

# DESARROLLO DE UN DIVISOR RESISTIVO PARA CALIBRACIÓN DE VÓLTMETROS Y NANOVÓLTMETROS EN LOS INTERVALOS DE mV

David Avilés, Dionisio Hernández, Enrique Navarrete  
Centro Nacional de Metrología, División de Mediciones Electromagnéticas  
Carretera a Los Cués km 4.5, El Marqués, Qro. 76241 México  
Tel: (442)2110541, e-mail: [caviles@cenam.mx](mailto:caviles@cenam.mx)

**Resumen:** En este trabajo se describe el diseño, construcción y calibración de un Divisor Resistivo diseñado para proveer tensiones de salida en el intervalo de mV de alta estabilidad, bajo ruido y bajas fems térmicas a ser utilizado en la calibración de vóltmetros y nanovóltmetros.

## OBJETIVO DE ESTE TRABAJO

Informar a los usuarios de los servicios de calibración del CENAM sobre los esfuerzos y avances hechos para ampliar las capacidades de calibración de la División de Mediciones Electromagnéticas en tensión eléctrica continua en el intervalo de mV.

Mostrar las consideraciones y cuidados en el diseño y construcción de un Divisor Resistivo para bajos valores de tensión.

Ilustrar los cuidados que hay que tener para evitar errores en la medición y calibración de bajos niveles de tensión eléctrica continua.

## AREA DE ESPECIALIDAD

Metrología eléctrica, tensión eléctrica continua.

## INTRODUCCION

Existe la necesidad de hacer mediciones y calibraciones de tensión eléctrica continua de bajo nivel en áreas como: Termopares, transferencia CA/CC y calibración de sensores de diversas magnitudes como potencia en alta frecuencia, presión, PH-metros, etc.

Los modelos mas recientes de vóltmetros y nanovóltmetros en sus escalas de mV tienen especificaciones de incertidumbre a un año de algunos  $\mu\text{V/V}$ , para su calibración se requiere desarrollar sistemas de medición y calibración con incertidumbres de algunos nV.

## DISEÑO DEL DIVISOR

La figura 1 muestra el circuito eléctrico del Divisor resistivo. La idea es alimentar el Divisor con una referencia Zener a nivel de 10 V y tener relaciones de tensión de aproximadamente 100:1, 1000:1 y 10 000:1 para contar con salidas de 100 mV, 10 mV y 1 mV. La alta estabilidad de la tensión de salida de la

referencia Zener, su bajo nivel de ruido, su baja resistencia de salida  $\leq 1 \text{ m}\Omega$  y su capacidad de suministrar corrientes de hasta 12 mA la hacen muy adecuada para la aplicación.

Los Resistores del Divisor son resistores marca Vishay de 100  $\Omega$ , 1 k  $\Omega$  y 10 k $\Omega$  y resistores hechos de alambre de manganina de 10  $\Omega$  y 1,1  $\Omega$ . Los resistores Vishay tienen coeficientes de temperatura menores a 1  $\mu\Omega/\Omega / ^\circ\text{C}$  y los de manganina coeficientes de temperatura del orden de 20  $\mu\Omega/\Omega/^\circ\text{C}$  a 23  $^\circ\text{C}$ , aunque estos valores pueden variar mucho dependiendo de la calidad del alambre de manganina utilizado. Debido al relativamente alto coeficiente de temperatura de la manganina para esta aplicación fue necesario diseñar un horno a temperatura controlada para alojar al Divisor.

Otra consideración importante de diseño fue que la potencia disipada en los resistores fuera mínima para evitar el autocalentamiento de los mismos. De acuerdo a los valores seleccionados el resistor que disipa la mayor potencia es el de 10 k $\Omega$  que disipa una potencia de 8,1 mW por lo que el efecto de calentamiento se puede considerar despreciable.

Otra consideración importante de diseño es el ruido a la salida del Divisor, el cual está relacionado con el ruido de la referencia Zener y con el valor del resistor. El ruido pico a pico de la referencia Zener es del orden de 100 nV, en la salida de 100 mV que tiene una relación de tensiones de 100:1 por lo que el ruido pico a pico esperado sería de 1 nV (0,01  $\mu\text{V/V}$ ), el valor relativo del ruido pico a pico es el mismo en las otras dos salidas del Divisor.

Otra fuente de ruido es el ruido térmico (ruido Johnson) en los resistores que forman el Divisor. El valor RMS de este ruido puede ser calculado a partir de la siguiente ecuación:

$$V_{RMS} = \sqrt{4k_BTRB}$$

Donde:

$k_B$  (constante de Boltzmann) =  $1,38 \times 10^{-23}$  J/K)

T - Temperatura en K

R – Valor del Resistor en  $\Omega$

B – Ancho de banda en Hz

Para la salida de 100 mV con T = 303 K (temperatura del horno), B = 10 Hz y R = 111,1  $\Omega$ ;  $V_{RMS} = 4,3$  nV = 0,043  $\mu$ V/V.

Para la salida de 10 mV con T = 303 K (temperatura del horno), B = 10 Hz y R = 11,1  $\Omega$   $V_{RMS} = 1,4$  nV = 0,14  $\mu$ V/V

Para la salida de 1 mV con T = 303 K (temperatura del horno), B = 10 Hz y R = 1,1  $\Omega$   $V_{RMS} = 0,4$  nV = 0,4  $\mu$ V/V

A estos niveles de tensión las fems térmicas pueden producir errores importantes en las mediciones. Para reducir los errores por las fems térmicas hay varios aspectos a considerar:

a) Se usaron cables de cobre con conexiones limpias.

b) Con la finalidad de estabilizar las fems térmicas, las uniones de metales diferentes, por ejemplo manganina-cobre, éstas se anclaron térmicamente al bloque central introduciendo las uniones en perforaciones llenas de grasa de silicón hechas en el bloque de central.

c) Los cables de conexión de la salida del patrón Josephson están sujetos a un gradiente de temperatura de 296°C (un extremo del cable está inmerso en Helio líquido y el otro a temperatura ambiente). Los cables de conexión de las salidas del Divisor están sujetos a un gradiente de temperatura de alrededor de 7°C (Un extremo está a la temperatura del horno que es de 30°C y el otro extremo está a la temperatura del laboratorio que es de 23°C). Para estabilizar las fems térmicas generadas en estos cables las salidas del Patrón Josephson y del Divisor las conexiones se anclan térmicamente en un bloque de cobre por medio de tornillos de nylon y rondanas de Oxido de Berilio como muestra la figura 2.

d) Para eliminar las fems térmicas generadas en el circuito de medición se utiliza la técnica de medición serie-oposición con inversión de polaridad que se explica mas adelante.

Para eliminar ruido eléctrico proveniente de la línea de alimentación. Durante las mediciones el Zener y el control de temperatura se operan con baterías.

## EL SISTEMA DE CONTROL DE TEMPERATURA

Para mantener la temperatura de los resistores del Divisor estables, éstos se alojaron en un bloque cilíndrico de cobre el cual se cubrió con material aislante térmico y se colocó dentro de un “dewar” de acero inoxidable, el “dewar” se cubrió con material aislante y se colocó dentro de un cilindro de Bronce.

En el cilindro de cobre central se colocaron los resistores del Divisor, el calefactor, el sensor de temperatura (RTD), y los resistores del puente de control de temperatura como muestra la figura 3.

El circuito de control de temperatura se muestra en la figura 4, está formado por un puente resistivo integrado con resistores de bajo coeficiente térmico (marca Vishay) y el sensor de temperatura (RTD), las salidas del puente se conectan a amplificadores operacionales en una configuración que asegura una alta impedancia de entrada y una baja impedancia de salida con un filtro pasa bajas y una ganancia cercana a uno, posteriormente se conecta un amplificador diferencial con ganancia de 10 y finalmente se conecta una etapa de potencia integrada por dos transistores en configuración Darlington para suministrar corriente al calefactor. Con el horno y el control de temperatura descritos se logró tener un control de temperatura de 30°C +/- 0.01°C.

## CALIBRACIÓN DEL DIVISOR

Se calibraron las relaciones de tensión del Divisor es decir  $REL = V_{sal}/V_{ent}$

Donde:

REL - Relación del Divisor

$V_{sal}$  - tensión de salida ( 100 mV, 10 mV y 1 mV)

$V_{ent}$  - Tensión de entrada (10 V)

La tensión de entrada se midió por medio de un voltmetro Agilent 3458A calibrado contra el patrón de tensión eléctrica basado en el efecto Josephson.

La tensión de salida se midió por el método de serie-oposición directamente contra el patrón de tensión eléctrica continua basado en el efecto Josephson. El sistema utilizado para medición las salidas del Divisor se muestra en la figura 5. Como detector de nulos se utilizó un nanovóltmetro Agilent 34420. Este método ofrece una muy buena exactitud siempre y cuando el nulo sea muy pequeño. Debido a que a 75 GHz la tensión del patrón de efecto Josephson genera valores de tensión discretos separados por aproximadamente 155  $\mu$ V, para ajustar el nulo a una tensión muy baja (< 1  $\mu$  V), fue necesario alimentar el Divisor con una tensión ajustable entre 10 V y 15 V proveniente de un amplificador Operacional de

ganancia variable. El amplificador operacional fue alimentado con baterías para evitar ruido en las mediciones proveniente de la línea de alimentación y para poder hacer mediciones flotadas.

En la medición de la tensión de salida del Divisor fue necesario tener especial cuidado en las fems térmicas; una generada a la salida de patrón de efecto Josephson cuyos cables tienen un gradiente de temperatura de aproximadamente 296 °C; otra generada en los cables de salida del Divisor resistivo con un gradiente de temperatura de 7 °C.

Para cancelar las fems térmicas descritas así como el "offset" del multímetro se utilizó el método serie oposición con cambios de polaridad mostrado en la figura 7. La primera medición se hace en polaridad positiva. En la segunda medición se invierte la polaridad del Patrón Josephson y la polaridad de la salida del Divisor invirtiendo la polaridad de la tensión de alimentación usando un interruptor de bajas fems térmicas. El valor de la diferencia entre la tensión Josephson y la tensión de salida del Divisor se obtiene restando la primera y la segunda medición y dividiéndolas entre dos. Es necesario que no pase mucho tiempo entre la primera y la segunda medición para que no haya cambio significativo en las fems térmicas.

## RESULTADOS

La figura 6 muestra una fotografía del Divisor Resistivo, el controlador de temperatura, La referencia Zener que alimenta al Divisor, el termómetro que indica la temperatura interna del Divisor y el nanovóltmetro usado en las calibraciones.

Las mediciones de las tensiones de salida del Divisor con sus respectivas incertidumbres se muestran en la tabla 1.

Tensiones de salida nominales	Relación de tensiones $V_{sal}/V_{ent}$ medidas	
100 mV	100, 21965 : 1	+/- 0,6 $\mu$ V/V
10 mV	1 022, 097 : 1	+/- 2,0 $\mu$ V/V
1 mV	9 961,16 : 1	+/- 34 $\mu$ V/V

**Tabla 1.- Tensiones de salida nominales y relaciones de tensión medidas del Divisor.**

## CONCLUSIONES

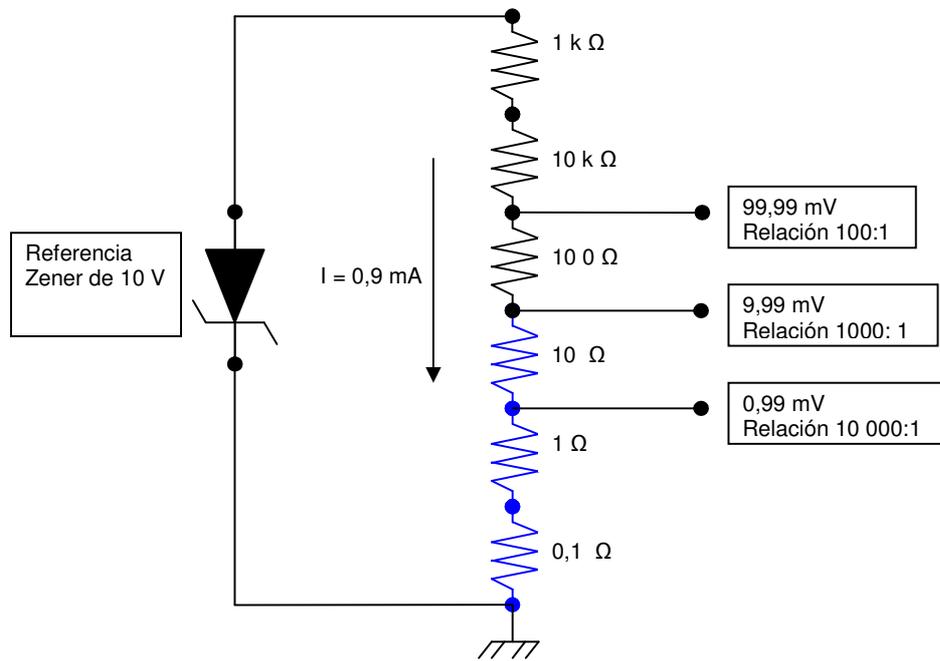
Se construyó un Divisor resistivo con relaciones de 100:1, 1000:1 y 10 000:1 para el servicio de calibración de tensión eléctrica continua en los niveles de mV. El Divisor se alojó dentro de un horno a temperatura controlada a 30 °C +/- 0,01 °C.

La principal fuente de incertidumbres en la calibración del Divisor para la salida de 1 mV es el ruido del detector de nulos. La relación de incertidumbres entre la incertidumbre de calibración del Divisor y la incertidumbre especificada por el fabricante a un año del nanovóltmetro Agilent 34420 es de 1:2, para mejorar la relación de incertidumbres es necesario hacer la calibración de la salida de 1 mV con un detector con menor nivel de ruido.

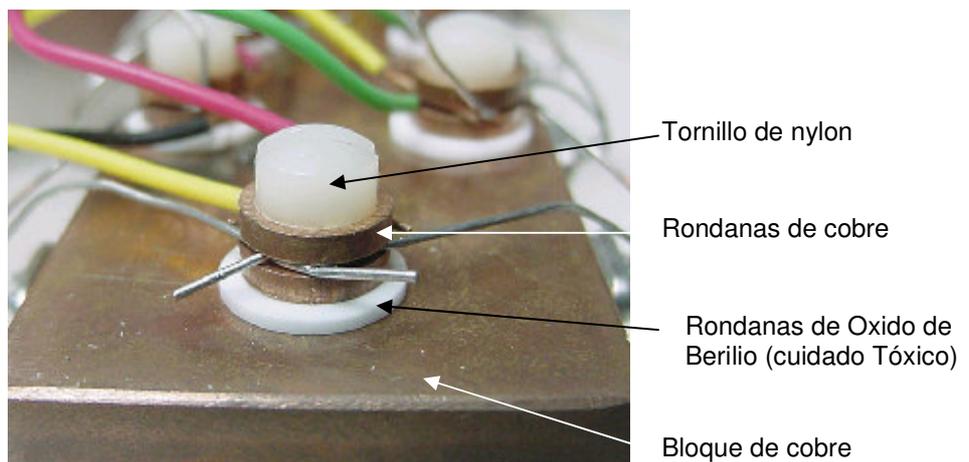
Se está trabajando en el estudio de la estabilidad del Divisor Resistivo. Se hará la calibración del Divisor a niveles de tensión de entrada diferentes de 10 V para ampliar las posibilidades del servicio de calibración a puntos diferentes de los originalmente propuestos.

## AGRADECIMIENTOS

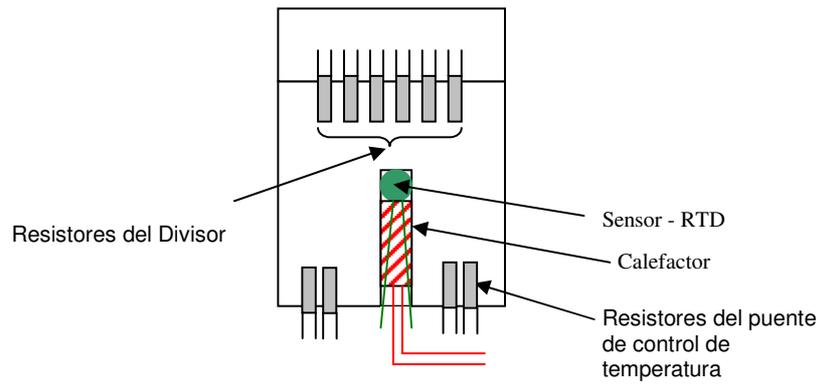
Se agradece el apoyo del M. en C. Jorge Blancas en el diseño del controlador de temperatura del horno. Se agradece el apoyo de Laboratorio de Fabricación del CENAM. Se agradece el apoyo del estudiante Antonio Flores O.



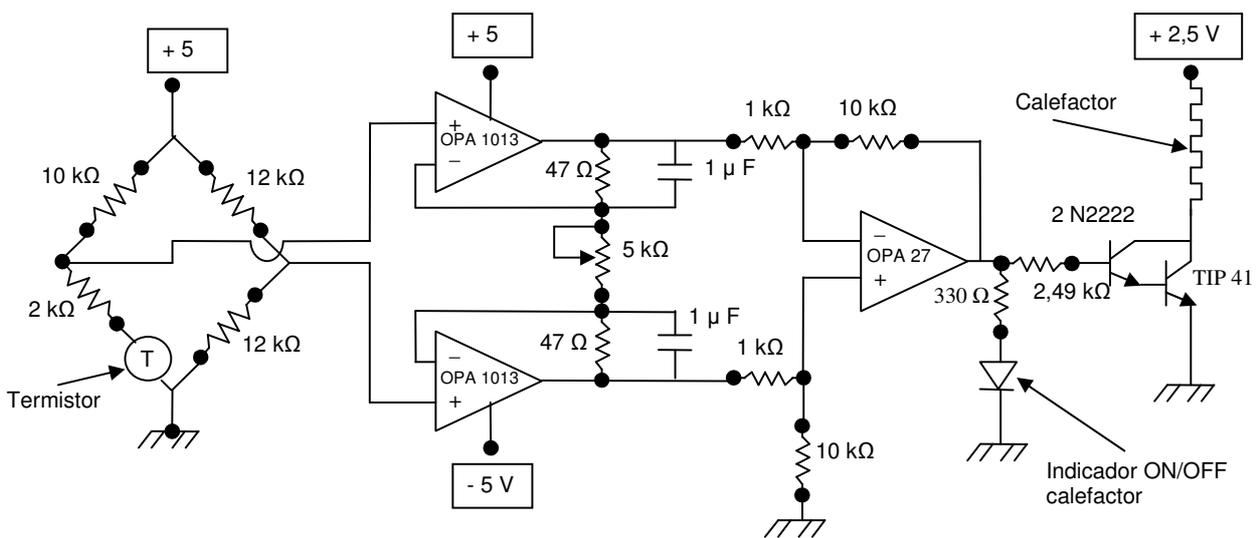
**Figura 1.- Circuito Eléctrico del Divisor Resistivo**



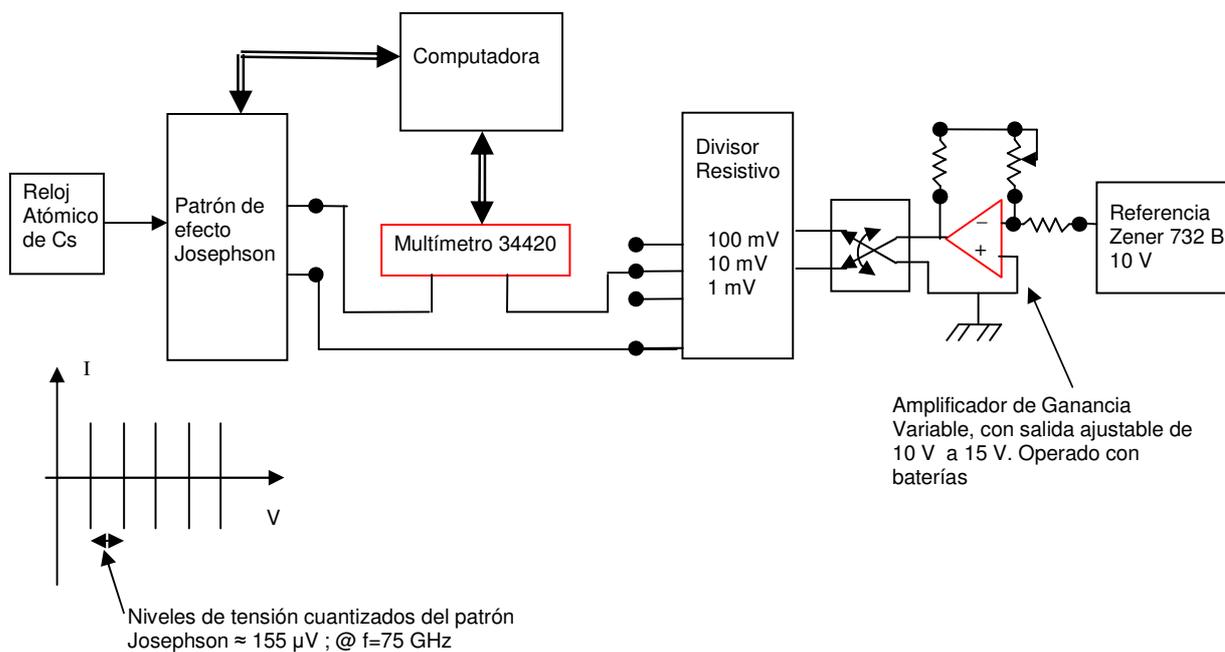
**Figura 2.- Bloque de cobre para conexiones de baías fens térmicas**



**Figura 3.- Detalle del Bloque Metálico Central**



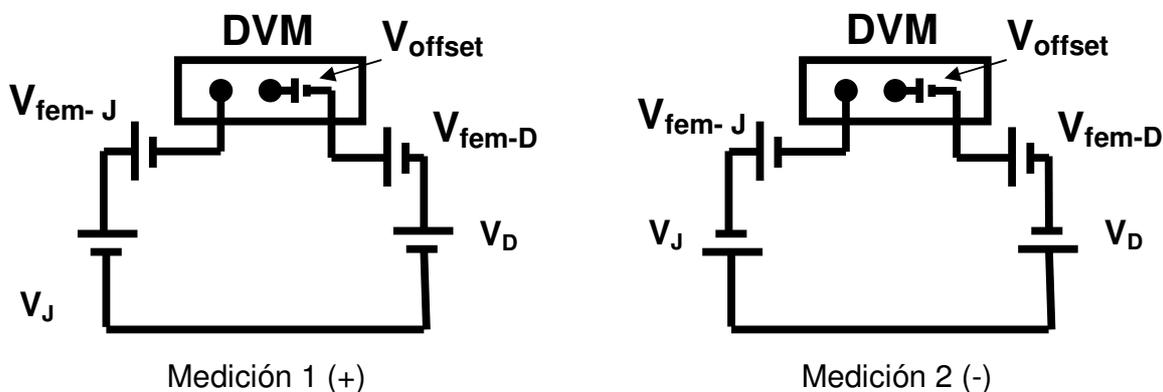
**Figura 4. Circuito del Control de Temperatura**



**Figura 5.- Sistema para la medición de las salidas del Divisor Resistivo a niveles de 1 mV , 10 mV y 100 mV.**



**Figura 6.- Fotografía del Divisor resistivo**



- DVM** - Detector de Nulos Agilent 34420
- $V_{fem-J}$  - fem térmica del patrón de efecto Josephson
- $V_{fem-D}$  - fem térmica de Divisor Resistivo
- $V_{offset}$  - Tensión de "offset" del detector de nulos
- $V_J$  - Tensión del Patrón Josephson
- $V_D$  - Tensión del Divisor Resistivo

$$V_J - V_{fem-J} - V_D - V_{fem-D} - V_{offset}$$

$$V_{m1} = -V_J - V_{fem-J} + V_D - V_{fem-D} - V_{offset}$$

$$(V_{m1} - V_{m2}) = V_{m1} = V_J - \cancel{V_{fem-J}} - V_D - \cancel{V_{fem-D}} - \cancel{V_{offset}} + V_J + \cancel{V_{fem-J}} - V_D + \cancel{V_{fem-D}} + \cancel{V_{offset}}$$

$$(V_{m1} - V_{m2}) / 2 = V_J - V_D$$

**Figura 7. Eliminación de Fems térmicas y offset del multímetro**