

Copia No Controlada

Instituto Nacional
de Tecnología Industrial

Centro de Desarrollo e Investigación
en Física y Metrología

Procedimiento específico: PEE44

CALIBRACIÓN DE RESISTORES DE ALTO VALOR

Revisión: Julio 2012

Este documento se ha elaborado con recursos del Instituto Nacional de Tecnología Industrial.
Sólo se permite su reproducción sin fines de lucro y haciendo referencia a la fuente.

PEE44 Lista de enmiendas: Julio 2012

[illegible]

PEE44 Índice: Julio 2012

NOMBRE DEL CAPÍTULO	REVISIÓN
Índice	Julio 2012
CALIBRACIÓN DE RESISTORES DE ALTO VALOR	Julio 2012

PREPARADO POR

FIRMA Y SELLO


Ing. MARCOS E. BIERZYCHUDEK
 FÍSICA Y METROLOGÍA
 INTI

REVISADO POR

FIRMA Y SELLO

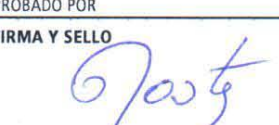

Lic. LUCAS D. DI LILLO
 COOR. ELECTRICIDAD
 FÍSICA Y METROLOGÍA
 INTI

REVISADO POR

FIRMA Y SELLO


ING. PATRICIA VARELA
 COORD. CALIDAD Y ADMINISTRACIÓN
 INTI - FÍSICA Y METROLOGÍA

APROBADO POR

FIRMA Y SELLO


Ing. JUAN A. FORASTIERI
 DIRECTOR TÉCNICO
 INTI / FÍSICA Y METROLOGÍA

PEE44: Julio 2012

1. Objetivo

Calibración de resistores de alto valor óhmico.

2. Alcance

Desde 100 kΩ hasta 1 TΩ.

3. Definiciones y abreviaturas

Ver más abajo.

4. Referencias

No aplicable.

5. Responsabilidades

5.1. Del Coordinador de la Unidad Técnica

Supervisa el desarrollo de la calibración, verifica el cumplimiento del procedimiento y revisa los resultados.

5.2. Del Personal del Laboratorio

Efectúa la calibración, aplica el presente procedimiento de calibración, procesa los datos correspondientes y elabora el certificado de calibración.

6. Instrucciones

6.1. Alternativa I: Puente de Wheatstone tradicional:

Conectar el resistor patrón a medir como se muestra en la Figura 1.

Poner a cero el detector electrométrico (E), seleccionando R_{eq} con la llave selectora.

Poner la llave selectora en ON, la llave de polaridad en +, y rotar lentamente el control de tensión a máximo.

Balancear el puente ajustando el resistor GR. Anotar el valor de GR.

Repetir los pasos b) a d) con la llave de polaridad colocada en la posición -.

Promediar los dos valores obtenidos de GR. Este valor es utilizado para calcular el valor de X.

Medir y anotar la temperatura ambiente y la humedad relativa (T y RH).

Circuito:

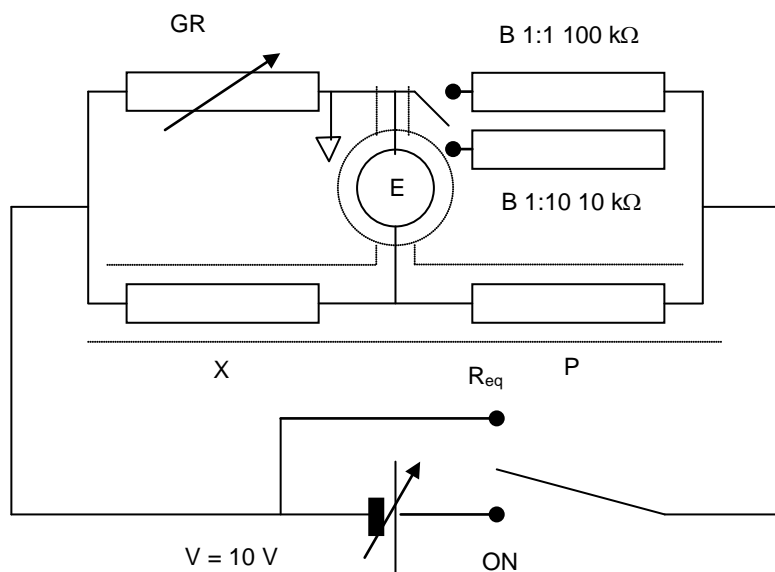


Figura 1: Puente de Wheatstone

PEE44: Julio 2012

GR: resistor de ajuste
 B: resistores de relación
 E: detector electrométrico
 X: resistor patrón a ser calibrado
 P: resistor patrón de referencia

6.1.1. Para calibrar el resistor patrón de referencia se aplica el método de escalonamiento ascendente; el puente es operado en relación 1:10. El resistor utilizado como patrón de referencia para la calibración del patrón de 1 GΩ fue calibrado previamente de acuerdo con el Procedimiento PEE43.

6.1.2. Cuando se dispone de un resistor patrón de referencia del mismo valor nominal que el resistor a calibrar, es preferible operar el puente en relación 1:1.

6.1.3. Modelo Matemático, Modelo de Incertidumbre y Cálculo de Incertidumbre

Modelo Matemático

Resistencia equivalente del puente, vista desde los terminales del detector:

$$R_{eq} = \frac{GR \cdot B}{GR + B} + \frac{X \cdot P}{X + P}$$

Tensión equivalente:

$$V_{eq} = V \left[\frac{X}{X + P} - \frac{GR}{GR + B} \right] = V \frac{X \cdot B - GR \cdot P}{(X + P)(GR + B)}$$

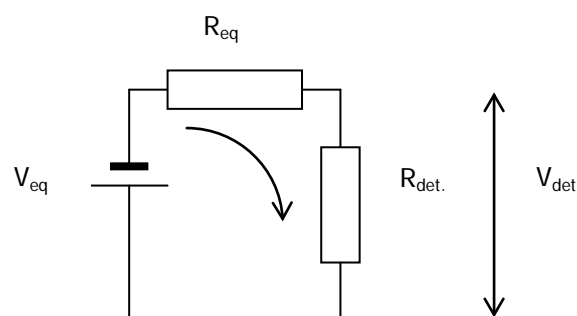


Figura 2: Circuito equivalente

$$V_{eq} = i \cdot (R_{eq} + R_{det}) \Rightarrow i = \frac{V_{eq}}{R_{eq} + R_{det}} \therefore V_{det} = i \cdot R_{det} = \frac{V_{eq} \cdot R_{det}}{R_{eq} + R_{det}}$$

PEE44: Julio 2012

entonces:

$$\begin{aligned}
 V_{\text{det.}} &= V \cdot R_{\text{det.}} \cdot \frac{X \cdot B - GR \cdot P}{(X+P)(GR+B)(R_{\text{eq}}+R_{\text{det.}})} = V \cdot R_{\text{det.}} \cdot \frac{(X \cdot B - GR \cdot P)}{(X+P)(GR+B) \left[\frac{GR \cdot B}{GR+B} + \frac{X \cdot P}{X+P} + R_{\text{det.}} \right]} = \\
 &= V \cdot R_{\text{det.}} \cdot \frac{(X \cdot B - GR \cdot P)}{GR \cdot B(X+P) + X \cdot P(GR+B) + R_{\text{det.}}(X+P)(GR+B)} = \\
 &= \frac{V \cdot R_{\text{det.}} \cdot X \cdot B - V \cdot R_{\text{det.}} \cdot GR \cdot P}{GR \cdot B \cdot X + GR \cdot B \cdot P + X \cdot P \cdot GR + X \cdot P \cdot B + R_{\text{det.}} \cdot X \cdot GR + R_{\text{det.}} \cdot X \cdot B + R_{\text{det.}} \cdot P \cdot GR + R_{\text{det.}} \cdot P \cdot B}
 \end{aligned}$$

Con lo cual

$$\begin{aligned}
 V_{\text{det.}} \cdot GR \cdot B \cdot X + V_{\text{det.}} \cdot GR \cdot B \cdot P + V_{\text{det.}} \cdot X \cdot P \cdot GR + V_{\text{det.}} \cdot X \cdot P \cdot B + V_{\text{det.}} \cdot R_{\text{det.}} \cdot X \cdot GR + \\
 + V_{\text{det.}} \cdot R_{\text{det.}} \cdot X \cdot B + V_{\text{det.}} \cdot R_{\text{det.}} \cdot P \cdot GR + V_{\text{det.}} \cdot R_{\text{det.}} \cdot P \cdot B = V \cdot R_{\text{det.}} \cdot X \cdot B - \\
 - V \cdot R_{\text{det.}} \cdot GR \cdot P
 \end{aligned}$$

Entonces

$$\begin{aligned}
 X(V_{\text{det.}} \cdot GR \cdot B + V_{\text{det.}} \cdot GR \cdot P + V_{\text{det.}} \cdot P \cdot B + V_{\text{det.}} \cdot R_{\text{det.}} \cdot GR + V_{\text{det.}} \cdot R_{\text{det.}} \cdot B - V \cdot R_{\text{det.}} \cdot B) = \\
 -V \cdot R_{\text{det.}} \cdot GR \cdot P - V_{\text{det.}} \cdot GR \cdot B \cdot P - V_{\text{det.}} \cdot R_{\text{det.}} \cdot P \cdot GR - V_{\text{det.}} \cdot R_{\text{det.}} \cdot P \cdot B
 \end{aligned}$$

y, finalmente

$$\boxed{X = \frac{V \cdot R_{\text{det.}} \cdot GR \cdot P + V_{\text{det.}} \cdot GR \cdot B \cdot P + V_{\text{det.}} \cdot R_{\text{det.}} \cdot P \cdot GR + V_{\text{det.}} \cdot R_{\text{det.}} \cdot P \cdot B}{V \cdot R_{\text{det.}} \cdot B - V_{\text{det.}} \cdot GR \cdot B - V_{\text{det.}} \cdot GR \cdot P - V_{\text{det.}} \cdot P \cdot B - V_{\text{det.}} \cdot R_{\text{det.}} \cdot GR - V_{\text{det.}} \cdot R_{\text{det.}} \cdot B}}$$

En el equilibrio y con detector ideal, $V_{\text{det.}} = 0$ y $R_{\text{det.}} = \infty$:

$$X = \frac{V \cdot R_{\text{det.}} \cdot GR \cdot P}{V \cdot R_{\text{det.}} \cdot B} = P \cdot \frac{GR}{B}, \text{ ecuación del puente ideal.}$$

Modelo de incertidumbre

Cálculo de los coeficientes de sensibilidad, evaluados para $V_{\text{det.}} = 0$:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial X}{\partial P} &= \frac{(V \cdot R_{\text{det.}} \cdot GR + V_{\text{det.}} \cdot GR \cdot B + V_{\text{det.}} \cdot R_{\text{det.}} \cdot GR + V_{\text{det.}} \cdot R_{\text{det.}} \cdot B)(V \cdot R_{\text{det.}} \cdot B - V_{\text{det.}} \cdot GR \cdot B - \\
 &- \frac{V_{\text{det.}} \cdot GR \cdot P - V_{\text{det.}} \cdot P \cdot B - V_{\text{det.}} \cdot R_{\text{det.}} \cdot GR - V_{\text{det.}} \cdot R_{\text{det.}} \cdot B)}{(V \cdot R_{\text{det.}} \cdot B - V_{\text{det.}} \cdot GR \cdot B - V_{\text{det.}} \cdot GR \cdot P - V_{\text{det.}} \cdot P \cdot B - V_{\text{det.}} \cdot R_{\text{det.}} \cdot GR - V_{\text{det.}} \cdot R_{\text{det.}} \cdot B)^2} = \\
 &= \frac{V^2 \cdot R_{\text{det.}}^2 \cdot GR \cdot B}{V^2 \cdot R_{\text{det.}}^2 \cdot B^2} = \frac{GR}{B}
 \end{aligned}$$

PEE44: Julio 2012

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathbf{X}}{\partial \mathbf{GR}} &= \frac{(V R_{\text{det.}} P + V B P + V_{\text{det.}} R_{\text{det.}} P)(V R_{\text{det.}} B - V_{\text{det.}} GR B - V_d GR P - V_{\text{det.}} P B - V_{\text{det.}} R_{\text{det.}} GR - V_{\text{det.}} R_{\text{det.}} B)}{(V R_{\text{det.}} B - V_{\text{det.}} GR B - V_{\text{det.}} GR P - V_{\text{det.}} P B - V_{\text{det.}} R_{\text{det.}} GR - V_{\text{det.}} R_{\text{det.}} B)^2} - \\ &= \frac{(V R_{\text{det.}} GR P + V_{\text{det.}} GR B P + V_{\text{det.}} R_{\text{det.}} P GR + V_{\text{det.}} R_{\text{det.}} P B)(-V_{\text{det.}} B - V_{\text{det.}} P - V_{\text{det.}} R_{\text{det.}})}{(V R_{\text{det.}} B - V_{\text{det.}} GR B - V_{\text{det.}} GR P - V_{\text{det.}} P B - V_{\text{det.}} R_{\text{det.}} GR - V_{\text{det.}} R_{\text{det.}} B)^2} = \\ &= \frac{V^2 R_{\text{det.}}^2 P B}{V^2 R_{\text{det.}}^2 B^2} = \frac{\mathbf{P}}{\mathbf{B}} \\ \frac{\partial \mathbf{X}}{\partial \mathbf{B}} &= \frac{(V_{\text{det.}} GR P + V_{\text{det.}} R_{\text{det.}} P)(V R_{\text{det.}} B - V_{\text{det.}} GR B - V_{\text{det.}} P GR - V_{\text{det.}} P B - V_{\text{det.}} R_{\text{det.}} GR - V_{\text{det.}} R_{\text{det.}} B)}{(V R_{\text{det.}} B - V_{\text{det.}} GR B - V_{\text{det.}} GR P - V_{\text{det.}} P B - V_{\text{det.}} R_{\text{det.}} GR - V_{\text{det.}} R_{\text{det.}} B)^2} - \\ &= \frac{(V_{\text{det.}} GR B P + V_{\text{det.}} R_{\text{det.}} P GR + V_{\text{det.}} R_{\text{det.}} P B + V R_{\text{det.}} GR P)(V R_{\text{det.}} - V_{\text{det.}} GR - V_{\text{det.}} P - V_{\text{det.}} R_{\text{det.}})}{(V R_{\text{det.}} B - V_{\text{det.}} GR B - V_{\text{det.}} GR P - V_{\text{det.}} P B - V_{\text{det.}} R_{\text{det.}} GR - V_{\text{det.}} R_{\text{det.}} B)^2} = \\ &= -\frac{V^2 R_{\text{det.}}^2 GR P}{V^2 R_{\text{det.}}^2 B^2} = \frac{\mathbf{GR P}}{\mathbf{B^2}} \\ \frac{\partial \mathbf{X}}{\partial \mathbf{V}_{\text{det.}}} &= \frac{GR B P + R_{\text{det.}} P GR + R_{\text{det.}} P B)(V R_{\text{det.}} B - V_{\text{det.}} GR B - V_{\text{det.}} P GR - V_{\text{det.}} P B - V_{\text{det.}} R_{\text{det.}} GR - V_{\text{det.}} R_{\text{det.}} B)}{(V R_{\text{det.}} B - V_{\text{det.}} GR B - V_{\text{det.}} GR P - V_{\text{det.}} P B - V_{\text{det.}} R_{\text{det.}} GR - V_{\text{det.}} R_{\text{det.}} B)^2} - \\ &= \frac{(V_{\text{det.}} GR B P + V_{\text{det.}} R_{\text{det.}} P GR + V_{\text{det.}} R_{\text{det.}} P B + V R_{\text{det.}} GR P)(-GR B - P GR - P B - R_{\text{det.}} GR - R_{\text{det.}} B)}{(V R_{\text{det.}} B - V_{\text{det.}} GR B - V_{\text{det.}} GR P - V_{\text{det.}} P B - V_{\text{det.}} R_{\text{det.}} GR - V_{\text{det.}} R_{\text{det.}} B)^2} = \\ &= \frac{GR B^2 P V R_{\text{det.}} + R_{\text{det.}}^2 P GR V B + R_{\text{det.}}^2 P B^2 V + V R_{\text{det.}} GR^2 P B}{V R_{\text{det.}} B^2} + \\ &+ \frac{V R_{\text{det.}} GR^2 P^2 + V R_{\text{det.}} GR P^2 B + V R_{\text{det.}}^2 GR^2 P + V R_{\text{det.}}^2 GR P B}{V R_{\text{det.}} B^2} = \\ &= \frac{GR B^2 P + 2 GR R_{\text{det.}} P B + R_{\text{det.}} P B^2 + GR^2 P B + GR^2 P^2 B + R_{\text{det.}} GR^2 P}{V R_{\text{det.}} B^2} = \\ &= \frac{\mathbf{B^2 P (GR+P) + P^2 GR (GR+B) + GR^2 P (B+R_{\text{det.}}) + 2 GR R_{\text{det.}} P B}}{\mathbf{V R_{\text{det.}} B^2}} \end{aligned}$$

Evaluación de los coeficientes para los distintos valores de resistencia a ser medidos:

X [Ω]	P [Ω]	r	GR [Ω]	B [Ω]	R _d [Ω]	c(P)	c(GR)	c(B)	c(V _d) [Ω/V]
10 ⁹	10 ⁸	10:1	10 ⁵	10 ⁴	10 ¹³	10	10 ⁴	10 ⁵	1,2.10 ⁹
10 ⁹	10 ⁹	1:1	10 ⁵	10 ⁵	10 ¹³	1	10 ⁴	10 ⁴	3.10 ⁸
10 ¹⁰	10 ⁹	10:1	10 ⁵	10 ⁴	10 ¹³	10	10 ⁵	10 ⁶	1,2.10 ¹⁰
10 ¹⁰	10 ¹⁰	1:1	10 ⁵	10 ⁵	10 ¹³	1	10 ⁵	10 ⁵	3.10 ⁹
10 ¹¹	10 ¹⁰	10:1	10 ⁵	10 ⁴	10 ¹³	10	10 ⁶	10 ⁷	1,2.10 ¹¹
10 ¹¹	10 ¹¹	1:1	10 ⁵	10 ⁵	10 ¹³	1	10 ⁶	10 ⁶	3.10 ¹⁰
10 ¹²	10 ¹¹	10:1	10 ⁵	10 ⁴	10 ¹³	10	10 ⁷	10 ⁸	1,2.10 ¹²
10 ¹²	10 ¹²	1:1	10 ⁵	10 ⁵	10 ¹³	1	10 ⁷	10 ⁷	3,2.10 ¹¹

PEE44: Julio 2012

Ejemplo de cálculo de incertidumbre

Calibración de Victoreen 93002 1.E+09 Ω r=1:10
Patron Victoreen 93001 1.E+08 Ω

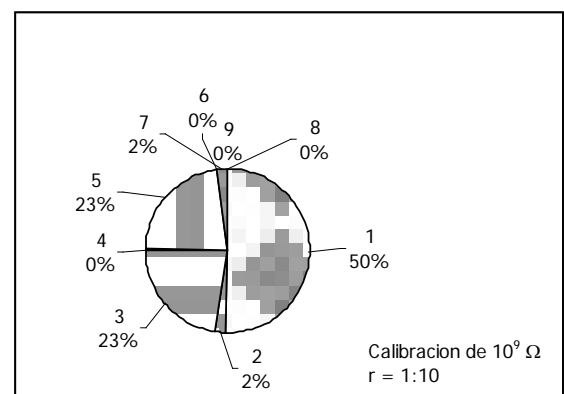
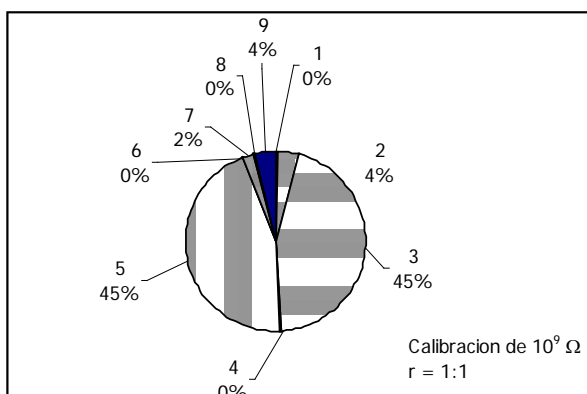
Fuente de incertidumbre	c _i	Valor (±)	Distribucion	Factor	v _i	u _i	u _i ²	Porcent		
1 Calibracion del patron	1.00E+01	2.00E+03 Ω	n	2.0	10000	1.00E+04 Ω	1.00E+08 Ω ²	0.34		
2 Temperatura del patron	1.00E+01	1.00E+04 Ω/K	-	-	10000	3.33E+04 Ω	1.11E+09 Ω ²	3.74		
3 Exactitud GR	1.00E+04	2.00E+01 Ω	r	1.7	10000	1.15E+05 Ω	1.33E+10 Ω ²	44.87		
4 Temperatura GR	1.00E+04	2.00E+00 Ω/K	-	-	10000	6.67E+03 Ω	4.44E+07 Ω ²	0.15		
5 Exactitud B	1.00E+05	2.00E+00 Ω	r	1.7	10000	1.15E+05 Ω	1.33E+10 Ω ²	44.87		
6 Temperatura B	1.00E+05	2.00E-01 Ω/K	-	-	10000	6.67E+03 Ω	4.44E+07 Ω ²	0.15		
7 Medicion (Tipo A)	1.00E+00	5.00E+04 Ω	n	2.0	10000	2.50E+04 Ω	6.25E+08 Ω ²	2.10		
8 Resolucion detector	1.20E+09	5.00E-06 V	r	1.7	10000	3.46E+03 Ω	1.20E+07 Ω ²	0.04		
9 Temperatura R	1.00E+00	1.00E+05 Ω/K	-	-	10000	3.33E+04 Ω	1.11E+09 Ω ²	3.74		
Incertidumbre combinada					N (1s)		2.5E+04	1.72E+05 Ω	2.97E+10 Ω ²	100.00
Incertidumbre expandida (k=2)					N (95%)		2.0	3.45E+05 Ω		
Incertidumbre expandida relativa							3.45E-04			

$\Delta t = 1 \text{ C}$

Calibración de Victoreen 1.E+09 Ω r=1:1
Patron Victoreen 93002 1.E+09 Ω

Fuente de incertidumbre	c_i	Valor (\pm)	Distribucion	Factor	v_i	u_i	u_i^2	Porcent		
1 Calibracion del patron	1.00E+00	3.45E+05 Ω	n	2.0	10000	1.72E+05 Ω	2.97E+10 Ω^2	51.05		
2 Temperatura del patron	1.00E+00	1.00E+05 Ω/K	-	-	10000	3.33E+04 Ω	1.11E+09 Ω^2	1.91		
3 Exactitud GR	1.00E+04	2.00E+01 Ω	r	1.7	10000	1.15E+05 Ω	1.33E+10 Ω^2	22.91		
4 Temperatura GR	1.00E+04	2.00E+00 Ω/K	-	-	10000	6.67E+03 Ω	4.44E+07 Ω^2	0.08		
5 Exactitud B	1.00E+04	2.00E+01 Ω	r	1.7	10000	1.15E+05 Ω	1.33E+10 Ω^2	22.91		
6 Temperatura B	1.00E+04	2.00E+00 Ω/K	-	-	10000	6.67E+03 Ω	4.44E+07 Ω^2	0.08		
7 Medicion (Tipo A)	1.00E+00	5.00E+04 Ω	n	2.0	10000	2.50E+04 Ω	6.25E+08 Ω^2	2.10		
8 Resolucion detector	3.00E+08	5.00E-06 V	r	1.7	10000	8.66E+02 Ω	7.50E+05 Ω^2	0.00		
9 Temperatura R	1.00E+00	1.00E+03 Ω/K	-	-	10000	3.33E+02 Ω	1.11E+05 Ω^2	0.00		
Incertidumbre combinada					N (1s)		2.7E+04	2.41E+05 Ω	5.82E+10 Ω^2	100.00
Incertidumbre expandida (k=2)					N (95%)		2.0	4.83E+05 Ω Ω		
Incertidumbre expandida relativa							4.83E-04			

$\Delta t = 1 \text{ C}$



PEE44: Julio 2012

6.2. Alternativa II: Puente de Wheatstone modificado

En el puente de Wheatstone tradicional se reemplaza la fuente de alimentación y la resistencia variable por dos fuentes de tensión (Fluke 5700A, Fluke 5720A o Fluke 732B), como se muestra en la figura 3. El detector puede operarse en modo tensión o modo corriente, dependiendo de los valores de los resistores a medir. El equilibrio del puente se obtiene variando la tensión de una o ambas fuentes. El sistema es operado en forma automática.

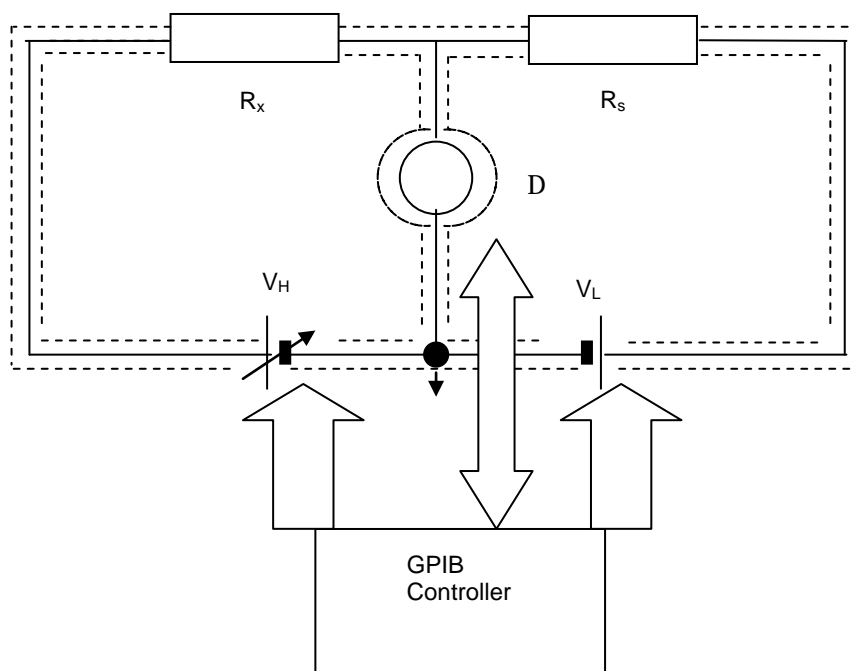
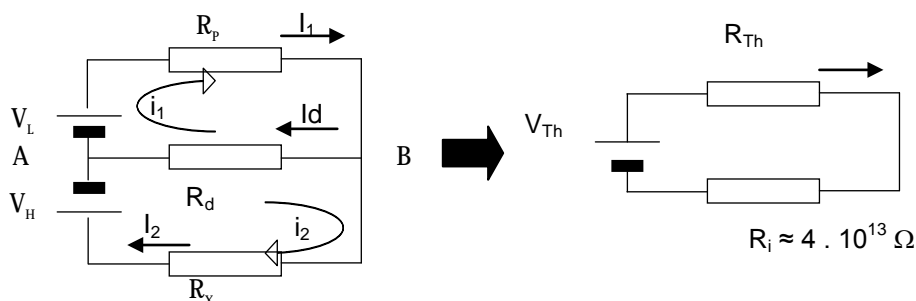


Figura 3: Puente de Wheatstone modificado.

Modelo Matemático y Cálculo de Incertidumbre

Detección en tensión ($R_x \leq 1 \text{ M}\Omega$), modelo matemático



$$V_d = \frac{V_{Th} R_i}{R_i + R_{Th}}$$

$$R_{Th} = \frac{R_x R_p}{R_x + R_p}$$

$$V_{Th} = V_B - V_A = \frac{(V_L - V_H) R_x}{R_x + R_p} + V_H = \frac{V_L R_x + V_H R_p}{R_x + R_p}$$

PEE44: Julio 2012

con lo cual:

$$V_d = \frac{V_L R_x + V_H R_P}{R_x + R_P + \frac{R_x R_P}{R_i}} \approx \frac{V_L R_x + V_H R_P}{R_x + R_P}$$

Entonces,

$$R_x = \frac{V_H - V_d}{V_d - V_L} R_P \quad [1]$$

Y en el equilibrio $V_d = 0$, con lo cual $R_x = \frac{V_H}{-V_L} R_P$.

Detección en corriente ($R_x > 1 \text{ M}\Omega$), modelo matemático

$$I_d = \frac{V_{Th}}{T_{Th}} = \frac{V_L R_x + V_H R_P}{R_x + R_P} \cdot \frac{R_x + R_P}{R_x R_P} = \frac{V_L R_x + V_H R_P}{R_x R_P}$$

de aquí:

$$R_x (I_d R_P - V_L) = V_H R_P \quad \text{y} \quad R_x = -\frac{V_H}{I_d R_P - V_L} R_P \quad [2]$$

y en el equilibrio $I_d=0$, con lo cual $R_x = \frac{V_H}{-V_L} R_P$.

La comparación de dos resistores consiste en 4 series de lecturas:

Se lee en el detector el cero inicial del circuito (0_i), con salida nula de las dos fuentes, aplicada a los resistores.

Se aplican las tensiones V_H y V_L por pasos hasta alcanzar la tensión final en ambas fuentes. Éstas se operan en la relación de tensiones adecuada.

Se ajusta la tensión V_H de forma de obtener una lectura en el detector cercana a 0. No se requiere el conocimiento exacto del valor de la tensión V aplicada.

Tomando V como pivote, se efectúan dos cambios conocidos dV en direcciones opuestas. Se leen las correspondientes señales de desbalance Eq_1 y Eq_2 y las tensiones correspondientes aplicadas V_1 y V_2 , obteniéndose como resultado dos pares de valores (Eq_2, V_2) y (Eq_1, V_1) .

Se bajan por pasos las tensiones de ambas fuentes a 0 V y se lee el valor del cero final (0_f). Se calcula $0_{prom} = (0_i + 0_f)/2$

Se calcula la tensión final de balance V_H para 0_{prom} por interpolación sobre la recta que pasa por (Eq_2, V_2) , (Eq_1, V_1) .

$$V_H = \frac{V_2 - V_1}{Eq_2 - Eq_1} (0_{prom} - Eq_1) + V_1 \quad [3]$$

Se corrigen los valores de tensión V_L aplicada y V_H de balance calculada, aplicando las correcciones correspondientes a las fuentes utilizadas.

Se calcula la relación de tensiones $r_+ = V_H/V_L$.

Se repite 6.2.1 a 6.2.7 con la polaridad de las fuentes invertidas.

Se calcula una segunda relación de tensiones $r_- = V_H/V_L$ y el promedio $r = (r_+ + r_-)/2$

PEE44: Julio 2012

Si la calibración de R_x se efectúa en un solo paso, (comparación directa con un patrón en cualquier relación) su valor se expresa como:

$$R_x = r R_s$$

En el caso de una calibración con un número mayor de pasos se medirán una sucesión de relaciones r . Esto define un sistema sobredeterminado, a resolver por cuadrados mínimos.

Modelo de incertidumbre

Se expresa la relación de resistencias en función de las tensiones aplicadas:

$$r = \frac{r_+ + r_-}{2} \quad r_{\pm} = \frac{\frac{V_2 - V_1}{Eq_2 - Eq_1} \left(\frac{0_i}{2} + \frac{0_f}{2} - Eq_1 \right) + V_1}{V_L}$$

y calculan las derivadas parciales respecto a las variables V_1 , V_2 , Eq_1 , Eq_2 , 0_i , 0_f y V_L .

$$\frac{\partial r_{\pm}}{\partial V_1} = \frac{-\left(\frac{1}{2}0_i + \frac{1}{2}0_f - Eq_1\right)}{Eq_2 - Eq_1} + 1$$

$$\frac{\partial r_{\pm}}{\partial V_2} = \frac{\left(\frac{1}{2}0_i + \frac{1}{2}0_f - Eq_1\right)}{(Eq_2 - Eq_1)V_L}$$

$$\frac{\partial r_{\pm}}{\partial 0_i} = \frac{\partial r_{\pm}}{\partial 0_f} = \frac{(V_2 - V_1)}{2(Eq_2 - Eq_1)V_L}$$

$$\frac{\partial r_{\pm}}{\partial Eq_1} = \frac{\frac{-(V_2 - V_1)}{(Eq_2 - Eq_1)} + (V_2 - V_1) \frac{\frac{1}{2}0_i + \frac{1}{2}0_f - Eq_1}{(Eq_2 - Eq_1)^2}}{V_L}$$

$$\frac{\partial r_{\pm}}{\partial Eq_2} = \frac{-(V_2 - V_1) \left(\frac{1}{2}0_i + \frac{1}{2}0_f - Eq_1 \right)}{(Eq_2 - Eq_1)^2 V_L}$$

$$\frac{\partial r_{\pm}}{\partial V_L} = \frac{-(V_2 - V_1) \left(\frac{1}{2}0_i + \frac{1}{2}0_f - Eq_1 \right)}{(Eq_2 - Eq_1) + V_1} \frac{1}{V_L^2}$$

PEE44: Julio 2012

como las variables V_1 , V_2 , Eq_1 , Eq_2 , 0_i , 0_f y V_L son del mismo orden para r_+ y r_- , los coeficientes de sensibilidad para uno y otro caso pueden considerarse del mismo orden

$$(U_{r_+})^2 \cong (U_{r_-})^2 \equiv (U_{r_{\pm}})^2$$

$$U_r = U_{r_{\pm}}$$

Ejemplo: Calibración de dos resistores de 1 MΩ:

Se toma como referencia un resistor patrón de 10kΩ (en lo que sigue, P10k) y una caja de transferencia Hamon de 1MΩ/paso en paralelo (valor nominal: 100 kΩ, denominada T100k). Se calibran dos resistores de 1MΩ, denominados 1MA y 1MB.

Se realizan las mediciones para los siguientes pares de resistores (R_p, R_x) y se calculan las relaciones r_+ y r_- correspondientes a ambas polaridades.

(R10k, T100k) ____ $r_1 = T100k/P10k$
 (T100k, 1MA) ____ $r_2 = 1MA/T100k$
 (T100k, 1MB) ____ $r_3 = 1MB/T100k$
 (1MA, 1MB) ____ $r_4 = 1MB/1MA$
 (1MB, 1MA) ____ $r_5 = 1MA/1MB$

siendo r_1 , r_2 , r_3 el promedio para ambas polaridades de las relaciones 1:10 y r_4 , r_5 para las relaciones 1:1. Luego se toman d_i igual las diferencias de las r_i con respecto a su valor nominal

$$d_1 = 10 - r_1$$

$$d_2 = 10 - r_2$$

$$d_3 = 10 - r_3$$

$$d_4 = 1 - r_4$$

$$d_5 = 1 - r_5$$

que tendrán igual incertidumbre que las r_i .

Los coeficientes de sensibilidad típicos para las variables V_1 , V_2 , Eq_1 , Eq_2 , 0_i , 0_f y V_L en cada polaridad resultan:

$c()$	d_4, d_5 [1/V]	d_1, d_2, d_3 [1/V]
V_1	0.06	0.5
V_2	0.04	0.6
Eq_1	0.1	7
Eq_2	0.1	7
0_i	0.1	6
0_f	0.1	6
V_L	0.1	10

PEE44: Julio 2012

y las incertidumbres típicas de las variables, que incluyen las de tipo B y las estadísticas:

u() (k=1)	Relación 1:1 [V]	Relación 1:10 [V]
V ₁	0.5 · 10 ⁻⁶	0.5 · 10 ⁻⁶
V ₂	0.5 · 10 ⁻⁶	0.5 · 10 ⁻⁶
Eq ₁	1 · 10 ⁻⁷	1 · 10 ⁻⁷
Eq ₂	1 · 10 ⁻⁷	1 · 10 ⁻⁷
O _i	1 · 10 ⁻⁷	1 · 10 ⁻⁷
O _f	1 · 10 ⁻⁷	1 · 10 ⁻⁷
VL	7 · 10 ⁻⁶	1.6 · 10 ⁻⁶

Se agregan dos ecuaciones más que consideran la posible variación en el valor del resistor de transferencia por un cambio Δ entre la temperatura de calibración (paso 1) y la de uso (pasos 2 y 3), con coeficiente de variación de resistencia por temperatura α , y la de variación Γ entre la tensión de calibración (paso 1) y la aplicada en los pasos 2 y 3 (con coeficiente β).

Luego el sistema de ecuaciones sobredeterminado se expresa como:

$$\begin{pmatrix} -(10-d_1) & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -(1+\alpha\Delta) & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -(1+\beta\Gamma) & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -(10-d_2) & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -(10-d_3) & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -(1-d_4) & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & (1-d_1) \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} R10k \\ T100k \\ T100k' \\ T100k'' \\ 1MA \\ 1MB \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ R10k \end{pmatrix}$$

La expresión para los valores de los resistores incógnita R1MA y R1MB obtenida por resolución del sistema, despreciando los términos de segundo orden y mayores de d_1 , d_2 , d_3 , d_4 , d_5 , Δ y Γ resulta:

$$1MA = (100 + 10.d_1 + 6.d_2 + 4d_3 - 20.d_4 + 20.d_5 + 100.\alpha\Delta + 100.\beta\Gamma).R10k$$

$$1MB = (100 + 10.d_1 + 4.d_2 + 6d_3 + 20.d_4 - 20.d_5 + 100.\alpha\Delta + 100.\beta\Gamma).R10k$$

para estas ecuaciones, los coeficientes de sensibilidad con sus valores típicos para el caso de 1MA son:

$$\frac{\partial 1MA}{\partial d_1} = 10.R10k \approx .100000 \Omega$$

$$\frac{\partial 1MA}{\partial d_2} = 6.R10k \approx 60000 \Omega$$

$$\frac{\partial 1MA}{\partial d_3} = 4.R10k \approx 40000 \Omega$$

$$\frac{\partial 1MA}{\partial d_4} = -20.R10k \approx -200000 \Omega$$

PEE44: Julio 2012

$$\frac{\partial 1MA}{\partial d_5} = 20.R10k \approx 200000 \Omega$$

$$\frac{\partial 1MA}{\partial \Delta} = 100.\alpha.R10k \approx 0.5 \Omega/^{\circ}C$$

$$\frac{\partial 1MA}{\partial \Gamma} = 100.\beta 00.\beta. \approx 0.05 \Omega/V$$

En forma similar se calculan los coeficientes de sensibilidad para 1MB

Balance de incertidumbre

Medición de 1 MΩ

Fuente de incert.	C _i	u _i	Distrib.	Factor	n _i	c _i *u _i	Contrib.	Porcent.
Rx temperatura	8.60E-01 Ω/°C	5.00E-01 °C	r	1.0	100	4.30E-01 Ω	1.85E-01	11.62
10:1 rel una polaridad						4.41E-06	1.94E-11	
V2	0.60 1/V	6.00E-06 V	n	2.0	100	1.80E-06	3.24E-12	
V1	0.50 1/V	6.00E-06 V	n	2.0	100	1.50E-06	2.25E-12	
Eq2(*)	7.00 1/V	1.00E-07 V	n	1.0	100	7.00E-07	4.90E-13	
Eq1(*)	7.00 1/V	1.00E-07 V	n	1.0	100	7.00E-07	4.90E-13	
0i(*)	6.00 1/V	1.00E-07 V	n	1.0	100	6.00E-07	3.60E-13	
0f(*)	6.00 1/V	1.00E-07 V	n	1.0	100	6.00E-07	3.60E-13	
VL	10.00 1/V	7.00E-07 V	n	2.0	100	3.50E-06	1.23E-11	
1:1 rel						3.70E-07	1.37E-13	
V2	0.04 1/V	6.00E-06 V	n	2.0	100	1.20E-07	1.44E-14	
V1	0.06 1/V	6.00E-06 V	n	2.0	100	1.80E-07	3.24E-14	
Eq2(*)	0.10 1/V	1.00E-07 V	n	1.0	100	1.00E-08	1.00E-16	
Eq1(*)	0.10 1/V	1.00E-07 V	n	1.0	100	1.00E-08	1.00E-16	
0i(*)	0.10 1/V	1.00E-07 V	n	1.0	100	1.00E-08	1.00E-16	
0f(*)	0.10 1/V	1.00E-07 V	n	1.0	100	1.00E-08	1.00E-16	
VL	0.10 1/V	6.00E-06 V	n	2.0	100	3.00E-07	9.00E-14	
calcul cuadr min						6.38E-01	4.07E-01	25.55
d1M/d1	1.00E+05 Ω	4.41E-06	n	1.0	100	4.41E-01 Ω	1.94E-01	
d1M/d2	6.00E+04 Ω	4.41E-06	n	1.0	100	2.65E-01 Ω	7.00E-02	
d1M/d3	4.00E+04 Ω	4.41E-06	n	1.0	100	1.76E-01 Ω	3.11E-02	
d1M/d4	-2.00E+05 Ω	3.70E-07	n	1.0	100	-7.41E-02 Ω	5.49E-03	
d1M/d5	2.00E+05 Ω	3.70E-07	n	1.0	100	7.41E-02 Ω	5.49E-03	
d1M/delta	5.00E-01 Ω/°C	5.00E-01 °C	r	1.7	100	1.44E-01 Ω	2.08E-02	
d1M/gamma	5.00E-02 V/Ω	9.00E+00 V	r	1.7	100	2.60E-01 Ω	6.75E-02	
d1M/R10k	1.00E+02	1.09E-03 Ω	n	1.0	100	1.09E-01 Ω	1.18E-02	
R10k cal	1.00E+00	2.00E-03 Ω	n	2.0	100	1.00E-03 Ω	1.00E-06	
R10k temp	-8.48E-04 Ω/°C	5.00E-01 °C	r	1.0	100	-4.24E-04 Ω	1.80E-07	
Desv. St típica cuadr min	1.00E+00	1.00E+00 Ω	n	1.0	5	1.00E+00 Ω	1.00E+00	62.83
Incertidumbre combinada N (1s)						1.26E+00 Ω	1.59E+00	100.00
Incertidumbre expandida (k=2)						2.52E+00 Ω		
Incertidumbre relativa 1MA, 1MB						2.52E-06		

7. Identificación y almacenamiento

Los resistores a ser calibrados son identificados de acuerdo con las instrucciones del Manual de Calidad del INTI - Física y Metrología y mantenidos, desde el momento de su llegada, en el Laboratorio de Patrones Cuánticos, ver Capítulo 9 del MC. Una vez calibrados, los resistores son mantenidos en el mismo laboratorio hasta ser devueltos al cliente.

8. Instrumentos utilizados

- Electrómetro Keithley Modelo 614, N°456635
- Multímetro digital Hewlett-Packard 34420A N° US36001616 y N° US36002178
- Multímetro digital Agilent 34420A N° 36002419 y N° MY42001298

PEE44: Julio 2012

- Multímetro digital Hewlett-Packard 3458A N° 2823A 11565, N° 2823A 11567, N° 2823A 22086 y N° 2823A 25774
- Multímetro digital Agilent 3458A N° US28033200
- Caja de resistores por décadas (GR), General Radio mod. 1433F, N°1172
- Caja de resistores (B), de construcción propia, N°B44
- Caja de transferencia Hamon ESI SR1050, valor nominal 1 MΩ/paso, N° 128002
- Caja de transferencia Hamon ESI SR1050, valor nominal 10 MΩ/paso, N° 134005
- Termo higrómetro digital TFA, N° EL3
- Termómetro e Hidrómetro digital HT 3003, N° 331969
- Termorresistencia de platino TR013-RES1
- Termorresistencia de platino TR07
- Resistores patrón, pertenecientes al grupo de resistores patrón del INTI, de valores nominales comprendidos en el rango 10 kΩ - 1 TΩ
- Calibrador Fluke 5700A, N° 6375303
- Calibrador Fluke 5720A, N° 9010208
- Referencia de tensión continua (zener) Fluke 732B, N° 6215015
- Referencia de tensión continua (zener) Fluke 732B, N° 7598804

9. Condiciones ambientales

Durante la medición y, al menos en las tres horas previas a la misma, la temperatura ambiente de laboratorio deberá ser de $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$ y la humedad relativa ambiente estar comprendida entre 40 % y 70 %.

10. Registros de la calidad

Las notas y observaciones originales tomadas manualmente, original o copia de salidas de software (si resulta aplicable), copia de los certificados emitidos y copia de la orden de trabajo, registros de salida de instrumentos y otros documentos relacionados, son mantenidos de acuerdo con el Manual de Calidad del INTI - Física y Metrología, Capítulo 11.

11. Precauciones

De acuerdo con las provisiones del Decreto 937/74, Artículo 1, Sección d, esta es considerada tarea riesgosa. Por lo tanto deberán ser tomadas las precauciones necesarias para evitar shock eléctrico. Las operaciones de cambio de conexiones deben ser efectuadas con los circuitos de tensión y corriente desconectados.

12. Apéndices y anexos

No aplicable.