

Termoconvertidores:

¿Qué se necesita para hacer mediciones de tensión en c.a. con mediana y alta exactitud?

Sara Campos

*Metrología Eléctrica
División de Mediciones Electromagnéticas*

Contenido



Introducción

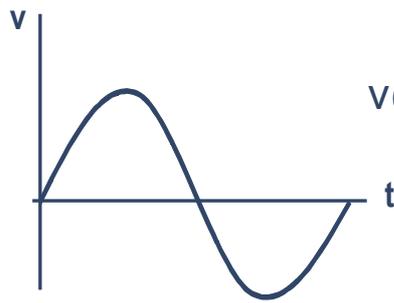
Principio de operación de los termoconvertidores

- *Efectos termoeléctricos*
- *Coefficiente de linealidad*
- *Efectos de la frecuencia*

Medición de tensión eléctrica en c.a. con termoconvertidores

- *Medición de diferencia c.a.-c.c.*
- *Compensación de deriva*
- *Calibración de fuentes de tensión*
- *Calibración de medidores de tensión*

Introducción



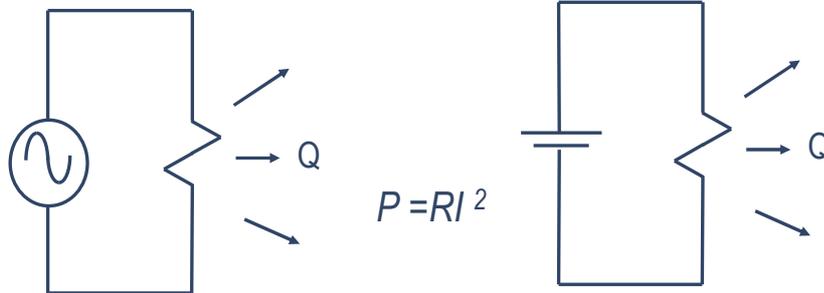
$$v(t) = V * \text{sen}(\omega t)$$

$$V_{\text{eficaz}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [v(t)]^2 dt}$$

El valor eficaz (rms) es un parámetro importante para la descripción de una señal eléctrica alterna. Este valor permite evaluar el contenido de energía de la señal independientemente de su forma de onda.

$$V_{\text{eficaz}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [v(t)]^2 dt}$$

El valor rms de una señal eléctrica en corriente alterna (c.a.) es comparable con el contenido de potencia de una señal eléctrica en corriente continua (c.c.), cuando ambas son aplicadas a un elemento puramente resistivo.



La ley de Joule establece que un resistor disipa la potencia producida en él, en forma de calor.

Medir tensión eléctrica en c.a. con alta exactitud requiere del uso de **patrones de transferencia c.a.-c.c.** con los que se mide la potencia promedio producida en un resistor por la señal en c.a. a conocer, comparándola con la potencia producida en el mismo resistor por una señal en c.c. conocida.

Si en un conductor circula corriente eléctrica, la energía cinética de los electrones se transforma en calor, elevando la temperatura del mismo. Este efecto es conocido como efecto Joule.

La cantidad de energía calorífica producida por una corriente eléctrica, depende directamente del cuadrado de la intensidad de la corriente, del tiempo que ésta circula por el conductor y de la resistencia que opone el mismo al paso de la corriente

$$Q = I^2 R t$$

donde:

Q = Energía calorífica producida por la corriente

I = Intensidad de la corriente que circula

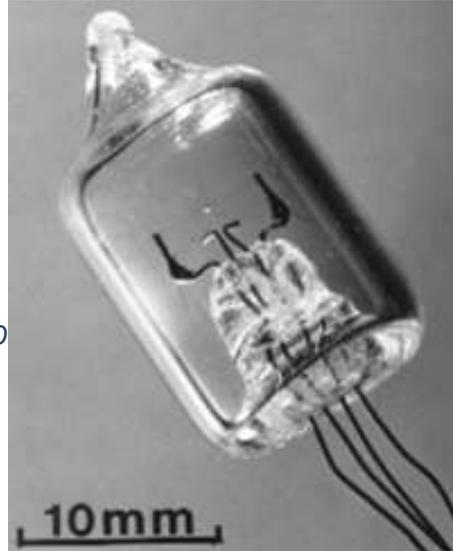
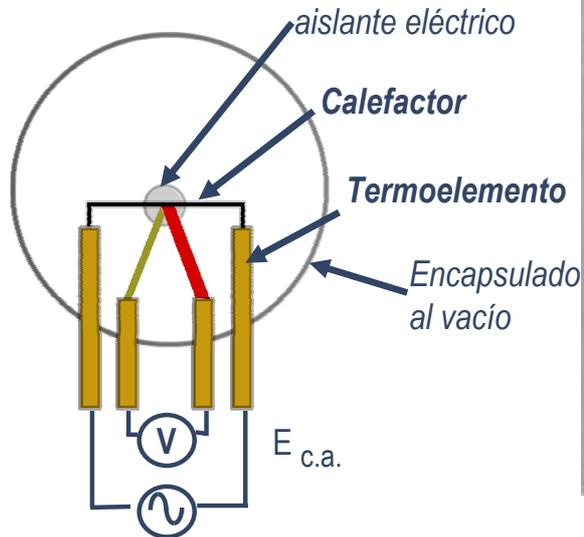
R = Resistencia eléctrica del conductor

t = Tiempo

Así, la potencia disipada por efecto Joule es:

$$P = RI^2$$

El dispositivo de menor incertidumbre para comparar la potencia producida por una señal de c.a y una de c.c. es un termoconvertidor.



Encuentro Nacional de Metrología Eléctrica 2007

Julio 2007

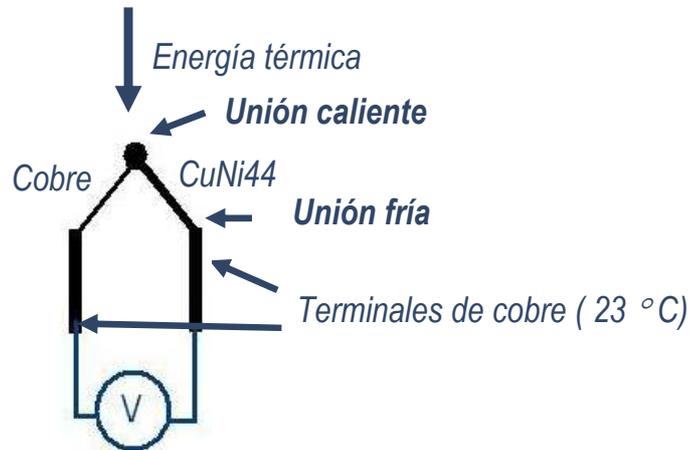
El termoconvertidor más simple se constituye de un elemento resistivo a la entrada, llamado calefactor, y de un termoelemento a la salida, ambos encapsulados al vacío para reducir pérdidas térmicas causadas por conductancia térmica.

El termoelemento está en contacto térmico con el calefactor en el punto medio a través de un material aislante eléctrico.

Un incremento de temperatura en el calefactor, provocado por una señal alterna con un valor eficaz igual a $V_{ca_{rms}}$, es igual bajo ciertas condiciones, al de una señal continua de valor V_{cc} . Es decir, señales de valores rms iguales provocan efectos térmicos iguales; en este caso, la FEM en el termoelemento es $E_{ca} = E_{cc}$.

Los termoconvertidores son capaces de comparar el calor disipado entre una señal alterna y una señal continua con incertidumbre menor a $0,1 \mu V/V$ y son empleados como patrones primarios en muchos laboratorios nacionales.

Principio de operación de los termoconvertidores

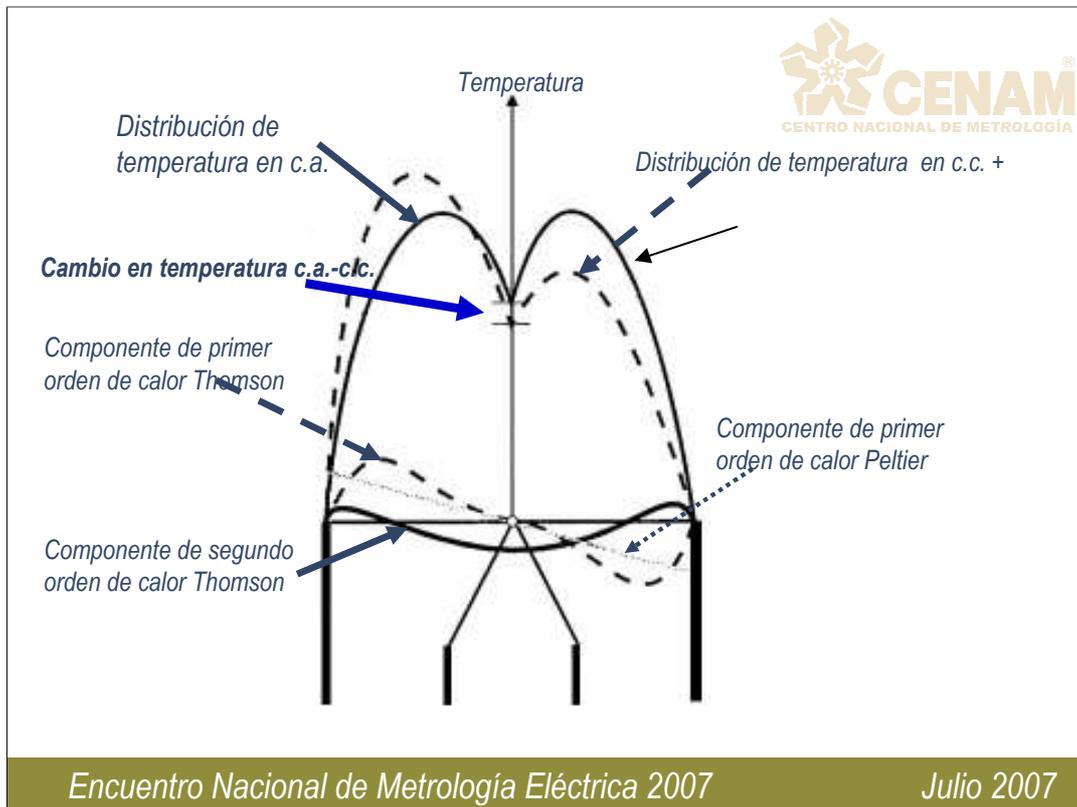


El funcionamiento básico de un termoconvertidor está basado en cuatro efectos físicos: El efecto Joule, el efecto Seebeck, el efecto Thomson y el efecto Peltier.

Cuando se aplica energía térmica en la unión del termoelemento la temperatura se incrementa. Referido a la temperatura ambiente 23 °C, se crea una diferencia de temperatura con respecto a las uniones fría y caliente del termoelemento. Esta diferencia de temperatura en las uniones provoca una FEM en las terminales del termoelemento (Efecto Seebeck).

El incremento de temperatura en el calefactor es medido con un termoelemento y es proporcional al cuadrado de la señal de entrada. Si el termoconvertidor fuera ideal se debería obtener la misma FEM de salida en c.c. que en c.a.

La característica de un termoconvertidor que indica que no tiene una respuesta ideal es su error de transferencia c.a.-c.c. llamado **diferencia c.a.-c.c.** Ésta es principalmente producida por efectos termoelectrónicos presentes en el calefactor y por la respuesta en frecuencia del mismo.



Calor por efecto Thomson es liberado o absorbido cuando una corriente eléctrica fluye en un conductor en presencia de un gradiente de temperatura.

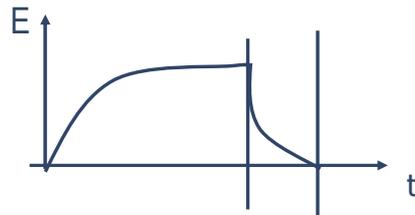
Calor por efecto Peltier es liberado o absorbido cuando una corriente eléctrica fluye en un circuito compuesto de dos conductores de diferente material.

Al aplicar la señal en c.c. los efectos Thomson y Peltier provocan una distribución asimétrica de la temperatura en el calefactor. La distribución se invierte al invertir la polaridad. El cambio en la distribución de temperatura en c.c. es conocido como error de inversión, su efecto en el proceso de transferencia c.a.-c.c. puede eliminarse utilizando el promedio de las salidas de ambas polaridades de c.c.

Como resultado de los efectos termoeléctricos en el calefactor, existe una diferencia sistemática al comparar una señal alterna y señales continuas. Esta diferencia es la llamada **Diferencia c.a.-c.c. (δ)**, y debe determinarse para cada termoconvertidor y para cada frecuencia

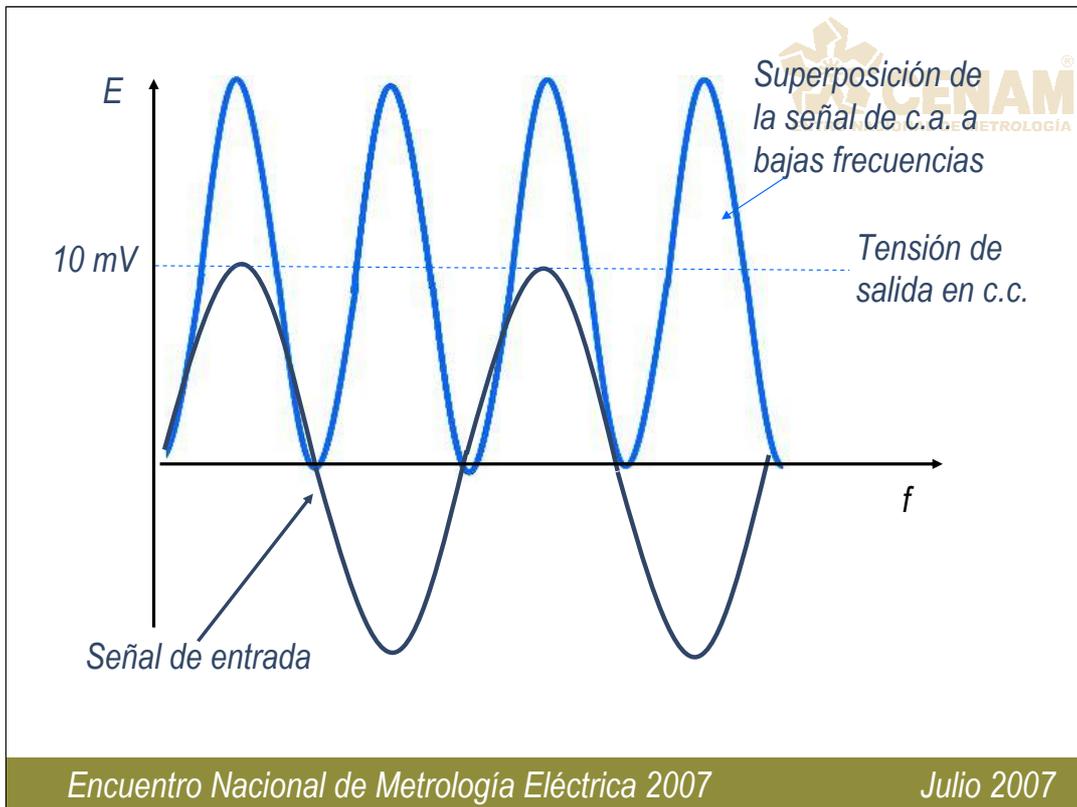
En c.a. los efectos Peltier y Thomson no pueden afectar la diferencia c.a.-c.c. debido a la inercia térmica del termoconvertidor

Debido a la masa térmica de los termoconvertidores, la temperatura del calefactor no puede cambiar tan rápido como lo hace la dirección de la corriente que fluye en él. Un termoconvertidor tiene una constante de tiempo que depende principalmente de la construcción del termoconvertidor.



La constante de tiempo de un termoconvertidor describe su capacidad de promediación. Esta constante de tiempo determina el tiempo de subida de la señal de entrada con respecto a un incremento en la entrada.

De acuerdo con la ley de Joule, el calor generado por el calefactor es proporcional al cuadrado de la corriente aplicada. La constante de tiempo del termoconvertidor resulta en un tiempo de integración de los pulsos de calor, que con una frecuencia suficientemente alta, produce una temperatura en el resistor que no tiene fluctuaciones.



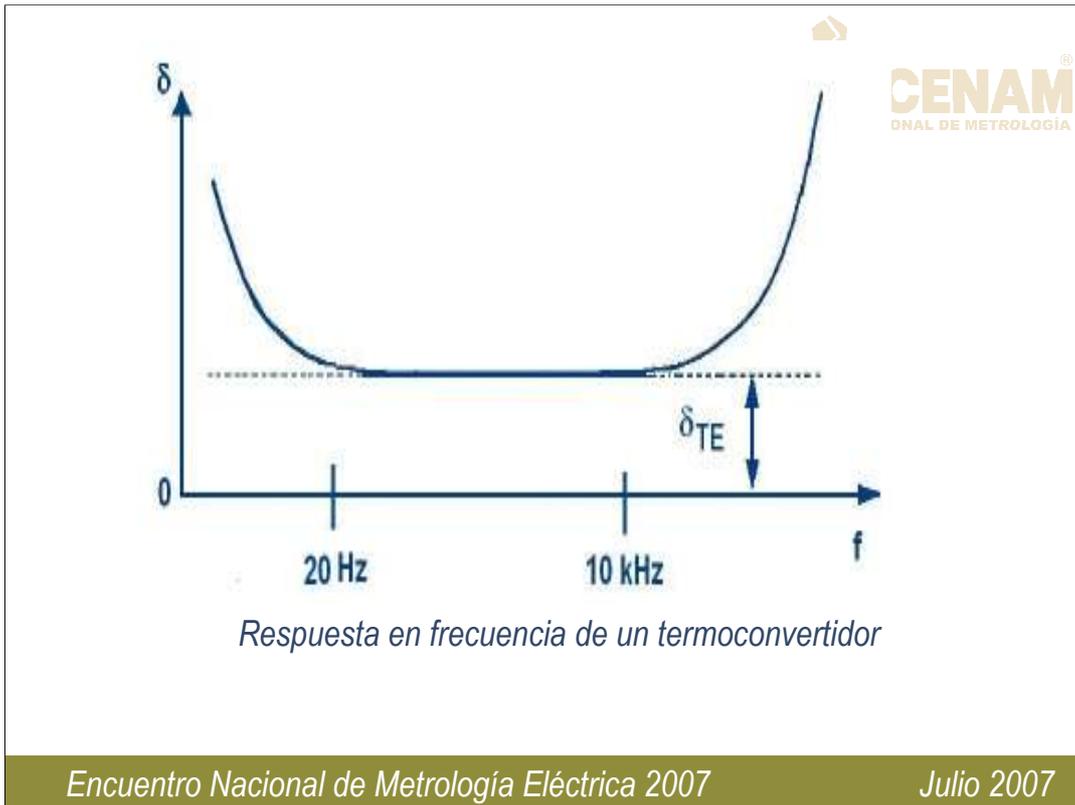
Encuentro Nacional de Metrología Eléctrica 2007 Julio 2007

A frecuencias bajas en las que el periodo de la señal es mayor comparado con la constante de tiempo del termoconvertidor, la temperatura del termoconvertidor "sigue" el calor Joule y la salida de tensión se muestra como una oscilación del doble de la frecuencia de entrada.

En cuanto mayor sea la constante de tiempo del termoconvertidor menor será la magnitud de la componente de c.a. a baja frecuencia.

La componente de c.a. provoca valores inestables a la salida del termoconvertidor.

El medidor utilizado a la salida del termoconvertidor debe contar con filtros analógicos y digitales, adicionalmente el sistema de medición debe optimizarse con el uso de filtros externos para eliminar la componente de c.a. en baja frecuencia.

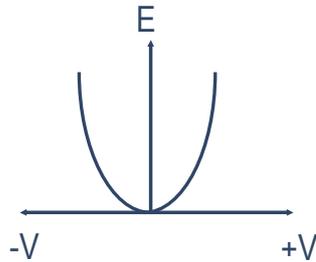


El origen de la diferencia c.a.-c.c. de los termoconvertidores se debe principalmente a:

1. Efectos independientes de la frecuencia, causados por los efectos Thomson y Peltier en c.c.
2. Efectos dependientes de la frecuencia
 - Causados por el efecto piel en los soportes del calefactor, por corrientes de fugas capacitivas e inductivas, así como a pérdidas dieléctricas en el calefactor.
 - Debidos a la insuficiencia de inercia térmica del termoconvertidor.

La salida de un termoconvertidor es una función de la potencia disipada en el calefactor, y por lo tanto varía aproximadamente como el cuadrado de la corriente que circula por él.

Tensión de salida



Tensión de entrada

$$E = k V_{\text{entrada}}^n \quad n = \frac{\Delta E}{E \Delta V}$$

$$E \approx 10 \text{ mV SJTC}$$

$$E \approx 2 \text{ V a } 400 \text{ mV sensor rms}$$

La relación entre la FEM de salida del termoelemento y la corriente que pasa por el calefactor se expresa de la siguiente manera:

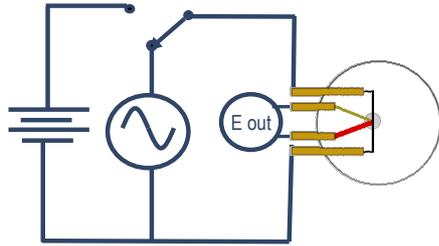
$$E = k V_{\text{entrada}}^n$$

La respuesta del termoconvertidor es muy cercana a la ley cuadrática, sin embargo el valor de n varía entre 1.6 y 2, dependiendo del tipo de termoconvertidor. El valor de k es una constante, depende del tipo de termoconvertidor.

El valor de n debe determinarse aplicando pequeños cambios de tensión a la entrada $\Delta V/V$ y observando los cambios a la salida ΔE .

$$n = \frac{\Delta E V}{E \Delta V}$$

***Medición de tensión
eléctrica en c.a.
con termoconvertidores***



$$E_{c.a.} = E_{c.c.}$$

$$\delta = \frac{\bar{E}_{c.a.} - \bar{E}_{c.c.}}{n * \bar{E}_{c.c.}} + \delta_{\text{calibración}}$$

$$\delta = \frac{V_{c.a.} - V_{c.c.}}{V_{c.c.}} \Big|_{E_{c.a.} = E_{c.c.}}$$



$$V_{c.a.} = V_{c.c.} * (1 + \delta) \leftarrow f(V, f)$$

El procedimiento para medir señales alternas con termoconvertidores es aplicar de manera alternada una señal en c.c. conocida y la señal en c.a. desconocida, al termoconvertidor de referencia.

La diferencia c.a.-c.c. se define como:

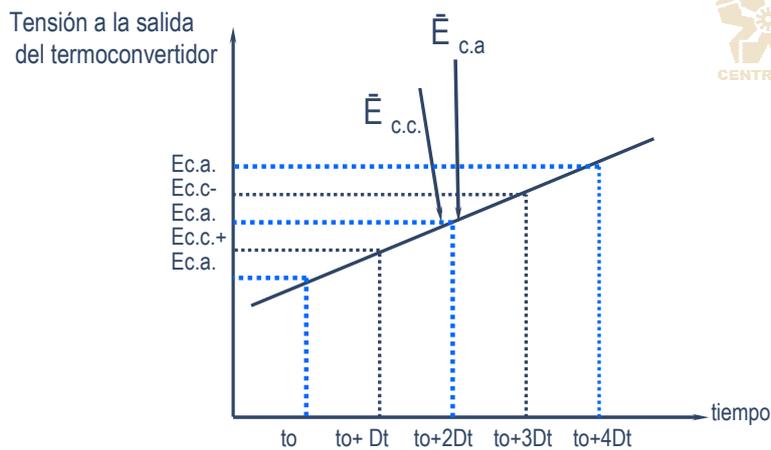
$$\text{Donde: } \delta = \frac{V_{c.a.} - V_{c.c.}}{V_{c.c.}} \Big|_{E_{c.a.} = E_{c.c.}}$$

Es el valor raíz cuadrático medio de la tensión eléctrica en corriente alterna, aplicada a la entrada del termoconvertidor.

$V_{c.a.}$ Es el valor de tensión eléctrica continua, que cuando se invierte su polaridad, el promedio de las FEM's correspondientes, produce la misma FEM de salida que al aplicar la señal alterna.

$V_{c.c.}$ Son las FEM's de salida del termoconvertidor correspondientes a $V_{c.a.}$ y $V_{c.c.}$

$E_{c.a.}$ y $E_{c.c.}$ Si se requiere a la entrada una señal de c.a. mayor que la de c.c. para producir la misma FEM de salida que en c.c., entonces la diferencia c.a.-c.c. tiene un signo positivo.



Secuencia: $V_{c.a.}$ $V_{c.c.}^+$ $V_{c.a.}$ $V_{c.c.}^-$ $V_{c.a.}$

Tiempos de estabilización c.a.-c.c.

Sensor rms: $t=30$ s a 60 s

SJTC: $t=60$ s

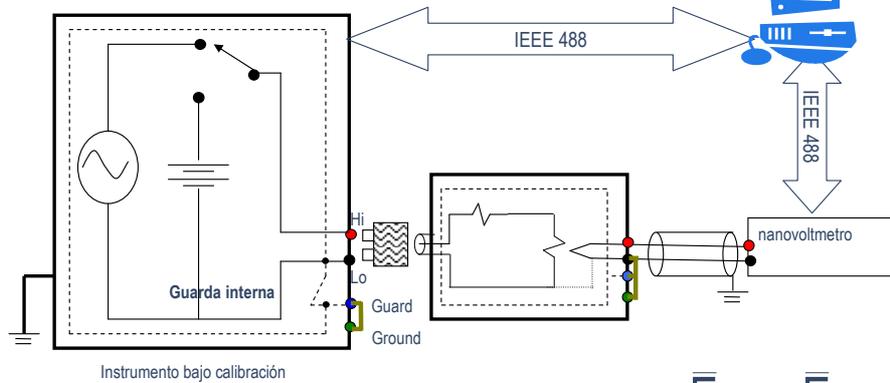
Cuando se está determinando el valor de la diferencia c.a.-c.c es muy importante minimizar los efectos térmicos que producen deriva a la salida del termoconvertidor., esto se logra si se aplican a la entrada del termoconvertidor secuencias de tensión tales como la siguiente: c.a., c.c.+, c.a., c.c.-, c.a.

Los tiempos de estabilización dependen del tipo de termoconvertidor, siendo tiempos característicos los siguientes:

Termoconvertidores basados en sensor rms: de 30 s a 60 s

Termoconvertidores de unión simple (SJTC): 60 s

Calibración de una fuente de tensión en c.a de alta exactitud, utilizando termoconvertidores



$$\delta = \frac{\bar{V}_{c.a.} - \bar{V}_{c.c.}}{\bar{V}_{cc}} \quad \left| \begin{array}{l} E_{c.a.} = E_{c.c.} \end{array} \right.$$

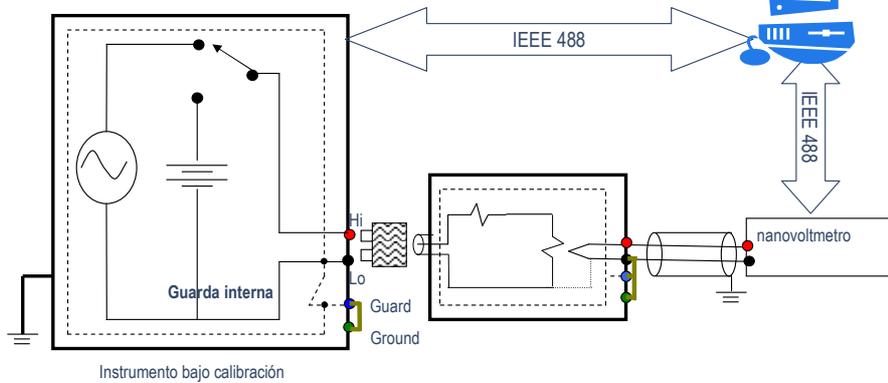
$$\delta = \frac{\bar{E}_{c.a.} - \bar{E}_{c.c.}}{n * \bar{E}_{cc}}$$

Para realizar la medición de δ , se debe conectar el termoconvertidor al generador bajo calibración de manera que no haya caídas de tensión adicionales producto de los adaptadores utilizados.

Las señales alterna y continua son aplicadas de manera alternada, siguiendo la secuencia c.a.-c.c. previamente señalada. El valor de tensión eléctrica en corriente continua deberá ajustarse, por igual en ambas polaridades, para lograr que $E_{c.a.}$ sea igual al promedio de ambas polaridades de $E_{c.c.}$

Ya que el proceso de medición de δ requiere de la interacción de todos los instrumentos del sistema de medición en tiempos determinados y precisos, para medir las fems de salida y realizar los ajustes de la fuente de c.c., se requiere contar con sistemas de medición automatizados para evitar introducir errores en las mediciones.

Calibración de una fuente de tensión en c.a de alta exactitud, utilizando termoconvertidores



$$V_{c.a. \text{ ref}} = \bar{V}_{c.c \text{ ref}} * \left(1 + \frac{E_{c.a.} - E_{c.c.}}{n * E_{c.c.}} + \delta_{\text{calibración}}\right)$$

$$\text{Error} = V_{\text{indicado}} - V_{c.a. \text{ ref}}$$

Encuentro Nacional de Metrología Eléctrica 2007

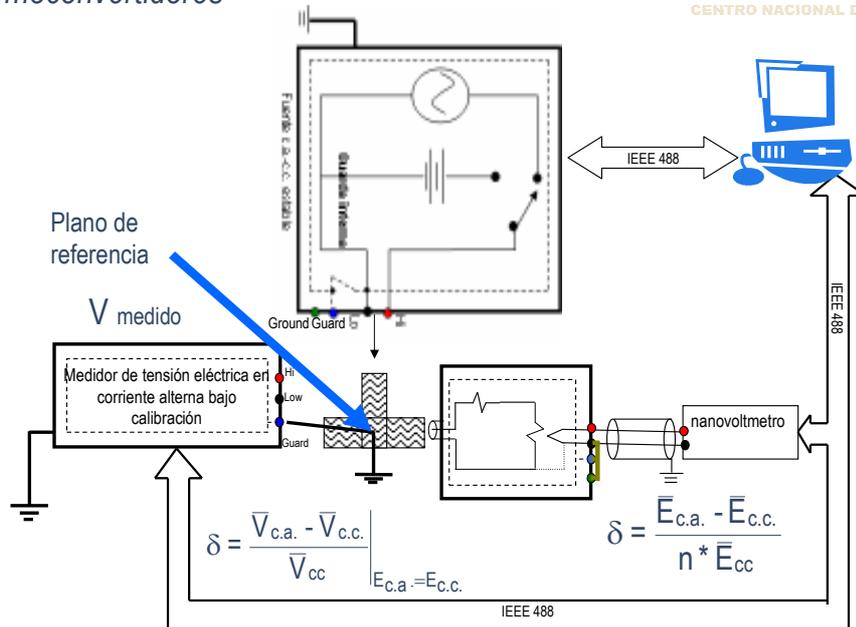
Julio 2007

Los generadores multifunción pueden generar la señal de c.c. la que debe ser previamente calibrada.

Entonces, midiendo la diferencia c.a.-c.c., corrigiendo el error de transferencia c.a.-c.c. del termoconvertidor y el valor de referencia de tensión eléctrica en c.c., se puede obtener el valor de la tensión eléctrica en c.a. que está generando el instrumento bajo calibración, de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$V_{c.a. \text{ ref}} = \bar{V}_{c.c \text{ ref}} * \left(1 + \frac{E_{c.a.} - E_{c.c.}}{n * E_{c.c.}} + \delta_{\text{calibración}}\right)$$

Calibración de un medidor de tensión en c.a de alta exactitud, utilizando termoconvertidores



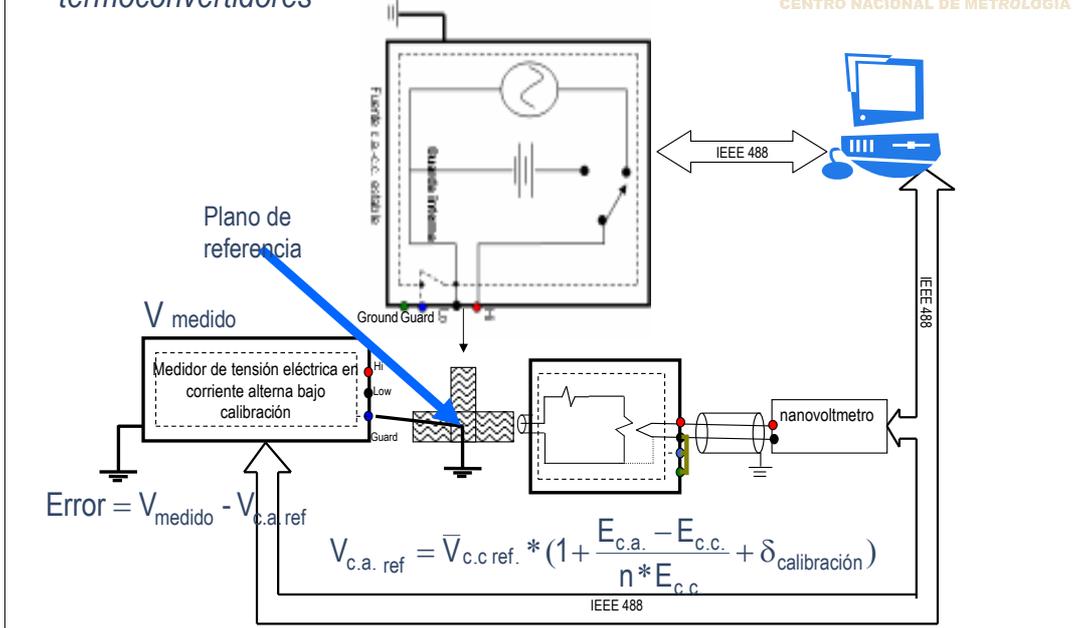
Encuentro Nacional de Metrología Eléctrica 2007

Julio 2007

Para llevar a cabo la calibración de un medidor de tensión en c.a. de alta exactitud, este debe conectarse en paralelo con el termoconvertidor para comparar el valor indicado por el medidor bajo calibración y el valor de referencia.

La conexión se lleva a cabo utilizando como plano de referencia el centro de un conector Tee tipo "N".

Calibración de un medidor de tensión en c.a de alta exactitud, utilizando termoconvertidores



Encuentro Nacional de Metrología Eléctrica 2007

Julio 2007

Utilizando el procedimiento de medición de diferencia c.a.-c.c. en combinación con el valor de referencia de c.c., medido en el plano de referencia, se obtiene el valor de referencia de c.a.

$$V_{c.a.ref} = \bar{V}_{c.c.ref.} * \left(1 + \frac{E_{c.a.} - E_{c.c.}}{n * E_{c.c.}} + \delta_{calibración}\right)$$

Este valor es comparado con las lecturas indicadas por el medidor bajo calibración, para obtener el error del mismo.

$$Error = V_{medido} - V_{c.a.ref}$$

Conclusión

- *Los termoconvertidores son utilizados para realizar mediciones de tensión en c.a. con alta exactitud.*
- *La trazabilidad de las mediciones en c.a. se obtiene a través de:*
 - *valores de los patrones de tensión en c.c.*
 - *valores calculables de diferencia c.a.-c.c., de los patrones de otros laboratorios nacionales.*
- *Se requiere conocer el principio de operación de los termoconvertidores para compensar y minimizar los efectos producidos en ellos.*
- *En la medida en que se conozca su funcionamiento se puede realizar de manera adecuada la medición de la diferencia c.a.-c.c. y optimizar el sistema de medición.*