitas. Realizando esta prueba en el resistor central de la serie y en ambos extremos, es suficiente para determinar la influencia de corrientes parásitas en todos los puntos.

H. de Souza trabaja en UTE, Laboratorio, Montevideo, Uruguay, (e-mail: hdesouza@ute.com.uy).

D. Slomovitz trabaja en UTE, Laboratorio, Montevideo, Uruguay, (e-mail: d.slomovitz@ieee.org).

Se define la relación 1:10 a partir de las determinaciones anteriores, y el error relativo del voltímetro ε queda determinado por

$$\varepsilon = \frac{Y - \sum_{i=1}^{10} Z_i}{\sum_{i=1}^{10} Z_i}, \quad (3)$$

siendo Z_i la caída de tensión en el resistor R_i . Esto es, un valor de ε positivo indica que el voltímetro en el rango de 10 V, midiendo esa tensión, posee un error porcentual mayor que el correspondiente al rango de 1 V.

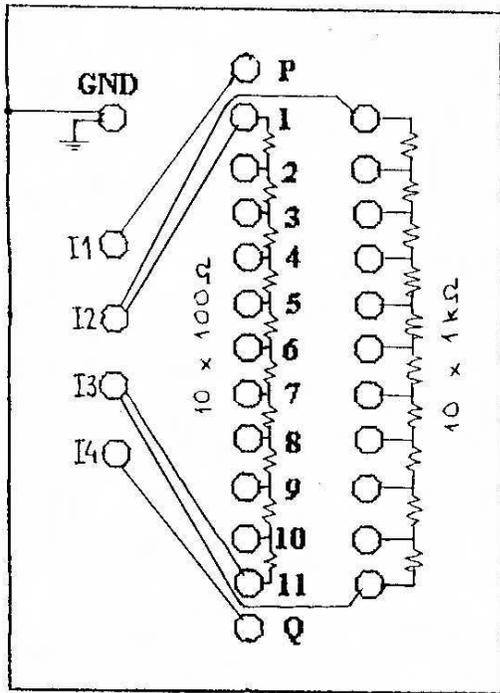


Fig. 1 Esquema eléctrico del divisor.

La Fig. 2 muestra la conexión de todos los instrumentos. La fuente de 10 V (FLUKE 732B) a la entrada del divisor es compatible con la máxima corriente de circulación (12 mA). En esta figura la guarda del voltímetro (HP 3458A) está conecta directamente a tierra en el supuesto que no existen corrientes de fuga significativas.

El cable A debe tener baja resistencia, pues la corriente que se deriva por él es importante y produce una caída de tensión significativa, pudiendo afectar la estabilidad de la medida. De todas formas, el valor de esa caída no influye en el resultado final, tal como se verá más adelante.

Para el cable C, es posible usar un conductor con bornes banana de uso general dado que sólo conecta los potenciales de guarda. Por el contrario, 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 con terminales de cobre.

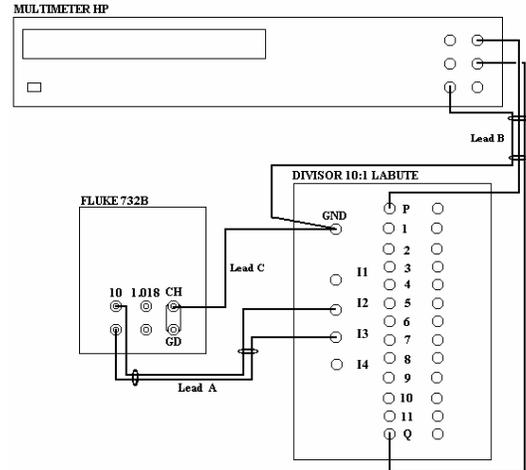


Fig. 2. Conexión del divisor a los instrumentos.

Es necesario estabilizar el sistema durante una hora, previo al comienzo de las mediciones, para uniformizar la temperatura en todos los componentes. A los efectos de reducir la influencia de derivas de los valores de los resistores, de la tensión de la fuente y del propio voltímetro, las mediciones de tensión se realizan 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 para descontar tensiones de offset y FEMs termoeléctricas. Se vuelve a medir la entrada de 10 V y se repite la medición sobre los resistores individuales, ahora en sentido inverso (bornes 10-11 hasta 1-2). Finalmente se vuelve a medir la entrada de 10 V. Promediando todas las mediciones se eliminan todas las tensiones termoeléctricas y también las derivas lineales del divisor y de cualquiera de los instrumentos usados.

Una vez calibrada la relación 10:1 del voltímetro se procede a medir directamente las tensiones en vacío de las salidas de 10 V y de 1 V por separado. Para estas últimas mediciones se conecta el cable A a los bornes 11 e 14, y el voltímetro a los bornes P y Q. De esta forma, se anula la corriente de salida de la fuente y se eliminan errores provenientes de las caídas de tensión en las impedancias internas de la fuente y los cables de conexión.

III. FUENTES DE INCERTIDUMBRE

Distintas fuentes de errores e incertidumbres afectan al sistema. En lo que sigue se analizan las principales.

A. FEMs termoeléctricas.

Cada unión o contacto de materiales diferentes produce tensiones que dependen de la temperatura. Si todo el sistema

está a la misma temperatura, estas FEMs se cancelan, pero basta pequeñas diferencias (del orden de décimas de grado Celsius) para que los errores introducidos sean apreciables. Estas FEMs se determinaron conectando todos los cables y el propio divisor según el circuito de la Fig. 2, sin tensión a la entrada. 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 $0.03 \mu\text{V}$. Esto corresponde a $0.03 \mu\text{V/V}$ en medidas de 1 V. Los valores fueron menores a $0.01 \mu\text{V/V}$ en medidas de 10 V. Por tanto, la incertidumbre en los resultados causada por este efecto es de 3×10^{-8} .

B. Impedancia de entrada del voltímetro.

De acuerdo al manual del fabricante, la impedancia de entrada es mayor a $10 \text{ G}\Omega$, lo cual comparado con la impedancia del divisor (100Ω máxima al medir la salida de 1 V) afecta en menos de $0.01 \mu\text{V/V}$. 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 de $500 \text{ G}\Omega$ en la escala de 10 V y de $77 \text{ G}\Omega$ en la escala de 1 V. Estos valores muestran que incluso la medida directa de la salida de 1.018 V de la fuente Fluke cuya impedancia es de 1000Ω , introduce un error menor a 2.1×10^{-8} .

C. Resolución de las lecturas.

En ambas escalas la incertidumbre debida a la resolución de lecturas es 1×10^{-8} .

D. Tensión de offset del voltímetro.

Se encontró que el voltímetro presenta tensiones de offset del orden de $0.5 \mu\text{V}$. Sin embargo, su desvío estándar en el tiempo que toma el ensayo es inferior a 3×10^{-8} en la escala de 1 V. A nivel de 10 V, es despreciable.

E. Cables de conexión.

El único conductor con caída de tensión apreciable es el indicado A en la Fig. 2, que conecta la fuente de 10 V con el divisor. Su resistencia es de $2 \text{ m}\Omega$. La caída de tensión vale, por lo tanto, $20 \mu\text{V}$ aproximadamente. Dicha caída no afecta la medición, tal como se analizó en el párrafo II. Sin embargo, su resistencia debe permanecer constante durante todo el ensayo. El cobre varía su resistividad con la temperatura en 0.004 K^{-1} ; por lo cual la caída de tensión en el cable variará $8 \times 10^{-8} \text{ VK}^{-1}$. Dado que la temperatura ambiente está controlada en $\pm 1 \text{ K}$, la incertidumbre agregada por este factor estará en 9×10^{-9} .

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

G. Incertidumbres tipo A

La estabilidad en cada lectura afecta el resultado de la medida en forma aleatoria. Cada medida se determina a partir de 3 mediciones individuales realizadas en días consecutivos. De ensayos realizados se estimó la incertidumbre tipo A en 1.8×10^{-8} .

TABLA I
Incertidumbre tipo B

FUENTE	DISTRIBUCIÓN	CONTRIBUCIÓN ($\times 10^{-8}$)
FEM termoelectrónica.	Normal	3
Impedancia de entrada.	Rectangular	2.1
Resolución	Rectangular	0.6
Tensión de offset.	Normal	3
Cables	Rectangular	0.5
Total tipo B		4.8

H. Incertidumbre combinada.

La combinación de los tipos A y B resulta en un total de 5.1×10^{-8} . Con un factor de cobertura de $k=2$, la incertidumbre total estimada es de 1.0×10^{-7} .

III. CONCLUSIONES

Se describió la construcción de un divisor resistivo patrón, de relación 10:1, para transferir tensiones de fuentes de tensión patrones entre los niveles de 10 V y 1 V, con incertidumbres en el orden de 1.0×10^{-7} . Adicionalmente, el divisor es útil para calibrar la linealidad de multímetros de muy alta precisión.

IV. REFERENCIAS

- [1] FLUKE, "Fractional ppm traceability using your Fluke 734A/732B," *Fluke Application Note*, 1997.
- [2] L.C.A Henderson, A. Hartland, J.M. Williams, "Measurements of 10 V standards using a 1 V Josephson array," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 42, No. 2, pp. 577-579, Apr. 1993.
- [3] Y. Sakamoto, T. Endo, T. Sakuraba, "A 10 V calibrating system using an automated voltage divider and a 1 V Josephson array," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 42, No. 2, pp. 583-587, Apr. 1993.
- [4] Kyu-Tae Kim; Kwon Soo Han; Y. Sukamoto, T. Sakuraba, "Comparison of Zener voltage standard calibrations at 10 V between the KRIS and the ETL," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 46, No. 2, pp. 314-317, Apr. 1997.