

Instituto Nacional  
de Tecnología Industrial

Centro de Desarrollo e Investigación  
en Física y Metrología

Procedimiento específico: PEE33

## **CALIBRACIÓN DE PATRONES DE INDUCTANCIA**

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.

## PEE33 Lista de enmiendas: Julio 2012

[illegible]

PEE33 Índice: Julio 2012

NOMBRE DEL CAPÍTULO	REVISIÓN
Página titular	Julio 2012
Lista de enmiendas	Julio 2012
Índice	Julio 2012
Calibración de patrones de inductancia	Julio 2012
Apéndice 1	Julio 2012
Apéndice 2	Julio 2012
Apéndice 3	Julio 2012
Apéndice 4	Julio 2012

PREPARADO POR

**FIRMA Y SELLO**  
  
**MARCELO CAZABAT**  
 INT - ELECTRICIDAD  
 INTI - FÍSICA Y METROLOGÍA

REVISADO POR

**FIRMA Y SELLO**  
  
**Lic. LUCAS D. DI JILLO**  
 COOR. ELECTRICIDAD  
 FÍSICA Y METROLOGÍA  
 INTI

REVISADO POR

**FIRMA Y SELLO**  
  
**ING. PATRICIA VARELA**  
 COORD. CALIDAD Y ADMINISTRACION  
 INTI - FÍSICA Y METROLOGÍA

APROBADO POR

**FIRMA Y SELLO**  
  
**Ing. JUAN A. FORASTIERI**  
 DIRECTOR TÉCNICO  
 INTI - FÍSICA Y METROLOGÍA

PEE33: Julio 2012

## 1. Objeto

Calibración de patrones de inductancia.

## 2. Alcance

Los patrones con núcleo no ferromagnético (aire o cerámico) que abarquen el rango de 50  $\mu\text{H}$  a 10 H para las frecuencias de 100 Hz a 10 kHz.

## 3. Definiciones y abreviaturas

$L_X$  : inductancia incógnita a la temperatura de medición.

$L_{XR}$  : inductancia incógnita a la temperatura de referencia.

$L_M$  : promedio de  $L_{XR}$ .

$r$  : resistor de sustitución.

$l$  : inductancia auxiliar de bajo valor para medición por método de sustitución por cero.

$R_1$  y  $R_2$  : resistencias del puente de Maxwell-Wien

$C$  : capacidad principal para equilibrio de  $L_X$

$C_1$  : capacidad complementaria para equilibrio de  $L_X$

$C_1'$  : capacidad para equilibrio de  $l$

$C_0$  : capacidad residual de la rama de la incógnita

$f$  : frecuencia de medición.

$T_A$  : temperatura ambiente.

$R_R$  : resistencia de referencia en corriente continua.

$R_{CTx}$  : resistencia en corriente continua del inductor a la temperatura  $T_X$

$T_X$  : temperatura del inductor para cada medida  $L_X$ .

$T_R$  : temperatura de referencia

$k$  : coeficiente de temperatura del inductor

$\Delta t$  : diferencia de temperatura a ser corregida

## 4. Referencias

**4.1.** Thomas L. Zapf, "Calibration of inductance standards in the Maxwell-Wien bridge circuit", Journal of Research of the National Bureau of Standards, Engineering and Instrumentation, Vol 65C N° 3, July-September 1961.

**4.2.** Ing. K. Neumann, "Verbesserte Präzisionsmeßeinrichtung zur Darstellung der Einheit der Induktivität im ASMW", Metrologische Abhandlungen 4 (1984) 2.

**4.3.** A. Fiebig-K. Dröge, "Bestimmung der Temperaturkoeffizienten des Typs GR 1482, PTB-Mitteilungen 94 1/84.

**4.4.** Ing. K. Neumann, "Das Temperaturverhalten von Induktivitätsnormalen verschiedener Nennwerte", Metrologische Abhandlungen 7 (1987) 1.

PEE33: Julio 2012

4.5. Cazabat-García, “Calibración de inductores normales con puente de Maxwell-Wien”, Revista Electrotécnica, AEA, volumen LXXXV, pág. 108, mayo-junio 1989.

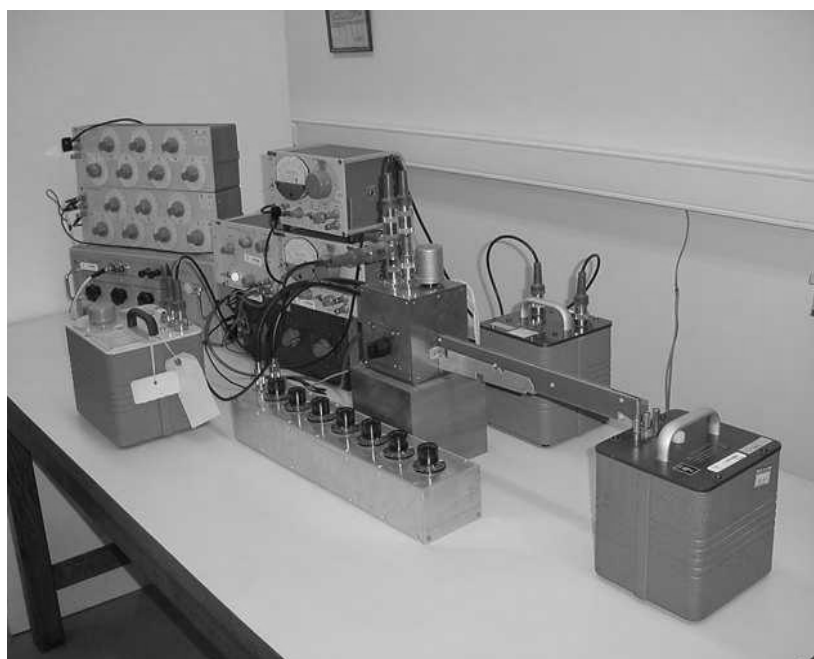
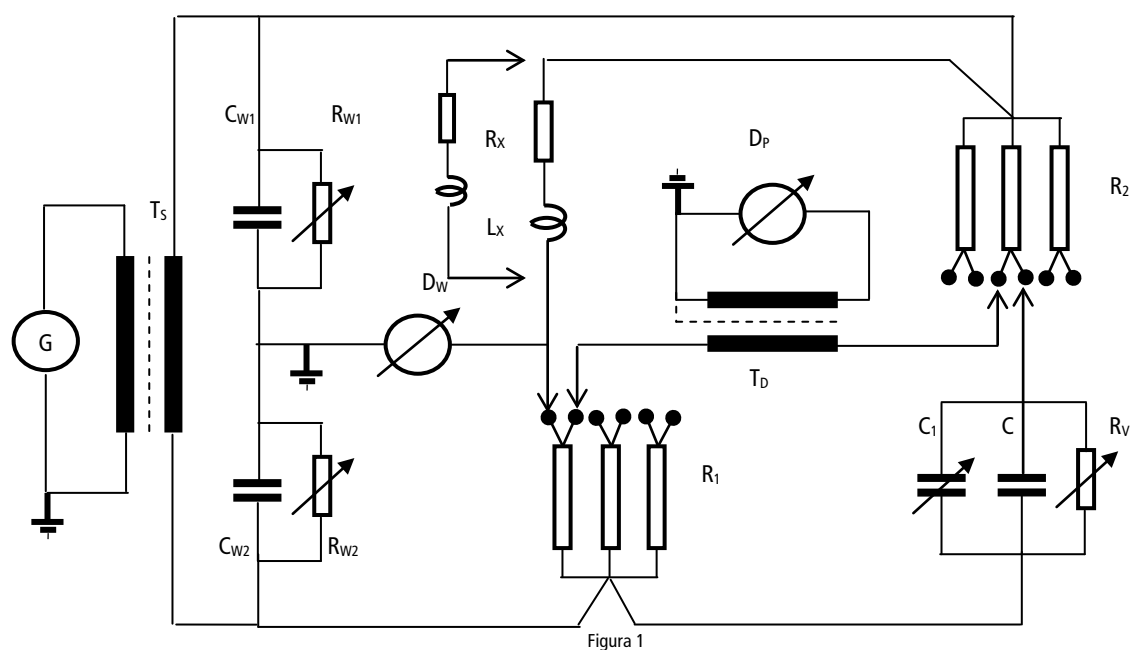
## 5. Responsabilidades

Técnicos del laboratorio de Capacidad e Inductancia en la ejecución de las mediciones y elaboración de los resultados.

El coordinador del área Electricidad supervisa las mediciones, verifica que se cumplan los procedimientos y revisa los resultados.

## 6. Instrucciones

Para la comparación se utiliza el circuito de la Figura 1.



Puente de Maxwell-Wien.

## PEE33: Julio 2012

Para llevar a cabo la calibración se utiliza el denominado método de sustitución por cero, que consiste en realizar dos mediciones para la obtención del valor de la inductancia incógnita.

La primera de ellas se efectúa sobre el inductor a medir y la segunda reemplazándolo por un resistor de film metálico o carbón de similar valor de resistencia a la del inductor incógnita y de muy baja constante de tiempo, en cuyo caso se considera su inductancia igual a cero. En algunos casos es necesario, para equilibrar los parámetros residuales del puente de la rama de la incógnita, adicionar en serie con el resistor de sustitución  $r$  un inductor de valor conocido  $l$ , generalmente inferior a 1  $\mu\text{H}$ .

Las capacidades  $C$ ,  $C_1$  y  $C_1'$  se medirán con el sistema puente GR 1620-A tras realizar cada equilibrio del puente de Maxwell-Wien. En caso de usar como patrón  $C$  un capacitor GR 1404 se utilizará su valor certificado y sólo se medirá  $C_1$  y  $C_1'$ .

Los valores de  $R_1$  y  $R_2$  serán obtenidos también durante el proceso de calibración del inductor midiéndolos en corriente continua con un puente comparador de resistencias y dos resistores patrones de 100  $\Omega$  y 10000  $\Omega$  ya que los resistores del PMW son de película metálica de constante de tiempo despreciable.

El valor de  $C_0$  fue obtenido mediante mediciones de un patrón de inductancia de 10 H variando la distancia al apantallamiento de la rama de la incógnita desde el plano de los bornes del inductor, resultando la capacidad parásita proporcional a la longitud de la rama no blindada, considerando  $C_0 = 0$  cuando la pantalla coincide con el plano de dichos bornes. Para una distancia no apantallada de 0,5 cm resulta  $C_0 = 0,11$  pF siendo para 1 cm  $C_0 = 0,22$  pF.

El circuito posee una tierra de Wagner manual que se balancea alternativamente con el puente principal hasta lograr el equilibrio en ambos detectores.

Las combinaciones de resistencias  $R_1$  y  $R_2$  y capacidad principal  $C$  a utilizar para el balance se encuentran en la tabla 1 (apéndice 1).

La tensión de alimentación del puente será usualmente menor que 3 V y no superará un valor tal que respete la corriente máxima de medición del inductor según lo establecido en la tabla 2 (apéndice 2), considerando que se trata de inductores del tipo GR 1482 o similar. La corriente resultante tampoco deberá ser mayor a aquella que provoque una disipación máxima en los resistores  $R_1$  y  $R_2$  de 0,010 W.

### 7. Incertidumbre: Modelo matemático y cálculo de incertidumbres

$$L_{XR} = \left[ R_1 R_2 (C + C_1) + l - R_1 R_2 C_1' - 4\pi^2 f^2 R_1^2 R_2^2 C^2 C_0 \right] [1 \pm k\Delta t]$$

Los términos que involucran las constantes de tiempo de  $R_1$  y  $R_2$ ,  $\omega^2 \tau_1 \tau_2$  y  $\omega \cdot \text{tg} \delta (\tau_1 + \tau_2)$ , ver ref. 4.5, tienen una influencia menor a  $1 \cdot 10^{-6}$  en el valor de  $L_X$ .

Se comprobó que utilizando el detector de Wagner en la máxima ganancia de la escala lineal y el detector del puente principal en la mayor ganancia de la escala de máxima sensibilidad, no hubo diferencias apreciables en el valor de  $L_X$  (inferiores a  $5 \cdot 10^{-7}$ ) inclusive para un desbalance del detector de Wagner GR 1232 de toda la extensión de la escala (50 divisiones) en las condiciones antedichas.

El ejemplo corresponde a la medición de un inductor de 10 mH a 1 kHz.

1ra medición	$C_{W1} = 0 \mu\text{F}$	$R_{W1} = 50 \Omega$	$C_{W2} = 0,18528 \mu\text{F}$	$R_{W2} = 6086 \Omega$	$C_1 = 0,250 \text{ pF}$	$C = 10000 \text{ pF}$
2da medición	$C_{W1} = 0 \mu\text{F}$	$R_{W1} = 50 \Omega$	$C_{W2} = 0,18526 \mu\text{F}$	$R_{W2} = 6086 \Omega$	$C_1 = 0,250 \text{ pF}$	$C = 10000 \text{ pF}$
3ra medición	$C_{W1} = 0 \mu\text{F}$	$R_{W1} = 50 \Omega$	$C_{W2} = 0,18528 \mu\text{F}$	$R_{W2} = 6081 \Omega$	$C_1 = 0,246 \text{ pF}$	$C = 10000 \text{ pF}$

La variación indicada de  $C_{W2}$  no generó cambio en  $L_X$

La variación indicada de  $R_{W2}$  generó un cambio en  $L_X$  de  $4 \cdot 10^{-7}$

PEE33: Julio 2012

Tabla i: Ejemplo de cálculo de incertidumbre para inductor patrón GR 1482 de 10 mH a 1 kHz

Fuente de incertidumbre	Simb	Valor estimado	Tipo	Distrib	Intervalo (±)	Factor	$u_i$		$v_i$	$c_i$		$(c_i u_i)^2$	% cont		
Resistor 1	$R_1$	99,9485	$\Omega$	BN	N	0,002	$\Omega$	2,0	1,00E-03	$\Omega$	10	1,00E-04	$\Omega^2$	1,0E-14	27,0%
Resistor 2	$R_2$	9993,69	$\Omega$	BN	N	0,3	$\Omega$	2,0	1,50E-01	$\Omega$	10	1,00E-06	$\Omega^2$	2,3E-14	60,8%
Capacitor princip	C	1,0006E-08	F	BN	N	1,00E-13	F	2,0	5,00E-14	F	10	1,00E+06	$\Omega^2$	2,5E-15	6,8%
Capacitor var lect 1	$C_1$	2,90E-13	F	BN	N	1,00E-15	F	2,0	5,00E-16	F	10	1,00E+06	$\Omega^2$	2,5E-19	0,0%
Capacitor var lect 2	$C_1'$	7,91E-13	F	BN	N	1,00E-15	F	2,0	5,00E-16	F	10	-1,00E+06	$\Omega^2$	2,5E-19	0,0%
Induct sust por cero	I	0	$\mu H$	BN	N	2,00E-08	H	2,0	1,00E-08	H	10	1		1,0E-16	0,3%
Coef. de temp. Incóg	k	3,20E-05	H °C	BR	R	2,00E-06	°C <sup>-1</sup>	1,7	1,15E-06	°C <sup>-1</sup>	50	0,01	H °C	1,3E-16	0,4%
Variación de temp	$\Delta t$	0	°C	BR	R	0,2	°C	1,7	1,15E-01	°C	50	3,20E-07	H/°C	1,4E-15	3,7%
Frecuencia	f	1000	Hz	BR	R	0,1	Hz	1,7	5,77E-02	Hz	50	1,74E-12	H <sup>2</sup> /Ω	1,0E-26	0,0%
Cap res rama incóg.	$C_0$	2,20E-13	F	BR	R	7,00E-14	F	1,7	4,04E-14	F	50	3,95E+03	H <sup>2</sup> rad <sup>2</sup>	2,5E-20	0,0%
Sensibilidad del detector	S		F	BR	R	5,00E-16	F	1,7	2,89E-16	F	10	1,00E+06	$\Omega^2$	8,3E-20	0,0%
Incertidumbre tipo A	$u_A$	2,00E-08	H	A1	N	7,00E-14	F	0,0	2,00E-08	H	9	1,00E+00		4,0E-16	1,1%
		9,994035	mH		N	4,0E-07	H	2,1	1,9E-07	H	22				100%

$$= 9,99404 \text{ mH} \pm 0,00040 \text{ mH}$$

Valores de k ver ref. 4.2

Tabla ii: Ejemplo de cálculo de incertidumbre para inductor patrón GR 1482 de 10 H a 1 kHz

Fuente de incertidumbre	Simb	Valor estimado	Tipo	Distrib	Intervalo (±)	Factor	$u_i$		$v_i$	$c_i$		$(c_i u_i)^2$	% cont		
Resistor 1	$R_1$	9991,80	$\Omega$	BN	N	0,3	$\Omega$	2,0	1,50E-01	$\Omega$	10	1,04E-03	$\Omega^2$	2,4E-08	16,1%
Resistor 2	$R_2$	9992,30	$\Omega$	BN	N	0,3	$\Omega$	2,0	1,50E-01	$\Omega$	10	1,04E-03	$\Omega^2$	2,4E-08	16,1%
Capacitor princip	C	1,0420E-07	F	BN	N	4,00E-12	F	2,0	2,00E-12	F	10	9,98E+07	$\Omega^2$	4,0E-08	26,3%
Capacitor var lect 1	$C_1$	0,00E+00	F	BN	N	0,00E+00	F	2,0	0,00E+00	F	10	9,98E+07	$\Omega^2$	0,0E+00	0,0%
Capacitor var lect 2	$C_1'$	7,685E-12	F	BN	N	1,00E-14	F	2,0	5,00E-15	F	10	9,98E+07	$\Omega^2$	2,5E-13	0,0%
Induct sust por cero	I	0	$\mu H$	BN	N	2,00E-08	H	2,0	1,00E-08	H	10	1		1,0E-16	0,0%
Coef. de temp. Incóg	k	7,40E-05	H °C	BR	R	5,00E-06	°C <sup>-1</sup>	1,7	2,89E-06	°C <sup>-1</sup>	50	10	H °C	8,3E-10	0,5%
Variación de temp	$\Delta t$	0	°C	BR	R	0,2	°C	1,7	1,15E-01	°C	50	7,40E-04	H/°C	7,3E-09	4,8%
Frecuencia	f	1000	Hz	BR	R	0,1	Hz	1,7	5,77E-02	Hz	50	9,40E-07	H <sup>2</sup> /Ω	2,9E-15	0,0%
Cap res rama incóg.	$C_0$	1,10E-13	F	BR	R	7,00E-14	F	1,7	4,04E-14	F	10	-4,27E+09	H <sup>2</sup> rad <sup>2</sup>	3,0E-08	19,7%
Sensibilidad del detector	S		F	BR	R	1,00E-14	F	1,7	5,77E-15	F	10	9,98E+07	$\Omega^2$	3,3E-13	0,0%
Frecuencia en cap distribuida	$f_C$	0,00E+00		BR	R	0,1	Hz	1,7	5,77E-02	Hz	10	8,86E-04	H <sup>2</sup> rad <sup>2</sup>	2,6E-09	1,7%
Incertidumbre tipo A	$u_A$	1,50E-04	H	A1	N	7,00E-14	F	0,0	1,50E-04	H	5	1,00E+00		2,3E-08	14,8%
		10,40238	H		N	7,8E-04	H	2,0	3,9E-04	H	49				100%

$$= 10,40238 \text{ H} \pm 0,00078 \text{ H}$$

Valores de k ver ref. 4.2.

Las incertidumbres para cada valor nominal de inductancia y frecuencia se detallan en el apéndice 3 (tabla 3).

## 8. Identificación y almacenamiento

Los inductores a ser medidos se identifican de acuerdo con las instrucciones del Manual de la Calidad del Centro de Física y Metrología y son guardados desde su ingreso hasta la devolución al cliente en el Lab.1 del área de Capacidad e Inductancia, ver capítulo 9 del MC.

### Instrumental a utilizar

INSTRUMENTO	MARCA	MODELO	N° SERIE
Capacitor patrón 1000 pF	GR	1404-A	1811
Capacitor patrón 1000 pF	GR	1404-A	1826
Capacitor variable 1,1 y 11 pF	GR	1422 CD	4705
Capacitor variable 10 y 110 pF	GR	1422 CL	5226
Capacitor variable 1100 pF	GR	1422 CB	6365

PEE33: Julio 2012

INSTRUMENTO	MARCA	MODELO	N° SERIE
Caja de décadas de capacitores 0 – 1,1 $\mu\text{F}$	GR	1413	639
Caja de conexiones (incluye R1 y R2 )	LACI	PMW	1
Puente de capacidad	GR	1615-A	2007
Detector de cero con preamplificador	GR	1232-A/P2	7962
Detector de cero con preamplificador	GR	1232-A/P2	7654
Oscilador	GR	1316	06166
Oscilador	GR	1311	3635
Caja de décadas de capacidad 100 pF- 1,11 $\mu\text{F}$	R&S	KGM BN 532	M1512/3
Caja de décadas de capacidad 1,11 $\mu\text{F}$	GR	1419-K	886
Puente automático de resistencias	MI	6010B	960106
Resistor patrón de 100 $\Omega$	Fluke	742 A-100	7576001
Resistor patrón de 10 k $\Omega$	ESI	SR 104	460037
Caja de décadas de resistencia 4 M $\Omega$	LACI	CR	01
Caja de décadas de resistencia 1 M $\Omega$	GR	1433-G	cualquiera
Caja de décadas de resistencia 100 k $\Omega$	GR	1433-F	cualquiera
Transformador de detección 10k $\Omega$ /10k $\Omega$	ASL	MU 7530	
Resistores de sustitución (valores varios)			
Multímetro	HP	3458	cualquiera
Multímetro	APPA	97R	71903678
Contador	FLUKE	PM 6665	640961
Transformador separador	R&S	TAN 9690	M1412/15
Termorresistencia de platino	LACI	TP	A01
Termómetro de vidrio	HERFOR		6418
Termohigrómetro	TFA		TH 1

## 9. Condiciones ambientales

Durante la calibración, la temperatura ambiente deberá ser  $(23 \pm 1) ^\circ\text{C}$  y la humedad relativa ambiente no podrá superar el 70% . Los patrones a ser calibrados deberán permanecer en el Lab.1, al menos, 72 h antes de la calibración y en las condiciones ambientales de medición durante las 24 h anteriores al comienzo de la misma.

## 10. Registros de la calidad

Se conservarán registros manuscritos de las observaciones originales, original o copia de registros de salida de computadora (cuando sea aplicable), copia de los certificados emitidos, así también como una copia de la orden de trabajo, salida de elementos y toda documentación relacionada de acuerdo con el Manual de la Calidad capítulo 11.

## 11. Precauciones

De acuerdo a las previsiones del Decreto 937/74, Artículo 1, sección d, ésta es considerada una tarea riesgosa. Por lo tanto, se deben tomar las precauciones necesarias para evitar descargas eléctricas.

## 12. Apéndices y anexos

ANEXO N°	TÍTULO
1	Tabla 1
2	Tabla 2



PEE33: Julio 2012

ANEXO N°	TÍTULO
3	Tabla 3
4	Formulario PEE33/01

## PEE33 Apéndice 1: Julio 2012

**Tabla1**

L <sub>XN</sub>		R <sub>1</sub> (Ω)	R <sub>2</sub> (Ω)	C <sub>N</sub> (nF)	F (kHz)
50	μH	100	100	5	0,1 - 10
100		100	1000	1	0,1 - 10
		100	100	10	0,1 - 10
200		100	1000	2	0,1 - 10
		100	100	20	0,1 - 10
500		100	1000	5	0,1 - 10
		100	100	50	0,1 - 5
1	mH	1000	1000	1	0,1 - 10
		100	10000	1	0,1 - 10
		100	1000	10	0,1 - 5
2		1000	1000	2	0,1 - 10
		100	10000	2	0,1 - 10
		100	1000	20	0,1 - 5
5		1000	1000	5	0,1 - 10
		100	10000	5	0,1 - 10
		100	1000	50	0,1 - 5
10		1000	10000	1	0,1 - 10
		1000	1000	10	0,1 - 5
		100	10000	10	0,1 - 5
20		1000	10000	2	0,1 - 10
		100	10000	20	0,1 - 5
		1000	1000	20	0,1 - 5
50		1000	10000	5	0,1 - 10
		100	10000	50	0,1 – 5
		1000	1000	50	0,1 – 5
100		10000	10000	1	0,1 – 10
		1000	10000	10	0,1 – 5
		10000	10000	2	0,1 – 5
200		1000	10000	20	0,1 – 5
		10000	10000	5	0,1 – 2
		1000	10000	50	0,1 – 2
500		10000	10000	5	0,1 – 2
		1000	10000	50	0,1 – 2
1	H	10000	10000	10	0,1 - 2
2		10000	10000	20	0,1 - 2
5		10000	10000	50	0,1 - 1
10		10000	10000	100	0,1 - 1

En esta tabla, a modo de guía, se hallan representados los valores nominales de los parámetros tabulados.

## PEE33 Apéndice 2: Julio 2012

**Tabla 2**

VALOR DE INDUCTANCIA		I <sub>MÁX</sub> DE MEDICIÓN (mA)
50	μH	50
100		35
200		25
500		16
1		11
2	mH	8
5		5
10		3,5
20		2,6
50		1,7
100		1,1
200		0,95
500		0,6
1	H	0,4
2		0,3
5		0,2
10		0,12

## PEE33 Apéndice 3: Julio 2012

**Tabla 3**  
**Incertidumbres expandidas de Inductancia ( $10^{-6}$ ) para  $k=2$** 

		100 Hz	1 kHz	2 kHz	5 kHz	10 kHz
50	$\mu\text{H}$	600	600	600	600	600
100		300	300	300	300	300
200		150	150	150	150	150
500		100	100	100	100	100
1	mH	80	80	80	80	80
2		80	80	80	80	80
5		60	60	60	70	70
10		60	50	60	70	70
20		60	60	60	70	70
50		70	60	60	70	70
100		70	60	60	70	80
200		70	60	70	80	
500		70	70	80		
1	H	70	80	150		
2		70	100	250		
5		80	180			
10		100	300			

PEE33 Apéndice 4: Julio 2012

Formulario PEE33/01

Formulario PEE 33.01  
Julio 2012

INTI  Física y Metrología

Calibración de Inductores

Cliente:
Material:
OT N°:
Responsable:
Observaciones:

Med	Fecha	T <sub>A</sub> (°C)	R <sub>CTX</sub> (Ω)	T <sub>X</sub> (°C)	C <sub>LEIDA</sub> (pF)	C <sub>1' LEIDA</sub> (pF)	C <sub>1' LEIDA</sub> (pF)	C <sub>1' MED</sub> (pF)
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								
9								
10								

Med	C <sub>1' MED</sub> (pF)	C <sub>MED</sub> (pF)	R <sub>1 MED</sub> (Ω)	R <sub>2 MED</sub> (Ω)	L <sub>X</sub> (H)	L <sub>XR</sub> (H)	L <sub>M</sub> (H)
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							

R <sub>k</sub> =	I <sub>máx</sub> de med. =
T <sub>k</sub> =	Tacondic. mín =
C <sub>0</sub> =	Tacondic. máx =
k =	HR% máx =
l =	f =