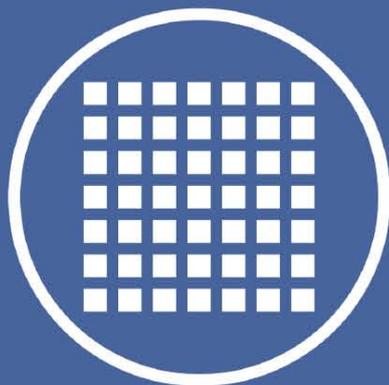


Copia No Controlada

Instituto Nacional  
de Tecnología Industrial

Centro de Desarrollo e Investigación  
en Física y Metrología



**INTI**



Procedimiento específico: PEE21

## **CALIBRACIÓN DE PATRONES DE TRANSFERENCIA DE TENSIÓN AC-DC**

Revisión: Agosto 2017

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.



PEE21 Índice: Agosto 2017

NOMBRE DEL CAPÍTULO	REVISIÓN
Índice	Agosto 2017
CALIBRACIÓN DE PATRONES DE TRANSFERENCIA DE TENSIÓN AC-DC	Agosto 2017

PREPARADO POR

FIRMA Y SELLO  
DAVID J. GALLERÍA  
U. T. ELECTRICIDAD  
FÍSICA Y METROLOGÍA  
INTI

REVISADO POR

FIRMA Y SELLO

Lic. LUCAS D. DI LILLO  
COORD. 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

PEE21: Agosto 2017

**1. Objetivo**

Establecer los métodos de calibración para patrones de transferencia de tensión AC-DC.

**2. Alcance**

Patrones de transferencia de tensión AC-DC, dentro de los siguientes rangos:

Tensión: 0,1 V ... 1 V; frecuencia: 10 Hz ... 1 MHz  
 Tensión: 10 V ... 1000 V; frecuencia: 10 Hz ... 100 kHz  
 Forma de onda = sinusoidal.

**3. Definiciones y abreviaturas**

Se encuentran en el Apéndice 1, en el Manual de la Calidad y en el Plan de la Calidad.

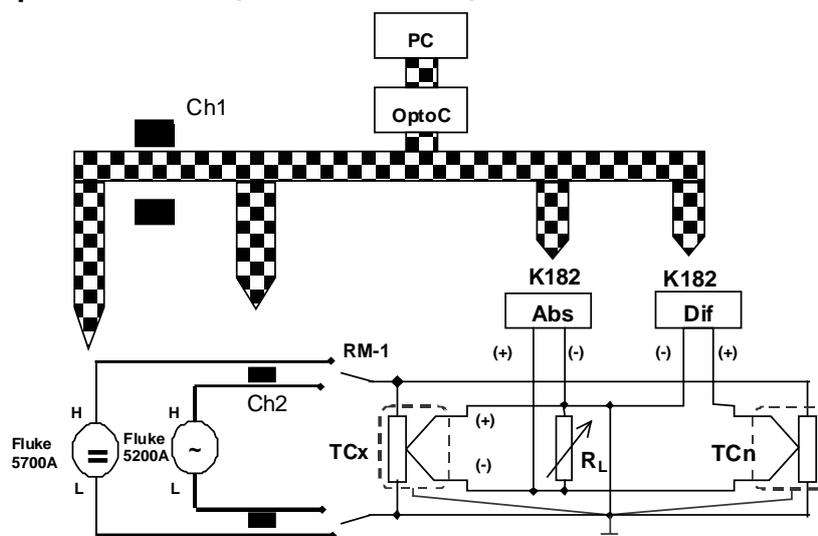
**4. Referencias**

Ver Apéndice 1.

**5. Responsabilidades**

Los técnicos del laboratorio de transferencia AC-DC en la ejecución de las calibraciones.

El Coordinador de la UT Electricidad supervisa las calibraciones, verifica que se siguen los procedimientos y comprueba los resultados.

**6. Instrucciones****6.1. Descripción del sistema (Método diferencial)**

Fluke 5700A = Calibrador Fluke 5700A

Fluke 5200A = Calibrador de CA Fluke 5200A

RM-1 = Reles de mercurio controlados por computadora.

Ch1, Ch2 = Bobinas coaxiales.

TCx = Conversor térmico incógnita.

TCn = Conversor térmico patrón.

RL = Resistor de carga.

K182 = Nanovoltímetro Keithley 182.

OptoC = Opto acoplador IOTECH.

PEE21: Agosto 2017

1. Notas:
2.  $R_i$  carga la salida del conversor térmico con una tensión de salida mayor para la tensión de entrada del ensayo.
3. Si la tensión de ensayo es mayor que 100 V, se conecta un amplificador de tensión FLUKE 5205 después de la llave RM-1.
4. Las guardas de los calibradores se conectan a tierra externamente.
5. Cuando se utiliza el amplificador de tensión FLUKE 5205, el conector de salida LOW del panel frontal debe estar abierto y el conector GROUND conectado a la tierra común de medición.
6. La llave RM-1 puede ser controlada por IEE488 o por RS-232
7. El calibrador Fluke 5700A y puede ser reemplazado por el calibrador Fluke 5720A.
8. El borne de guarda del calibrador Fluke 5700A debe estar conectado al borne de tierra y a tierra de medición.
9. Un capacitor de  $2,2 \mu\text{F}$  es conectado a la salida de los termocouplers. Para dicho fin, el Laboratorio posee dos cajas metálicas con terminales Twin-UHF en cuyo interior se encuentran los capacitores. De cada una de las cajas sale un cable que debe ser conectado a tierra
10. El funcionamiento del sistema es totalmente automático, mediante una PC, utilizando un programa dedicado (TENSION.vi). El único paso manual es el ajuste inicial de  $R_i$ . Ésta debe ajustarse hasta que la lectura de Dif K182 sea  $5 \cdot 10^{-3}$  veces la lectura de Abs. K182. El programa establece para el nanovoltímetro:
  - a. SLOW para el filtro digital y ON para el filtro analógico, si la frecuencia de medición es menor que 40 Hz.
  - b. MEDIUM para el filtro digital y ON para el filtro analógico, si la frecuencia de medición es mayor o igual que 40 Hz.

### Incertidumbre: Modelo Matemático y Balance de Incertidumbre Modelo Matemático

$$\delta_x = \delta_d + \delta_s \quad (1)$$

donde  $\delta_s$  es la diferencia del patrón de transferencia AC-DC de tensión y  $\delta_d$  es la diferencia calculada como:

$$\delta_d = \frac{1}{n_s \cdot U_{odcx}} \cdot ((U_{oacs} - U_{oacx}) - (U_{odcs} - U_{odcx})) \quad (2)$$

$n_s$  es el exponente del patrón,  $U_{odcx}$  y  $U_{oacx}$  son las tensiones de salida de la incógnita y  $U_{odcs}$  y  $U_{oacs}$  las tensiones de salida del patrón, con tensión de entrada tanto en CC como en CA.

### Balance de Incertidumbre

De acuerdo con la ecuación (1), la incertidumbre combinada en la determinación de  $\delta_x$  es

$$u^2(\delta_x) = u^2(\delta_s) + u^2(\delta_d) \quad (3)$$

$$u_c^2(\delta_d) = \left( \frac{U_{dif_{ac}} - U_{dif_{dc}}}{U_{odcx} \cdot n_s} \right)^2 \cdot u^2(n_s) + \left( \frac{U_{dif_{ac}} - U_{dif_{dc}}}{n_s \cdot U_{odcx}^2} \right)^2 \cdot u^2(U_{odcx}) + \left( \frac{1}{n_s \cdot U_{odcx}} \right)^2 \cdot (u(U_{dif_{ac}}) - u(U_{dif_{dc}}))^2 + u^2(C) \quad (4)$$

PEE21: Agosto 2017

**Cálculo de  $u(\delta_s)$** 

$$u^2(\delta_s) = u^2(\delta_{pat}) + u^2(\delta_{step}) + u^2(\delta_{conexionado}) + u^2(\delta_{TK}) + u^2(\delta_{nivel}) \quad (12)$$

donde  $u^2(\delta_{pat})$  es la incertidumbre del patrón,  $u^2(\delta_{step})$  es la incertidumbre del ajuste por cuadrados mínimos,  $u^2(\delta_{conexionado})$  es la incertidumbre debida al conexionado de cables y adaptadores,  $u^2(\delta_{TK})$  es la incertidumbre debido al coeficiente térmico de la incógnita,  $u^2(\delta_{nivel})$  es la incertidumbre debido a la utilización del patrón fuera de su rango de calibración.

Como ejemplo, se muestran los cálculos para la calibración de un PTMJC, a 3 V @ 1 kHz, utilizando sólo un patrón:

Ejemplo : 3 V; 1 kHz

2 PMJTCs:  $U_{odc} = 0,1$  V;  $U_{dif_{dc}} - U_{dif_{ac}} = 0,1$  mV

Fuente de incertidumbre	Símbolo	$C_1^{(1)}$	Valor ( $\pm$ )	Distribución <sup>(2)</sup>	Factor	$v_i^{(3)}$	$C_1^2 \cdot u_i^2$
Incertidumbre del patrón	$\delta_s$	1	2,00E-06	n	2,0	50	1,00E-12
Tipo A <sup>(1)</sup>	$e_A$	1	3,0E-07	n	2,0	11	2,25E-14
Exponente del patrón	$n_s$	5,0E-06	1,0E-02	n	2,0	50	6,25E-16
Tensión absoluta	$U_{odcx}$	5,0E-04 V <sup>-1</sup>	5,0E-07 V	r	1,7	50	2,08E-20
Linealidad del Dif-K182	$U_{dif_{dc}}, U_{dif_{ac}}$	5 V <sup>-1</sup>	2,0E-08 V	n	2,0	50	2,50E-15
Término de corrección	$C$	1	1,0E-07	n	2,0	50	2,50E-15
<b>Incertidumbre combinada</b>	<b><math>u_c</math></b>			<b>N (1<math>\sigma</math>)</b>		inf	1,01E-06
<b>Incertidumbre expandida (k=2)</b>	<b>U</b>			<b>N (95%)</b>	2,0		<b><math>\pm 2</math> <math>\mu</math>V/V</b>

<sup>(1)</sup> desviación estándar de la media típica para un PMJTC como incógnita..

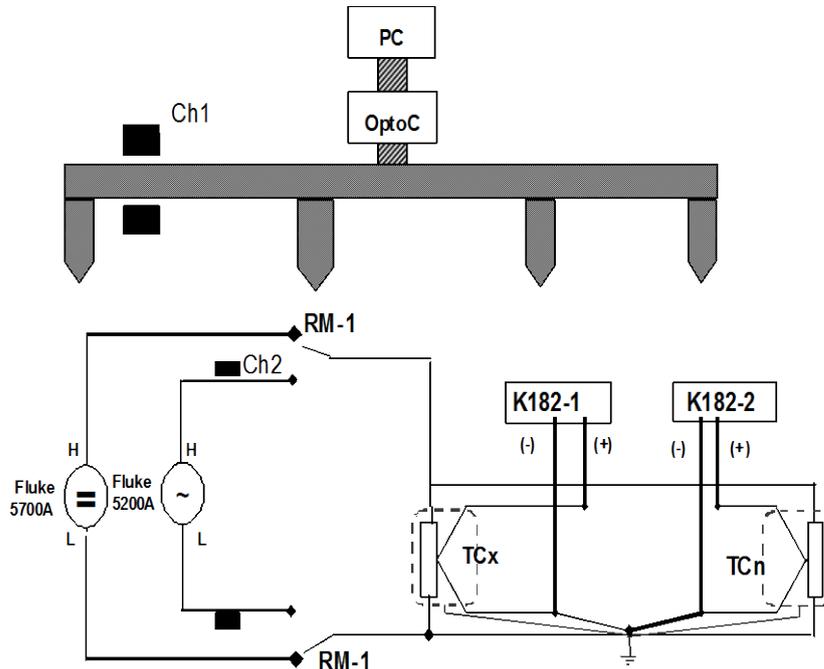
Con este procedimiento, la incertidumbre mínima obtenible en tensión y frecuencia para el Conversor Térmico de un cliente es:

Rango de tensión en V	Frecuencia en kHz														
	0,01	0,02	0,03	0,04	0,5	1	10	20	50	70	100	200	500	700	1000
0,1...0,4	5	5	5	5	5	5	5	5	8	15	20	25	30	40	50
0,5...3	5	4	3	2	2	2	2	3	5	8	12	15	25	30	40
3,5...10	5	4	4	3	3	3	4	5	8	12	15	17	26	35	50
11...30	8	6	6	4	4	4	6	6	12	15	20				
31...100	10	10	10	8	8	8	10	12	15	20	25				
110...300	14	12	12	10	10	10	12	15	18	22	30				
310...700	18	16	15	12	12	12	12	15	20	25	35				
700...1000	20	18	15	15	15	15	15	20	25	35	50				

En el Apéndice 1 se muestra como puede mejorarse la precisión de calibración mediante la utilización de esquemas con más de un patrón.

PEE21: Agosto 2017

## 6.2. Descripción del sistema (Método 2 canales)



Fluke 5700A = Calibrador Fluke 5700A

Fluke 5200A = Calibrador de CA Fluke 5200A

RM-1 = Relés de mercurio controlados por computadora.

Ch1, Ch2 = Bobinas coaxiales.

TCx = Conversor térmico incógnita.

TCn = Conversor térmico patrón.

K182-1 = Nanovoltímetro Keithley 182

K182-2 = Nanovoltímetro Keithley 182.

OptoC = Opto acoplador IOTECH.

Notas:

Si la tensión de ensayo es mayor que 100 V, se conecta un amplificador de tensión FLUKE 5205 después de la llave RM-1.

- Las guardas de los calibradores se conectan a tierra externamente.
- Cuando se utiliza el amplificador de tensión FLUKE 5205, el conector de salida LOW del panel frontal debe estar abierto y el conector GROUND conectado a la tierra común de medición.
- La llave RM-1 puede ser controlada por IEE488 o por RS-232
- El calibrador Fluke 5700A puede ser reemplazado por el calibrador Fluke 5720A.
- El borne de guarda del calibrador Fluke 5700A debe estar conectado al borne de tierra y a tierra de medición.
- Un capacitor de  $2,2 \mu\text{F}$  es conectado a la salida de los termoconvertidores. Para dicho fin, el Laboratorio posee dos cajas metálicas con terminales Twin-UHF en cuyo interior se encuentran los capacitores. De cada una de las cajas sale un cable que debe ser conectado a tierra
- En el caso de calibrar un Fluke 5790, no es necesario conectar el K182-2 de la figura. Las lecturas de tensiones se realizan directamente con el Fluke 5790.

El funcionamiento del sistema es totalmente automático, mediante una PC, utilizando un programa dedicado (TENSION.vi). El programa establece para el nanovoltímetro:

PEE21: Agosto 2017

- SLOW para el filtro digital y ON para el filtro analógico, si la frecuencia de medición es menor que 40 Hz.
- MEDIUM para el filtro digital y ON para el filtro analógico, si la frecuencia de medición es mayor o igual que 40 Hz.

### 1.1.1.1. Modelo matemático

La diferencia  $\delta_x$  de transferencia AC-DC de tensión para la incógnita puede calcularse como:

$$\delta_x = \delta_d + \delta_s \quad (5)$$

donde  $\delta_s$  es la diferencia de transferencia AC-DC de tensión para el patrón y  $\delta_d$  es la diferencia calculada como:

$$\delta_d = \frac{(U_{odcx} - U_{oacx})}{n_x \cdot U_{odcx}} - \frac{(U_{odcs} - U_{oacs})}{n_s \cdot U_{odcs}} \quad (6)$$

donde  $U_{odcx}$  y  $U_{oacx}$  son las tensiones de salida de la incógnita cuando tensiones continua y alterna son aplicadas,  $U_{odcs}$  y  $U_{oacs}$  son las tensiones de salida del patrón cuando tensiones continua y alterna son aplicadas,  $n_s$  es el coeficiente correspondiente al patrón y  $n_x$  es el coeficiente correspondiente a la incógnita.

### Balance de incertidumbre

De acuerdo con la ecuación (5), la incertidumbre combinada en la determinación de  $\delta_x$  es

$$u^2(\delta_x) = u^2(\delta_d) + u^2(\delta_s) \quad (7)$$

donde  $u^2(\delta_s)$  es la incertidumbre del patrón y  $u^2(\delta_d)$  es la incertidumbre de la medición.

### Cálculo de $u(\delta_d)$

$$u^2(\delta_d) = u^2(\delta_A) + u^2(\delta_C) \quad (8)$$

donde

$u(\delta_A)$  = es la incertidumbre de tipo A. Es la desviación estándar de las mediciones y

$u(\delta_C)$  = es la incertidumbre del sistema de medición.

### Cálculo de $u(\delta_C)$

$$u^2(\delta_C) = \left( -\frac{1}{n_x^2} \right)^2 \cdot u^2(n_x) - \left( \frac{U_{oacx}}{n_x \cdot U_{odcx}} \right)^2 \cdot u^2(n_x) - \left( \frac{1}{n_x \cdot U_{odcx}} \right)^2 \cdot u^2(U_{oacx}) - \left( \frac{U_{oacx}}{n_x \cdot U_{odcx}^2} \right)^2 \cdot u^2(U_{odcx}) \\ - \left( -\frac{1}{n_s^2} \right)^2 \cdot u^2(n_s) - \left( \frac{U_{oacs}}{n_s \cdot U_{odcs}} \right)^2 \cdot u^2(n_s) - \left( \frac{1}{n_s \cdot U_{odcs}} \right)^2 \cdot u^2(U_{oacs}) - \left( \frac{U_{oacs}}{n_s \cdot U_{odcs}^2} \right)^2 \cdot u^2(U_{odcs}) \quad (9)$$

Suponiendo que  $U_{oacx} \cong U_{odcx}$  y  $U_{oacs} \cong U_{odcs}$ , resulta que

$u^2(U_{oacx}) \cong u^2(U_{odcx})$  y que  $u^2(U_{oacs}) \cong u^2(U_{odcs})$  con lo cual, la ecuación (9)

queda la siguiente forma

PEE21: Agosto 2017

$$\begin{aligned}
u^2(\delta_c) = & \left(\frac{1}{n_x^2}\right)^2 \cdot u^2(n_x) - \left(\frac{U_{0acx}}{n_x \cdot U_{0dcx}}\right)^2 \cdot u^2(n_x) - \left(\frac{1}{n_x^2 \cdot U_{0dcx}^2}\right) [u^2(U_{0dcx}) - u^2(U_{0acx})] \\
& - \left(\frac{1}{n_s^2}\right)^2 \cdot u^2(n_s) - \left(\frac{U_{0acs}}{n_s \cdot U_{0dcs}}\right)^2 \cdot u^2(n_s) - \left(\frac{1}{n_s^2 \cdot U_{0dcs}^2}\right) [u^2(U_{0dcs}) - u^2(U_{0acs})]
\end{aligned} \tag{10}$$

Como los términos  $[u^2(U_{0dcx}) - u^2(U_{0acx})]$  y  $[u^2(U_{0dcs}) - u^2(U_{0acs})]$  son diferencias de tensiones que son medidas con un intervalo temporal de 60 s, representan la estabilidad y linealidad de los instrumentos con los que se las mide.

Resumiendo, la incertidumbre de la medición es,

$$u^2(\delta_d) = u^2(\delta_A) + u^2(\delta_{n-pat}) + u^2(\delta_{n-inc}) + u^2(\delta_{182-1}) + u^2(\delta_{182-2}) \tag{11}$$

donde  $u^2(\delta_A)$  es el desvío estándar de las mediciones,  $u^2(\delta_{n-pat})$  es la incertidumbre en la determinación del coeficiente n del patrón,  $u^2(\delta_{n-inc})$  es la incertidumbre en la determinación del coeficiente n de la incógnita,  $u^2(\delta_{182-1})$  es la incertidumbre asociada a la estabilidad y a la linealidad del nanovoltímetro Keithley 182 que mide la salida de tensión del patrón,  $u^2(\delta_{182-2})$  es la incertidumbre asociada a la estabilidad y a la linealidad del nanovoltímetro Keithley 182 que mide la salida de tensión de la incógnita

### Cálculo de $u(\delta_s)$

$$u^2(\delta_s) = u^2(\delta_{pat}) + u^2(\delta_{step}) + u^2(\delta_{conexionado}) + u^2(\delta_{TK}) + u^2(\delta_{nivel}) \tag{12}$$

donde  $u^2(\delta_{pat})$  es la incertidumbre del patrón,  $u^2(\delta_{step})$  es la incertidumbre del ajuste por cuadrados mínimos,  $u^2(\delta_{conexionado})$  es la incertidumbre debida al conexionado de cables y adaptadores,  $u^2(\delta_{TK})$  es la incertidumbre debido al coeficiente térmico de la incógnita,  $u^2(\delta_{nivel})$  es la incertidumbre debido a la utilización del patrón fuera de su rango de calibración.

Resumiendo, la incertidumbre en la medición de la diferencia AC-DC de un termoconversor utilizando el método de 2 canales es:

PEE21: Agosto 2017

$$u^2(\delta_x) = u^2(\delta_A) + u^2(\delta_{n-pot}) + u^2(\delta_{n-inc}) + u^2(\delta_{182-1}) + u^2(\delta_{182-2}) + u^2(\delta_{pat}) + u^2(\delta_{step}) + u^2(\delta_{conexionado}) + u^2(\delta_{TK}) + u^2(\delta_{nivel}) \quad (13)$$

Con este procedimiento, la menor incertidumbre total alcanzable en tensión y frecuencia, para un buen Conversor Térmico de cliente es:

Rango de tensión en V	Frecuencia en kHz														
	0,01	0,02	0,03	0,04	0,5	1	10	20	50	70	100	200	500	700	1000
0,1...0,4	5	5	5	5	5	5	5	5	8	15	20	25	30	40	50
0,5...3	5	4	3	2	2	2	2	3	5	8	12	15	25	30	40
3,5...10	5	4	4	3	3	3	4	5	8	12	15	17	26	35	50
11...30	8	6	6	4	4	4	6	6	12	15	20				
31...100	10	10	10	8	8	8	10	12	15	20	25				
110...300	14	12	12	10	10	10	12	15	18	22	30				
310...700	18	16	15	12	12	12	12	15	20	25	35				
700...1000	20	18	15	15	15	15	15	20	25	35	50				

## 7. Identificación y almacenaje

Los conversores patrón a calibrarse se identifican de acuerdo a las instrucciones del Manual de la Calidad del INTI - Física y Metrología, capítulo 10 guardándose, desde el momento de su ingreso hasta que, una vez calibrados, son devueltos al cliente, en el Área de transferencia AC-DC, laboratorio N° 2.

## 8. Instrumentos a utilizarse

- Calibrador de CA Fluke 5200A, # 0645023.
- Interruptor automático RM-1, # 001.
- Amplificador de tensión Fluke 5205A, # 6325001.
- Nanovoltímetro Keithley 182, # 517684.
- Nanovoltímetro Keithley 182, # 0574079.
- Fluke 5205A, Serial # 2885005, voltage amplifier.
- Multímetro Agilent 3458A, #US280-3320
- Calibrador Fluke 5700A, #7215002
- Calibrador Fluke 5720A, #9010208
- Conjunto de conversores térmicos de tensión patrones, listados en la tabla que sigue:

Tensión (V)	Patrón	Tensión (V)	Patrón
0.2	PMJTC-90 Ω	20	R1k9+230-90 Ω
1.5	230-90 Ω		R10k+180-2
	PMJTC-180 Ω	30	R30Vp+TVCP
	230-383 Ω	60	IR60V+ITVC1
	211/8-900 Ω	100	R10k+180-2
3	211/8-900 Ω	120	IR120V+TVCP
	R3Vp+ITVCp	300	R72k+ITVC1

PEE21: Agosto 2017

Tensión (V)	Patrón	Tensión (V)	Patrón
	ITVC3V		R72k+230-383
	IR6V+ITVC1		PR100k+180-2
	R660+PMJTC-90 $\Omega$		R1000Vs2+ITVC1
6	IR6V+ITVC1	500	R200k+TVC2
	R660+PMJTC-90 $\Omega$		PR100k+180-2
	IR6VI+ITCC1	700	PR100k+180-2
	R10Vp+TVCp		R1000Vs2+ITVC1
10	R660+PMJTC-90 $\Omega$	1000	R200k+TVC2
	R10Vp+TVCp		PR100k+180-2
	IR6V+ITCC1		
	R1k9+230-90 $\Omega$		

PMTCs

### 9. Condiciones ambientales

Durante la medición, la variación de temperatura debe ser  $|\Delta T| \leq 2^\circ\text{C}$

### 10. Registros de la Calidad

Las notas y observaciones escritas originales, copia u originales de las salidas de computadora (cuando corresponda), copia de los certificados emitidos, como así también copia de la orden de trabajo, registro de salida de instrumentos y toda otra documentación relacionada, se conservan de acuerdo al capítulo 12 del Manual de la Calidad del INTI - Física y Metrología.

### 11. Precauciones

Según lo previsto en el decreto 937/74, artículo 1, sección d, es considerada ésta una tarea riesgosa. Por tanto, deben tomarse las precauciones necesarias para evitar el shock eléctrico.

Las operaciones de cambio de conexión deben llevarse a cabo con todos los circuitos de tensión y corriente desconectados.

### 12. Apéndices y anexos

APÉNDICE N°	TÍTULO
1	Sistema de calibración de transferencia AC-DC

PEE21: Agosto 2017

### Sistema de calibración de transferencia AC-DC

El sistema de transferencia AC-DC de tensión está basado en el diagrama de la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Para 1,5 V, cuatro conversores térmicos multijuntura de película delgada del PTB (PMJTCs), [1] [2], constituyen la base del sistema. En este procedimiento de pasos ascendentes, la única suposición que se hace es que la diferencia de transferencia AC-DC para cada patrón permanece constante a lo largo de todo su rango de tensión, desde la baja tensión a la cual es calibrado contra un patrón vecino hasta la tensión nominal más alta. Para bajas frecuencias, el nuevo diseño LF [3] está compensado independizándolo del nivel, satisfaciendo el requerimiento. A frecuencias y tensiones mayores, esta suposición requiere de un análisis cuidadoso. La alta sensibilidad del PMJTC permite grandes pasos en este procedimiento de calibración por pasos ascendentes, con muchos pasos intermedios, lo cual desemboca en un sistema sobre-determinado para verificar la validez de las suposiciones utilizadas en el proceso de subida, disminuyendo la incertidumbre.

#### 1. Diferencias de la transferencia AC-DC para el conjunto básico a 1,5 V

Las diferencias de transferencia AC-DC para cada PMJTC del sistema básico a 1,5 V, se determinan por tres caminos diferentes, dependiendo del rango de frecuencia.

##### a. Frecuencias bajas ( $10 \text{ Hz} \leq f \leq 100 \text{ Hz}$ )

A estas bajas frecuencias, la diferencia de transferencia AC-DC para cada PMJTC se determina individualmente, utilizando como patrón un LF PMJTC, con diferencia despreciable de transferencia AC-DC [3].

##### b. Frecuencias medias ( $100 \text{ Hz} < f \leq 20 \text{ kHz}$ )

A estas frecuencias, los cuatro PMJTC son comparados según el esquema mostrado en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

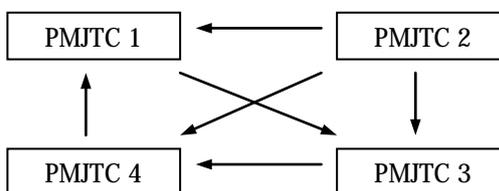


Figura 1

El valor medio de la diferencia de transferencia AC-DC para los cuatro PMJTC se considera nulo. En consecuencia, resulta el siguiente sistema de ecuaciones.

$$\begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \delta_3 \\ \delta_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \\ e \\ f \\ 0 \end{bmatrix} \quad (0.1)$$

$$\text{vale decir } [A] \cdot [\delta] = [B] \quad (0.2)$$

PEE21: Agosto 2017

donde  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$ ,  $e$  y  $f$  son las diferencias medidas de transferencia AC-DC. La mejor solución  $[\delta']$  se obtiene utilizando el método de cuadrados mínimos modificado. Se muestra que, en este método, la incertidumbre estadística de la comparación está incluida en el sistema. También se incluye en el cálculo de incertidumbre la falta de concordancia del proceso de ajuste.

### c. Frecuencias altas ( 20 kHz < f ≤ 1 MHz)

Para todas estas frecuencias se utiliza el valor asignado a cada PMJTC en una calibración contra patrones del PTB. Las comparaciones que se muestran en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se realizan también para dar cabida a los cálculos de incertidumbre involucrados con los conversores térmicos a éstas frecuencias. Por consiguiente, el sistema de ecuaciones resulta:

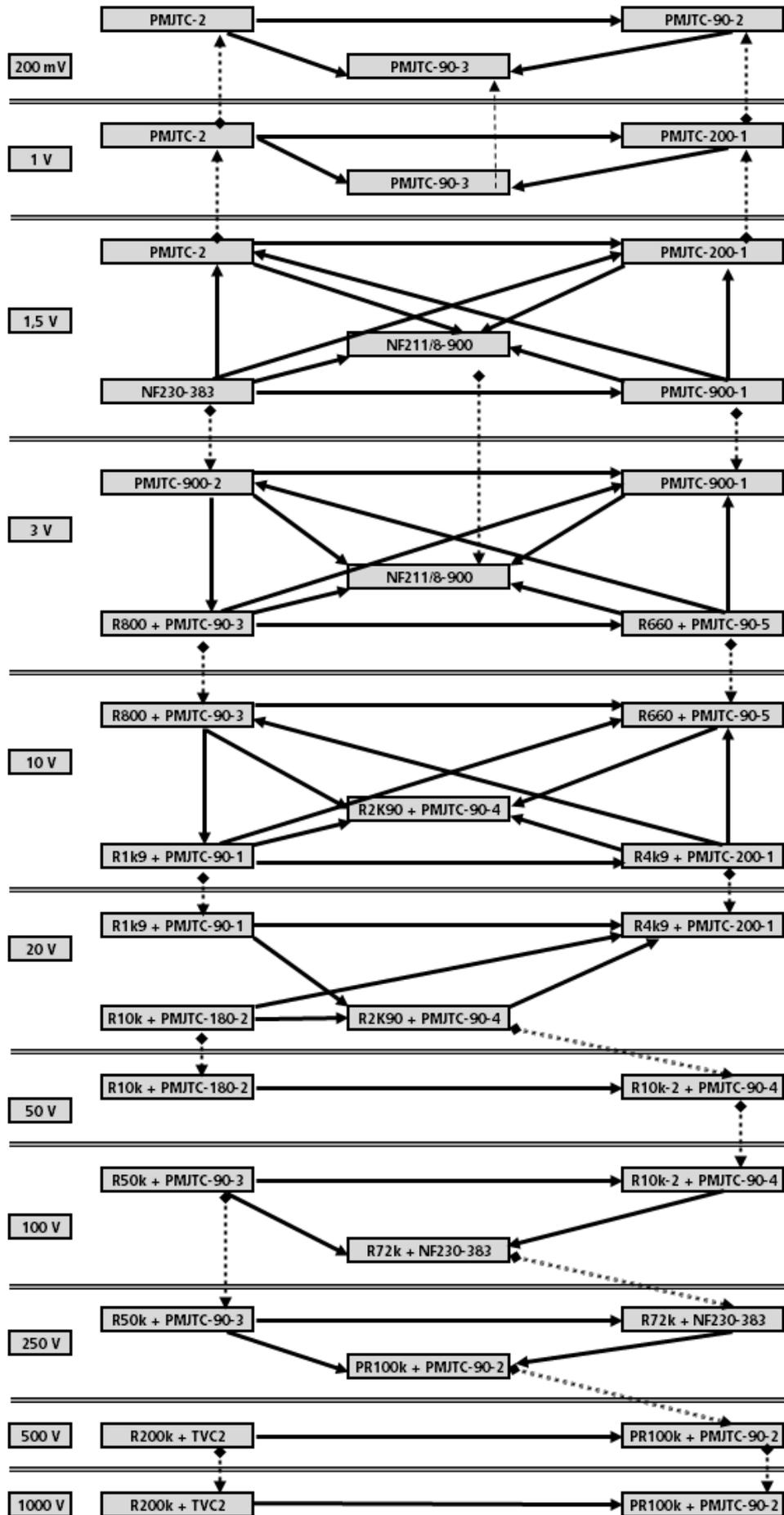
$$\begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \delta_3 \\ \delta_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \\ e \\ f \\ \delta_{1PTB} \\ \delta_{2PTB} \\ \delta_{2PTB} \\ \delta_{3PTB} \end{bmatrix} \quad (0.3)$$

## 2. Proceso de pasos ascendentes

### a. Tensiones hasta 250 V

Para todos los otros niveles de tensión se utiliza la misma idea que para 1,5 V. A frecuencias por debajo de los 100 Hz, los conversores térmicos se calibran contra el LF-PMJTC, con resistores de rango apropiados. Para frecuencias mayores, se forma un sistema en el cual se comparan los mismos conversores, tomándose como referencia más de uno de ellos calibrados a una tensión menor. Se asignan los valores para los nuevos conversores utilizando el método de los cuadrados mínimos. Para 6 V, por ejemplo, tenemos (ver el esquema de comparaciones de la

PEE21: Agosto 2017



PEE21: Agosto 2017

):

$$\begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \delta_{IR6V+ITVC1} \\ \delta_{R660+PMJTC-90} \\ \delta_{R10Vp+ITVCP} \\ \delta_{IR6VI+ITCC1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \\ e \\ f \\ \delta_{IR6V+ITVC1-LV} \\ \delta_{R660+PMJTC-90-LV} \end{bmatrix} \quad (0.4)$$

donde  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$ ,  $e$  y  $f$  son los resultados de las comparaciones y  $\delta_{k-LV}$  son los valores obtenidos para estos conversores térmicos a tensiones menores

### b. $U \geq 250$ V

Como patrón hasta 1000 V se utiliza un resistor plano de película delgada de 100 k $\Omega$  [4] junto con un PMJTC con  $R_H=180 \Omega$ . Se calibra a 250 V, suponiéndose independencia de la tensión. Se llevó a cabo un estudio de la influencia del blindaje en la dependencia de la tensión [4], con el fin de verificar esta hipótesis. Para calcular la incertidumbre de las comparaciones a estos niveles de tensión, se utilizan otros dos patrones,  $R_{1000Vs2+ITVC1}$  y  $R_{200k+TVCC2}$ , de acuerdo al método descrito más arriba.

### c. Cálculos de incertidumbre

En cada paso en el proceso de pasos ascendentes, deben sumarse las diferencias de transferencia medidas,  $\delta_d$ , y las diferencias de transferencia del patrón de referencia,  $\delta_s$  para obtener las diferencias de transferencia del patrón incógnita,  $\delta_x$ :

$$\delta_x = \delta_d + \delta_s \quad (0.5)$$

Se utiliza el método de las diferencias para medir,  $\delta_d$ . Con un nanovoltímetro se miden las diferencias de las tensiones de salida de ambos conversores y, con otro nanovoltímetro, se mide la tensión de salida de la incógnita (ver Figura 1 del PEE21),  $\delta_d$  puede evaluarse como

$$\delta_d = \frac{1}{n_s \cdot U_{odcx}} \cdot \left( (U_{oacs} - U_{oacx}) - (U_{odcs} - U_{odcx}) \right) - C \quad (0.6)$$

donde  $n_s$  es el exponente del patrón,  $U_{odcx}$  y  $U_{oacx}$  son las tensiones de salida de la incógnita y  $U_{odcs}$  y  $U_{oacs}$  las tensiones de salida del patrón, con tensiones de AC y DC respectivamente. El término de corrección C es:

$$C = \frac{1}{n_x} \cdot \frac{U_{oacx} - U_{odcx}}{U_{odcx}} \cdot \left( \frac{n_s - n_x}{n_x} + \frac{U_{odcs} - U_{odcx}}{U_{odcx}} + \frac{n_s - n_x}{n_x} \cdot \frac{U_{odcs} - U_{odcx}}{U_{odcx}} \right) \quad (0.7)$$

donde  $n_x$  es el exponente de la incógnita,  $\frac{U_{oacs} - U_{odcx}}{U_{odcx}}$  la diferencia relativa entre las tensiones de salida de la incógnita, con entrada de DC y AC (ajustada a  $< 20 \mu V/V$ ) y  $\frac{U_{odcs} - U_{odcx}}{U_{odcx}}$  es la diferencia relativa entre las tensiones de salida de ambos conversores en DC. Ésta se ajusta a  $< 5 \mu V/V$  por medio de un resistor variable, el cual carga la tensión de salida de aquel conversor que tiene la mayor.

### Balance de incertidumbre

A partir de (0.5) es necesario calcular la incertidumbre estándar  $u(d_x)$  de la incógnita, para cada paso de tensión en la cadena de pasos ascendentes, como

$$u^2(\delta_x) = u^2(\delta_s) + u^2(\delta_d) \quad (0.8)$$

## PEE21: Agosto 2017

A 1,5 V y por debajo de 100 Hz,  $u(d_x)$  es la incertidumbre estándar del LF PMJTC [3]. Entre 100 Hz y 20 kHz, la incertidumbre estándar de la media para las diferencias de transferencia AC-DC en los cuatro convertidores se considera nula (ver (0.1)). Por encima de 20 kHz se considera para  $u(d_x)$  la incertidumbre estándar obtenida en la calibración del PTB.

Para otros niveles de tensión, la incertidumbre estándar obtenida en el paso previo para el convertidor térmico que efectúa el salto se considera como  $u(d_s)$

La incertidumbre estándar  $u(d_d)$  de la diferencia medida entre ambos convertidores es:

$$u^2(\delta_d) = u_A^2(\delta_d) + u_C^2(\delta_d) + u_M^2(\delta_d) \quad (0.9)$$

donde

$u_A$  = incertidumbre estándar de tipo A. Es la desviación estándar de la media, calculada de un conjunto de determinaciones de  $\delta_d$

$u_C$  = incertidumbre estándar de la comparación, según la ecuación (0.6)

$u_M$  = incertidumbre estándar debida al método (esquema) utilizado para determinar la diferencia de transferencia del convertidor.

**Cálculo de  $u_c$** 

Podemos describir (0.6) como

$$\delta_d = \frac{1}{n_s \cdot U_{odcx}} \cdot (Udif_{ac} - Udif_{dc}) - C \quad (0.10)$$

donde  $Udif_{ac}$  y  $Udif_{dc}$  son las tensiones medidas por el nanovoltímetro de las diferencias con las tensiones de entrada da AC y DC respectivamente. La incertidumbre combinada es:

$$\begin{aligned} u_c^2(\delta_d) &= \left( \frac{\partial \delta_d}{\partial n_s} \right)^2 \cdot u^2(n_s) + \left( \frac{\partial \delta_d}{\partial U_{odcx}} \right)^2 \cdot u^2(U_{odcx}) + \left( \frac{\partial \delta_d}{\partial Udif_{ac}} \right)^2 \cdot u^2(Udif_{ac}) + \\ &+ \left( \frac{\partial \delta_d}{\partial Udif_{dc}} \right)^2 \cdot u^2(Udif_{dc}) + 2 \cdot \left( \frac{\partial \delta_d}{\partial Udif_{ac}} \right) \cdot \left( \frac{\partial \delta_d}{\partial Udif_{dc}} \right) \cdot u(Udif_{ac}) \cdot u(Udif_{dc}) \cdot \\ &\cdot r(Udif_{ac}, Udif_{dc}) + \left( \frac{\partial \delta_d}{\partial C} \right)^2 \cdot u^2(C) \end{aligned} \quad (0.11)$$

Ya que  $Udif_{ac}$  y  $Udif_{dc}$  se miden con el mismo instrumento en el lapso de unos pocos minutos, tienen una correlación  $r(Udif_{ac}, Udif_{dc})=1$ . Por consiguiente, la suma de los tercero, cuarto y quinto términos en (0.11) es igual a:

$$\left( \frac{1}{n_s U_{odcx}} \right)^2 * \left( (u(Udif_{ac}) - u(Udif_{dc})) \right)^2 \quad (0.12)$$

La secuencia de medición es AC1, DC+, AC2, DC-, AC3 con un tiempo de espera de 60 s luego de la conmutación. Por lo tanto la media

$$\overline{Udif_{ac}} = \frac{1}{3} (Udif_{ac1} + Udif_{ac2} + Udif_{ac3}) \quad (0.13)$$

## PEE21: Agosto 2017

corresponde al momento en el cual se mide AC2 ( $t=t_2$ ). Calculamos la media de las tensiones dc para el mismo momento

$$\overline{Udif_{dc}} = \frac{1}{2} (Udif_{dc1} + Udif_{dc2}) \quad (0.14)$$

En consecuencia, esta secuencia corrige corrimientos lineales en la tensión de salida. Más aun, si el corrimiento difiere levemente de la aproximación lineal, podemos suponer que su contribución a la incertidumbre es la misma en AC que en DC, cancelándose entre sí en (0.12), por lo tanto

$$u(\overline{Udif_{dc}}) \cong u(Udif_{dc}) \text{ y } u(\overline{Udif_{ac}}) \cong u(Udif_{ac}) \quad (0.15)$$

Para C la esperanza se considera nula. Una medición se considera buena si: a) la diferencia relativa entre las tensiones de salida de la incógnita, en AC y DC, permanece menor que  $20\mu\text{V/V}$  y b) la diferencia relativa entre las tensiones de salida de ambos conversores se mantiene menor que  $5\text{mV/V}$  debido al ajuste con el resistor de carga. Si, además, los exponentes de ambos conversores concuerdan dentro de 0,01, entonces C será menor que  $0,15 \mu\text{V/V}$ . Se toma este valor en el balance de incertidumbre, con distribución rectangular, es decir  $u(C) = 0.1 \mu\text{V/V}$ . Por lo tanto, de (0.11) obtenemos

$$u_c^2(\delta_d) = \left[ \frac{Udif_{ac} - Udif_{dc}}{U_{odcx} * n_s^2} \right]^2 * u^2(n_s) + \left[ \frac{Udif_{ac} - Udif_{dc}}{U_{odcx}^2 * n_s} \right]^2 * u^2(U_{odcx}) + \left( \frac{1}{U_{odcx} * n_s} \right)^2 * (u(Udif_{ac}) - u(Udif_{dc}))^2 * u^2(C)$$

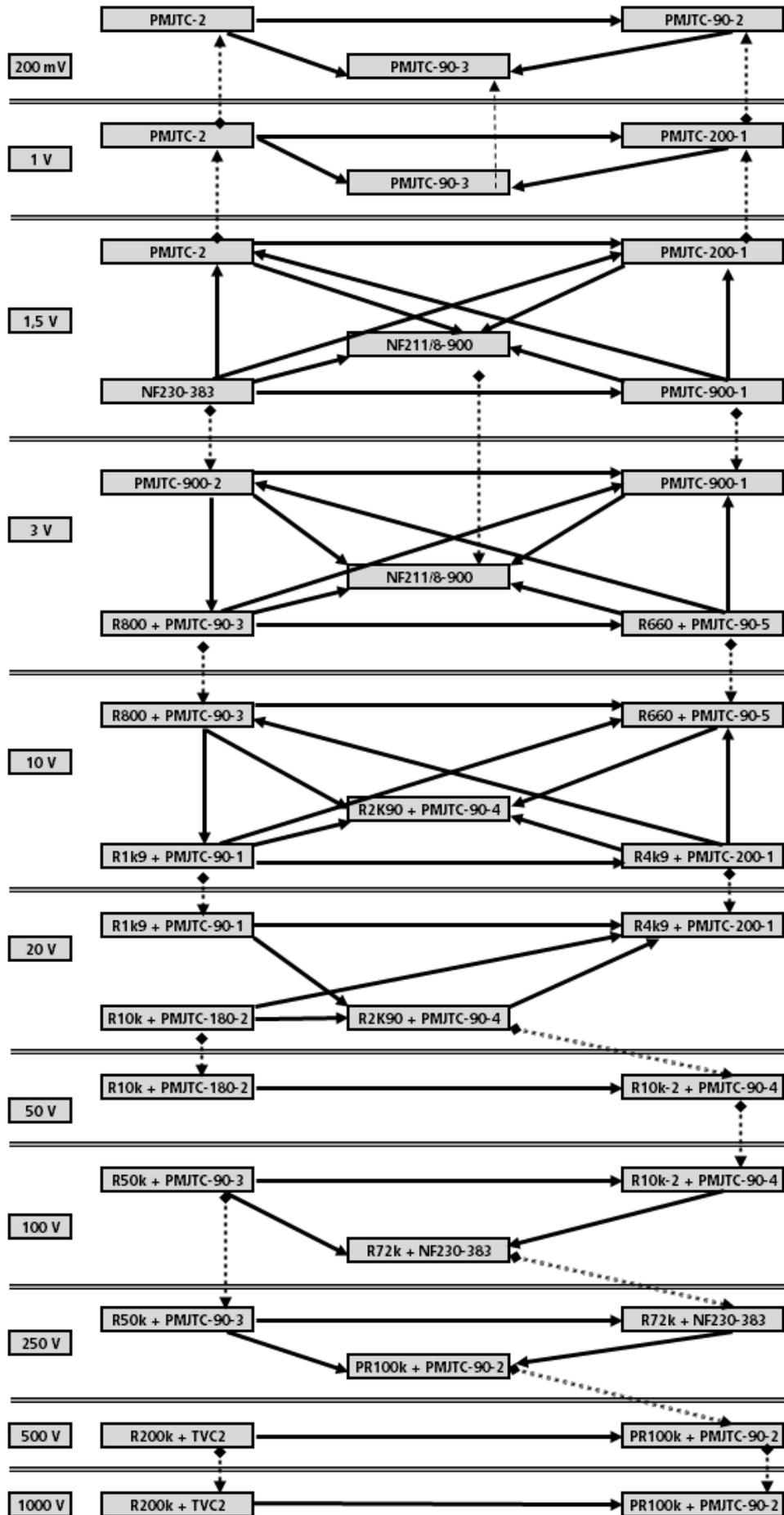
(0.16)

$u(n_s)$  es la incertidumbre del exponente del patrón, que es igual a  $5 \times 10^{-3}$  si sólo se utilizan PMJTCs.  $u(U_{odcx})$  es la incertidumbre en la medición de la tensión absoluta de la incógnita,  $(u(Udif_{AC}) - u(Udif_{DC}))$  corresponde a la incertidumbre de la linealidad en el nanovoltímetro que mide la diferencia y  $u(C)$  es la incertidumbre estándar del término de corrección C.

**Cálculo de  $u_M$** 

Es posible una evaluación rigurosa de la incertidumbre estándar de la diferencia de transferencia de la incógnita, si se considera el comportamiento de los patrones en la cadena de pasos ascendentes y se establecen los esquemas de comparación descriptos. Por ejemplo, si se comparan TVCs con el esquema mostrado en la

PEE21: Agosto 2017



## PEE21: Agosto 2017

, los patrones en la cadena ascendente para tensiones más altas, se comparan unos contra otros a diferentes valores de tensión. Estas mediciones incluyen la dependencia con la tensión de los PMJTCs y de los resistores, pero también la incertidumbre debida a las fuentes de tensión a diferentes niveles y el circuito de comparación. Por ejemplo, a 6 V

$$\begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \delta_{IR6V+ITVC1} \\ \delta_{R660+PMJTC-90} \\ \delta_{R10Vp+ITVCP} \\ \delta_{IR6VI+ITCC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \\ e \\ f \\ \delta_{IR6V+ITVC1-LV} \\ \delta_{R660+PMJTC-90-LV} \end{bmatrix}$$

PEE21: Agosto 2017

Si tomamos como los patrones conocidos IR6V+ITVC1 y R660+PMJC-90 y comparamos contra ellos, resulta el anterior sistema de ecuaciones, donde  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$ ,  $e$  y  $f$  son las diferencias medidas de transferencia AC-DC (utilizando la ecuación (0.2)) y  $\delta_{\text{IR6V+ITVC1-LV}}$  y  $\delta_{\text{R660+PMJTC-90-LV}}$  son las diferencias de transferencia AC-DC conocidas de PMJTC4, determinadas en el paso anterior. La mejor solución de la ecuación **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se obtiene utilizando el método de cuadrados mínimos. La solución es el vector  $\delta$ , el cual minimiza a

$$\varepsilon = (A \cdot \delta' - B)^t \cdot (A \cdot \delta' - B) = \min \quad (0.17)$$

de donde

$$\delta' = (A^t \cdot A)^{-1} \cdot A^t \cdot B = C \cdot B \quad (0.18)$$

La incertidumbre estándar asociada al proceso de medición,  $u_M(\delta_d)$ , puede calcularse como

$$u_M(\delta_d) = \sqrt{\frac{(A \cdot \delta' - B)^t \cdot (A \cdot \delta' - B)}{n}} \quad (0.19)$$

donde  $n$  es el grado de libertad asociado con el proceso, vale decir 4 en nuestro ejemplo.

Con el fin de calcular la incertidumbre estándar de  $\delta$ , necesitamos calcular su matriz de covarianza es decir, de acuerdo a la ecuación (0.19):

$$\text{cov}(\delta') = C \cdot \text{cov}(B) \cdot C^t \quad (0.20)$$

$\text{cov}(B)$  es la matriz de covarianza de  $B$ . Sus términos diagonales son las varianzas de  $a, b, c, d, e$  y calculadas utilizando las ecuaciones (0.10), **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y (0.20) y la varianza  $\sigma_0^2$ , vale decir el cuadrado de la incertidumbre estándar calculada en el paso anterior o, para el conjunto de base, calculada con la ecuación (0.9). Si en el esquema se utiliza más de un patrón conocido, debe prestarse especial atención a la correlación entre ellos, debido a que vienen de pasos previos en el proceso ascendente y se relacionan con el conjunto de base a 3 V. También puede considerarse la correlación de la dependencia de los resistores de los niveles de corriente o tensión. Si no existe correlación,  $\text{cov}(B)$  es una matriz diagonal pero, debido al proceso,  $\text{cov}(\delta')$  no será una matriz diagonal y las incertidumbres de las incógnitas estarán correlacionadas

Por lo tanto, si se utiliza un esquema como el descripto, la incertidumbre estándar combinada de la incógnita,  $d_x$ , puede calcularse como:

$$u(\delta_{xi}) = \sqrt{\text{cov}(\delta'(i, i))} \quad (0.21)$$

donde  $\text{cov}(\delta'(i, i))$  es el  $i$ -ésimo término diagonal de  $\text{cov}(\delta')$ . Los términos de  $\text{cov}(\delta')$  fuera de la diagonal son las covarianzas entre las diferencias de transferencia de la incógnita, debidas a la correlación que surge del proceso.

### Resultados

La Tabla 1 muestra la diferencia de transferencia de tensión AC-DC para los patrones básicos y de trabajo. La Tabla 2 muestra sus incertidumbres estándar.

PEE21: Agosto 2017

Tabla 1: Diferencias de transferencia AC-DC de tensión para los patrones básicos y los de trabajo.

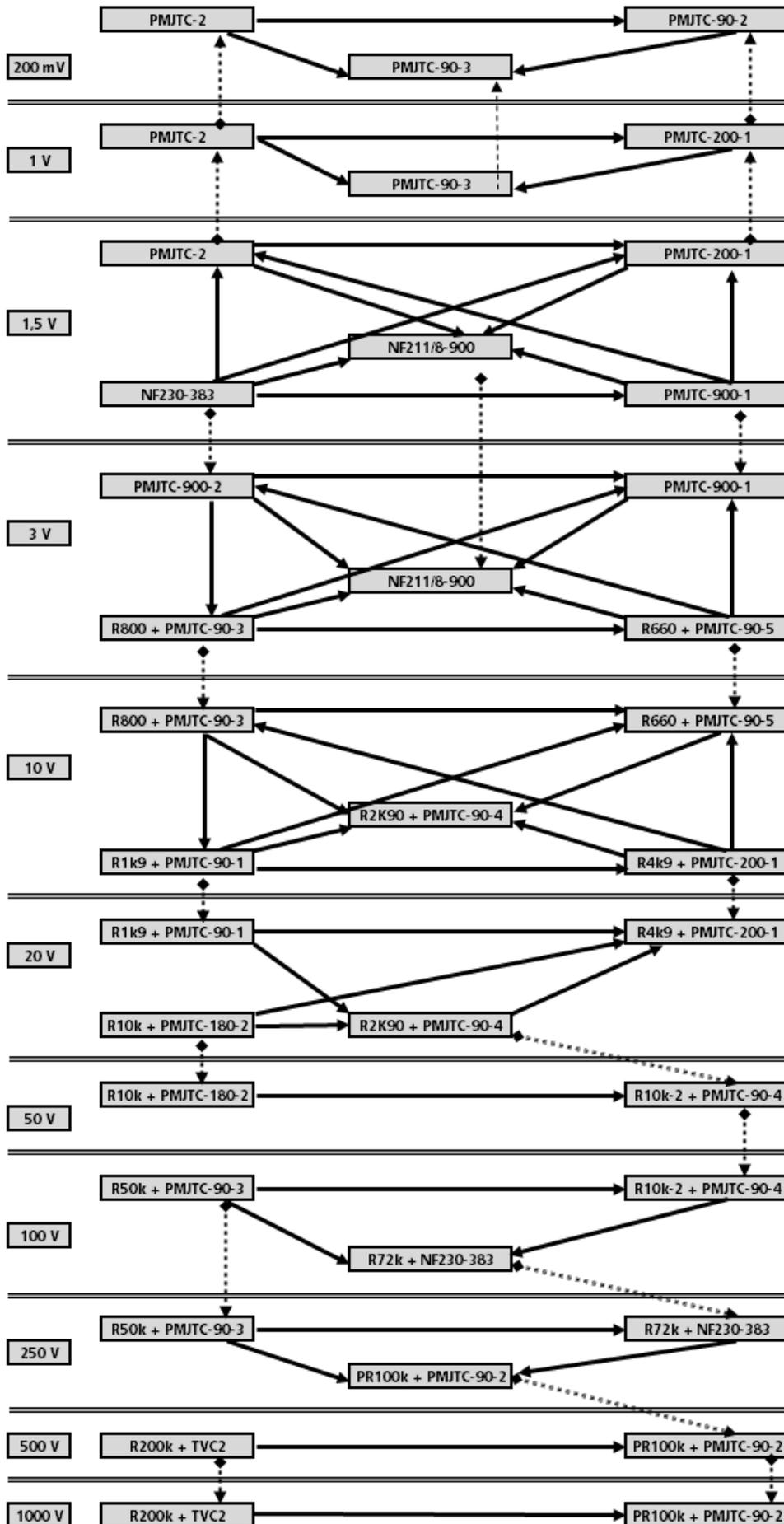
Tensión (V)	Patrón	Diferencia Ac-Dc ( $\mu$ V/V)														
		Frecuencia (kHz)														
		0,01	0,02	0,03	0,04	0,5	1	10	20	50	70	100	200	500	700	1000
0,2	PMJTC-90-3	-1	-1	-1	-1	0	-1	0	1	5	8	10	20	51	72	102
	PMJTC-2	0	0	0	0	1	0	0	-1	1	0	1	-1	-5	-10	-27
	PMJTC-90-2	0	0	-1	0	-1	0	0	0	4	7	8	19	38	55	73
1	PMJTC-200-1	1	0	0	0	0	0	-1	-1	-1	0	0	3	12	17	20
	PMJTC-2	2	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	-1	-6	-12	-27
	PMJTC-90-3	2	0	0	0	0	0	1	2	5	7	11	20	52	75	103
1,5	NF230-383	3	1	-1	0	0	0	0	0	-1	-1	-4	-17	-30	-59	
	NF211/8-900	3	2	0	0	0	0	0	0	-2	-3	-5	-12	-45	-78	-146
	PMJTC-2	4	1	0	0	0	0	1	1	0	1	0	-1	-6	-13	-27
	PMJTC-200-1	6	2	0	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	0	2	12	17	20
	PMJTC-900-1	1	1	-1	0	0	0	0	1	-4	-6	-9	-23	-85	-147	-276
3	PMJTC-900-1	4	-2	-1	-1	0	0	-1	-2	-4	-6	-10	-23	-85	-147	-276
	NF900-2	-28	-22	-16	-12	-1	0	0	-1	-1	-3	-4	-12	-51	-93	-176
	NF211/8-900	13	3	1	1	0	0	0	-1	-2	-3	-4	-12	-44	-78	-145
	PMJTC-90-5+R660	1	-2	-1	0	0	0	1	1	2	3	0	5	18	30	53
	PMJTC-90-3+R800	1	-2	0	1	1	1	1	2	6	9	12	22	41	53	76
10	PMJTC-90-5+R660	15	4	1	0	0	0	-1	-1	3	3	4	6	20	31	53
	PMJTC-90-3+R800	12	3	1	-1	0	0	-1	-1	6	8	12	21	39	52	76
	PMJTC-200-1+R4K9	6	2	-1	-1	-1	2	4	5	12	13	14	22	66	109	206
	PMJTC-90-1+R1K9	8	2	0	-1	0	0	-1	-1	3	5	9	27	87	121	171
	PMJTC-90-4+R2K9	6	1	-1	-1	-1	0	-2	-2	1	2	2	5	13	21	38
20	PMJTC-90-1+R1K9	10	3	2	0	-2	-2	-3	-4	3	5	8	26	88	120	171
	PMJTC-200-1+R4K9	4	0	1	-1	-1	-1	2	4	11	12	14	22	65	108	201
	PMJTC-90-4+R2K9	5	1	1	-1	-2	-2	-3	-4	2	2	2	5	14	22	39
	PMJTC-180-2+R10K	3	1	2	0	5	5	4	4	8	8	9	13	58	106	209
50	PMJTC-180-2+R10K	3	1	2	0	5	5	4	4	8	8	9	13	58	106	209
	R10K-2 + PMJTC-90-4	-3	-5	-5	-6	-8	-9	-11	-10	-8	-9	-11				
100	R50K + PMJTC-90-3	7	3	2	2	5	5	4	5	3	2	5				
	R10K-2 + PMJTC-90-4	-7	-8	-8	-9	-7	-6	-7	-10	-10	-11	-15				
	R72K + NF230-383	1	1	0	0	2	2	3	4	13	22	40				
200	PR100K + 180-2	12	6	5	4	-7	-8	-7	-6	-18	-34	-73				
	R72K + NF230-383	6	4	3	3	-1	0	1	4	13	22	40				
500	PR100K + 180-2	12	6	5	4	-7	-8	-7	-6	-18	-34	-73				
	TVC2 + R200	6	6	3	1	0	-1	-1	-9	-50	-93	-193				
700	PR100K + 180-2	12	6	5	4	-7	-8	-7	-6	-18	-34	-73				
	TVC2 + R200	2	0	3	1	-1	-3	-3	-6	-46	-91	-185				
1000	PR100K + 180-2	12	6	5	4	-7	-8	-7	-6	-18	-34	-73				
	TVC2 + R200	-13	-1	1	1	0	0	-1	-6	-44	-86	-181				

PEE21: Agosto 2017

Tabla 2: Incertidumbres estándar de las diferencias de transferencia AC-DC de tensión para los patrones básicos y los de trabajo.

Tensión (V)	Patrón	Incertidumbre estándar U ( $\mu\text{V/V}$ )														
		Frecuencia (kHz)														
		0,01	0,02	0,03	0,04	0,5	1	10	20	50	70	100	200	500	700	1000
0,2	PMJTC-90-3	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	2	4	9	12	17
	PMJTC-2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	4	9	12	16
	PMJTC-90-2	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	2	4	10	14	21
1	PMJTC-200-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	3	8	10	16
	PMJTC-2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	3	8	10	16
	PMJTC-90-3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	3	8	10	16
1,5	NF230-383	1	1	1	1	0,5	0,5	1	0,5	1	1	2	3	8	10	15
	NF211/8-900	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	3	8	10	15
	PMJTC-2	1	1	1	1	0,5	0,5	1	0,5	1	1	2	3	8	10	15
	PMJTC-200-1	1	1	1	1	1	0,5	1	0,5	1	1	2	3	8	10	15
	PMJTC-900-1	1	1	1	1	1	0,5	1	0,5	1	1	2	3	8	10	15
3	PMJTC-900-1	2	2	2	1	0,5	1	0,5	1	1	1	2	3	8	10	15
	NF900-2	2	2	2	1	0,5	1	0,5	1	1	1	2	3	8	10	15
	NF211/8-900	2	2	2	1	0,5	1	0,5	1	1	1	2	3	8	10	15
	PMJTC-90-5+R660	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1	2	3	8	10	15
	PMJTC-90-3+R800	1	2	2	1	0,5	1	0,5	1	1	1	2	3	8	10	15
10	PMJTC-90-5+R660	3	3	3	1	1	1	1	1	1	1	2	3	8	11	16
	PMJTC-90-3+R800	3	3	3	1	1	0,5	1	1	1	1	2	3	8	11	17
	PMJTC-200-1+R4K9	3	3	3	1	1	0,5	1	1	1	1	2	3	8	11	17
	PMJTC-90-1+R1K9	4	4	4	1	1	1	1	1	2	1	2	4	11	15	22
	PMJTC-90-4+R2K9	3	3	3	1	1	0,5	1	1	1	1	2	3	8	11	17
20	PMJTC-90-1+R1K9	3	3	3	1	1	1	1	1	1	1	2	3	8	11	16
	PMJTC-200-1+R4K9	3	3	3	1	1	1	1	1	1	1	2	3	8	11	16
	PMJTC-90-4+R2K9	3	3	3	1	1	1	1	1	1	1	2	3	8	11	16
	PMJTC-180-2+R10K	3	3	3	1	1	1	1	1	1	1	2	3	8	11	16
50	PMJTC-180-2+R10K	3	3	3	1	1	1	1	1	1	1	2	3	8	11	16
	R10K-2 + PMJTC-90-4	3	3	3	1	1	1	1	1	1	1	2				
100	R50K + PMJTC-90-3	5	6	9	6	2	4	2	1	6	8	9				
	R10K-2 + PMJTC-90-4	5	6	9	6	2	4	2	1	6	8	9				
	R72K + NF230-383	5	5	7	6	2	4	2	1	6	8	9				
200	PR100K + 180-2	7	6	6	5	5	5	5	6	8	10	12				
	R72K + NF230-383	7	6	6	5	5	5	5	6	8	10	12				
500	PR100K + 180-2	8	7	6	6	6	6	6	7	9	11	14				
	TVC2 + R200	13	7	6	6	6	6	8	8	8	12	15				
700	PR100K + 180-2	9	8	7	6	6	6	7	8	10	12	16				
	TVC2 + R200	9	8	7	6	6	6	7	8	10	12	16				
1000	PR100K + 180-2	10	8	7	7	7	7	8	10	12	15	20				
	TVC2 + R200	13	8	7	7	7	7	8	10	12	15	20				

PEE21: Agosto 2017



PEE21: Agosto 2017

Referencias

- [1] M. Klonz, T. Weimann, "Accurate thin film multijunction thermal converter on a Silicon chip," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 38, pp.335-337, 1989.
- [2] M. Klonz, T. Weimann, "Increasing the Time-Constant of a Thin Film Multijunction Thermal Converter for Low Frequency Application," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 40, No.2, 1991.
- [3] H. Laiz "Low Frequency Behaviour of Thin-Film Multijunction Thermal," Thesis TU Braunschweig, PTB-Bericht-E-63, March 1999.
- [4] M. Klonz, T. Spiegel, H. Laiz, E. Kessler, "A 1000-V Resistor for AC-DC transfer," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 48, No.2, 1999.