

# Guia **RELIGRE** 10

**DETERMINAÇÃO DA INCERTEZA**



**DOS RESULTADOS DE MEDIÇÃO**



**NA CALIBRAÇÃO**



**DE INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO**



**NA ÁREA ELÉCTRICA**



**(VOLUME II)**



Associação de Laboratórios Acreditados de Portugal

---

**FICHA TÉCNICA**

---

TÍTULO:

Guia RELACRE 10

DETERMINAÇÃO DA INCERTEZA DOS  
RESULTADOS DE MEDIÇÃO NA CALIBRAÇÃO  
DE INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO NA ÁREA  
ELÉCTRICA  
(VOLUME II)

EDIÇÃO: RELACRE

DESIGN GRÁFICO: RELACRE

CAPA: Alda Rosa

ISBN: 972 - 8574 - 06 - 1



A presente edição foi elaborada pelo GRUPO DE TRABALHO GT02

**“ÁREA ELÉCTRICA”**

da COMISSÃO TÉCNICA RELACRE CTR04

**“METROLOGIA”**

O conteúdo é da responsabilidade dos que colaboraram na sua elaboração.

É intenção da RELACRE proceder à revisão deste documento sempre que se revele oportuno.

Colaboraram na elaboração da presente edição:

Jorge Martins ( <i>coordenador</i> )	ALCATEL
João Marcelino	ALCATEL
Luís Manuel Mendes Corista	ICP
Isabel Godinho	INETI
Vitor Cabral	IPQ
José Medina	ISQ
Manuel Seabra Monteiro ( <i>coordenador</i> )	LIQ
Paulo Jorge Lourenço João	PT INOVAÇÃO
António Manuel Viana	TAP

Direitos de Autor protegidos segundo  
legislação em vigor.

Proibida cópia total ou parcial sem  
autorização escrita da RELACRE.

<b>1. PREÂMBULO</b>	<b>1</b>
<b>2. CALIBRAÇÃO DE UMA CAPACIDADE PELO MÉTODO DE SUBSTITUIÇÃO</b>	<b>2</b>
2.1 CAMPO DE APLICAÇÃO	2
2.2 DESCRIÇÃO DO MÉTODO DE MEDIÇÃO E ESQUEMA DE MONTAGEM	2
2.3 DETERMINAÇÃO DA INCERTEZA	3
2.4 EXEMPLO DE APLICAÇÃO	3
<b>3. CALIBRAÇÃO DE PINÇAS AMPERIMÉTRICAS PELO MÉTODO DIRECTO</b>	<b>6</b>
3.1 DESCRIÇÃO DO MÉTODO DE MEDIÇÃO E ESQUEMA DE MONTAGEM	6
3.2 DETERMINAÇÃO DA INCERTEZA	6
3.3 EXEMPLO DE APLICAÇÃO	7
<b>4. CALIBRAÇÃO DE UM WATTÍMETRO MONOFÁSICO</b>	<b>9</b>
4.1 DESCRIÇÃO DO MÉTODO DE MEDIÇÃO	9
4.2 DETERMINAÇÃO DA INCERTEZA	10
<b>5. MEDIÇÃO DE ATENUAÇÃO EM RF PELO MÉTODO DE SUBSTITUIÇÃO</b>	<b>13</b>
5.1 DESCRIÇÃO DO MÉTODO DE MEDIÇÃO	13
5.2 DETERMINAÇÃO DA INCERTEZA	13
5.3 EXEMPLO DE APLICAÇÃO	14
<b>6. MEDIÇÃO DE MODULAÇÃO EM AMPLITUDE (AM).</b>	<b>17</b>
6.1 DESCRIÇÃO DO MÉTODO DE MEDIÇÃO	17
6.2 DETERMINAÇÃO DA INCERTEZA	18
<b>7. MEDIÇÃO DE POTÊNCIA RF</b>	<b>21</b>
7.1 CAMPO DE APLICAÇÃO	21
7.2 DESCRIÇÃO DO MÉTODO DE MEDIÇÃO	21
7.3 DETERMINAÇÃO DA INCERTEZA	22
7.4 EXEMPLO DE APLICAÇÃO	24
<b>8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>28</b>

---

## **1. PREÂMBULO**

O objectivo do presente documento é o de estabelecer os princípios e os requisitos a seguir na avaliação da incerteza de medição na calibração de alguns instrumentos de medição da área Eléctrica. Pretende-se determinar as principais componentes presentes na medição, identificando o tipo de distribuição associado, tendo em consideração o processo de avaliação, descrever sumariamente o modo como estas deverão ser combinadas e determinar a incerteza expandida da medição.

Neste Guia são considerados seis exemplos de medição na área eléctrica a seguir identificados:

- Capacidade (ALCATEL)
- Pinças Amperimétricas (TAP)
- Wattímetro Monofásico (ISQ)
- Atenuação em RF (ICP)
- Modulação AM (ISQ)
- Medição de Potência RF (PT Inovação)

Para cada um dos métodos de medição referidos e de modo a complementar os princípios gerais adoptados, são também apresentados exemplos numéricos de aplicação.

Refere-se a existência do Guia RELACRE 10 onde são abordados os seguintes exemplos:

- Calibração de uma Resistência Padrão através do método Potenciométrico.
- Calibração de uma referência de tensão dc por comparação, através de um divisor de tensão, pelo método de nulo.
- Medição de Frequência pelo método directo.
- Medição de uma Corrente dc com base na lei de Ohm.
- Medição de Corrente ac através do método Directo.

As definições, os métodos de cálculo e os princípios gerais adoptados na formulação da incerteza têm como referência básica o EA-4/02 “Guia para a expressão da incerteza de medição nos Laboratórios de Calibração - Maio de 1998.

## 2. CALIBRAÇÃO DE UMA CAPACIDADE PELO MÉTODO DE SUBSTITUIÇÃO

### 2.1 CAMPO DE APLICAÇÃO

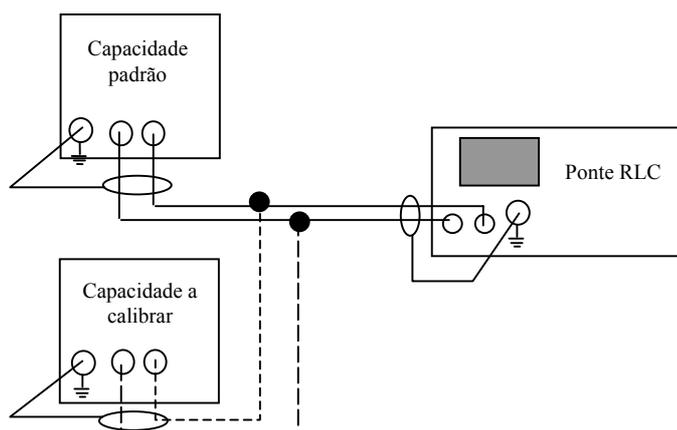
O método usado é o de comparação do valor de uma capacidade padrão com o valor da capacidade a calibrar através de uma ponte de medição RLC de elevada resolução, sendo aplicável na calibração de capacidades de valores próximos das capacidades padrão utilizadas.

### 2.2 DESCRIÇÃO DO MÉTODO DE MEDIÇÃO E ESQUEMA DE MONTAGEM

O método a seguir descrito é usado em medições de elevada exactidão pelo que se deve manter um rigoroso controlo das condições ambientais e de estabilização térmica dos equipamentos usados, bem como da unidade a calibrar.

Todas as ligações devem ser efectuadas com cabos blindados, coaxiais e o mais curtos possível.

Na figura seguinte encontra-se esquematicamente representado o método usado. Efectua-se uma leitura da capacidade padrão, da capacidade a calibrar e novamente da capacidade padrão. Deve ser reduzido ao mínimo a movimentação dos cabos de ligação durante as leituras.



Podemos assim determinar com exactidão o valor da Capacidade a calibrar ( $C_x$ ) através da expressão:

$$C_x = (C_{xm} / C_{pm}) \times C_p$$

- $C_x$  - Capacidade a calibrar  
 $C_{xm}$  - Valor medido da capacidade a calibrar  
 $C_{pm}$  - Valor medido da capacidade padrão  
 $C_p$  - Valor certificado da capacidade padrão

### 2.3 DETERMINAÇÃO DA INCERTEZA

Na calibração de uma Capacidade pelo método de substituição consideram-se normalmente as seguintes componentes para o cálculo da incerteza da medição, devidas a:

- Incerteza da calibração da Capacidade padrão
- Deriva da Capacidade padrão
- Variação da temperatura da Capacidade padrão
- Estabilidade de curto prazo da Ponte de Medição RLC
- Dispersão das leituras efectuadas

### 2.4 EXEMPLO DE APLICAÇÃO

Vamos considerar a calibração de uma Capacidade de valor nominal de 10 pF, usando uma tensão de ensaio de 1 V e uma frequência de 1 kHz.

- Incerteza da calibração da Capacidade padrão  
 O certificado de calibração da Capacidade padrão indica o seu valor e a respectiva incerteza.
  - Incerteza tipo B e distribuição normal
  - $C_p = 10,0002$  pF
  - Incerteza expandida =  $\pm 100$  ppm
  - Factor de expansão  $k = 2,00$

- Incerteza devida à deriva da Capacidade padrão obtida com base em pelo menos três certificados anteriores
  - Incerteza tipo B e distribuição rectangular
  - $\Delta C_p = \pm 300$  ppm
  
- Incerteza devida à variação da temperatura da Capacidade padrão obtida com base na especificação do fabricante da Capacidade padrão e considerando que a temperatura não varia mais de 2 K durante a calibração
  - Incerteza tipo B e distribuição rectangular
  - Coef. Temp. =  $\pm (2 \times 30 \text{ ppm}) = \pm 60$  ppm
  
- Incerteza devida à estabilidade a curto prazo da ponte de medição obtida com base na especificação do fabricante
  - Incerteza tipo B e distribuição rectangular
  - Espec. =  $\pm 1$  fF
  
- Incerteza devida à dispersão das leituras efectuadas  
Foram obtidos os seguintes valores:

$C_{xm}$	$C_{pm}$	Valores calculados
10,00040 E-12	1,000130E-12	<b>9,999310E-12</b>
10,00020 E-12	1,000100E-12	<b>9,999410E-12</b>
10,00060E-12	1,000110E-12	<b>9,999710E-12</b>
10,00030E-12	1,000070E-12	<b>9,999810E-12</b>
10,00030E-12	1,000090E-12	<b>9,999610E-12</b>
10,00020E-12	1,000160E-12	<b>9,998810E-12</b>
10,00060E-12	1,000170E-12	<b>9,999110E-12</b>
10,00020E-12	1,000180E-12	<b>9,998610E-12</b>
10,00000E-12	1,000130E-12	<b>9,998910E-12</b>
10,00050E-12	1,000100E-12	<b>9,999710E-12</b>

Cada medida  $C_{pm}$  corresponde à média de 2 leituras, uma antes e outra após a leitura da capacidade a calibrar.

- Incerteza tipo A e distribuição normal
- Número de observações = 10
- Média aritmética = 9,9993 pF
- Desvio padrão experimental da média = 1,337E-16 F

Tabela resumo do processo de avaliação e balanço da incerteza:

Fonte de incerteza	Processo de avaliação	Valor da componente [F]	Tipo de avaliação (A ou B) / Distrib.	Incerteza padrão $[u(x_i)]$ [F]	Coefficiente Sensibilidade $[c_i]$	Componente Quadrático $[c_i \times u(x_i)]^2$	N.º de graus de liberdade $[v_i]$
Calibração da Capacidade	Certificado de Calibração	1,00E-15	B / Normal	5,00E-16	1	2,500E-31	50
Deriva da Capacidade	Histórico das calibrações	3,00E-15	B / Rectangular	1,7321E-15	1	3,000E-30	$\infty$
Varição da Temperatura	Estimativa	6,00E-16	B / Rectangular	3,4641E-16	1	1,200E-31	$\infty$
Estabilidade curto prazo	Especificação Ponte RLC	1,00E-15	B / Rectangular	5,7735E-16	1	3,333E-31	$\infty$
Dispersão Leituras	Desvio padrão experimental da média	1.337E-16	A / Normal	1.337E-16	1	1,788E-32	9

$\Sigma$	<b>3,721E-30</b>
$[v_{\text{efect}}]=$	1,08E4

Incerteza combinada $U_c(y) =$	1,93E-15 F
Factor de expansão, $k =$	2,00
Incerteza Expandida (95% confiança) $U =$	3,86E-15 F
Incerteza Expandida (95% confiança) $U =$	3,86 fF

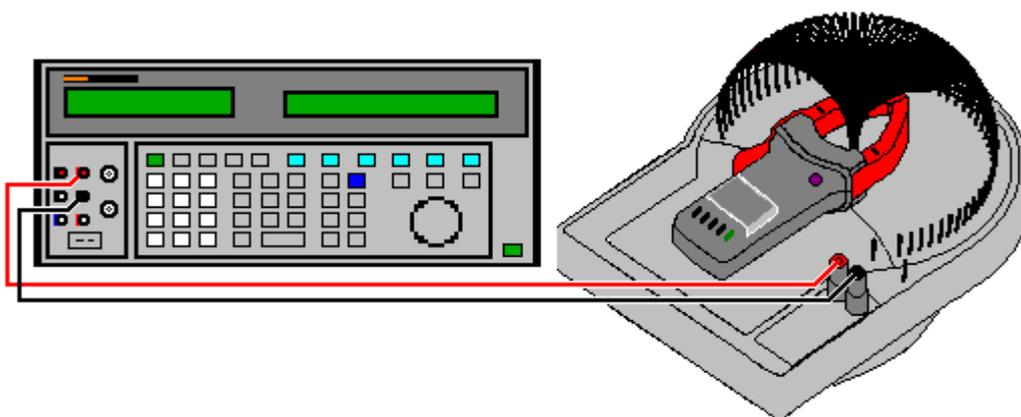
Resultado final :

**9,999 3 pF  $\pm$  3, 9 fF**

### 3. CALIBRAÇÃO DE PINÇAS AMPERIMÉTRICAS PELO MÉTODO DIRECTO

#### 3.1 DESCRIÇÃO DO MÉTODO DE MEDIÇÃO E ESQUEMA DE MONTAGEM

Este método consiste em aplicar a corrente gerada por um calibrador a uma bobina de 50 espiras, no interior da qual se coloca a pinça a calibrar.



A calibração é efectuada numa sala com temperatura e humidade controlada nas seguintes condições :

Temperatura :  $(23,0 \pm 1,5)$  °C

Humidade Relativa :  $(50 \pm 10)$  %HR

#### 3.2 DETERMINAÇÃO DA INCERTEZA

Na calibração da pinça de corrente consideramos as seguintes componentes para o cálculo da incerteza da medição, devidas a:

- incerteza do gerador de corrente em conjunto com a bobina usada;
- resolução da pinça;
- dispersão das leituras efectuadas;
- posição da pinça no interior da bobina.

### 3.3 EXEMPLO DE APLICAÇÃO

Considerou-se a calibração de uma pinça de corrente de no ponto de calibração de 100 A.

#### *Equipamento*

Gerador de corrente em conjunto com a bobina de 50 espiras:

gama usada 0 a 110 A

especificação =  $\pm (0,50 \% \text{ da saída} + 0,50 \text{ A}) @ T = (23 \pm 5) ^\circ\text{C}$

Pinça amperimétrica :

Valor da resolução na gama em calibração = 0,1 A

#### *Determinação das incertezas*

Incerteza do Gerador de corrente em conjunto com a bobina:

Esta componente é dada pela especificação do fabricante.

Considerando que o valor gerado foi 100 A

Tolerância =  $\pm (0,50 \% \times 100 \text{ A} + 0,5 \text{ A}) = \pm 1 \text{ A}$

Incerteza tipo B e distribuição rectangular

Incerteza devida à resolução da pinça:

$\pm [(\text{valor da resolução da gama})/2] = \pm (0,1 \text{ A}/2) = \pm 0,05 \text{ A}$

Incerteza tipo B e distribuição rectangular

Incerteza devida à dispersão das leituras efectuadas:

N.º de leituras	Valor lido [A]
1	100,1
2	100,0
3	100,2
Média	100,1
Desvio Padrão (experim. da média)	0,05774
N.º de graus de Liberdade	$n - 1 = 2$

Incerteza tipo A e distribuição normal

Incerteza devida à posição da pinça no interior da bobina:

Esta incerteza não foi quantificada neste exemplo, em virtude de se ter concluído que a pinça quando colocada na posição central da bobina, não alterava a incerteza da medição.

Tabela resumo do processo de avaliação e balanço da incerteza:

Fonte de incerteza	Processo de avaliação	Valor da componente [A]	Tipo de avaliação (A ou B) /Distrib.	Incerteza padrão [u(x <sub>i</sub> )] [A]	Coefficiente Sensibilidade [c <sub>i</sub> ]	Componente Quadrático [c <sub>i</sub> x u(x <sub>i</sub> )] <sup>2</sup>	N.º de graus de liberdade [v <sub>i</sub> ]
Dispersão de leituras	Desvio padrão experimental da média	0,1	A / normal	0,1	1	0,01	n - 1 = 2
Gerador de corrente e bobina de 50 esp.	Especificação do fabricante	1	B / rectangular	0,5774	1	0,3333	∞
Pinça amperim.	Resolução	0,05	B / rectangular	0,02887	1	8,333E-4	∞
						Σ	0,3442
						[V <sub>efect</sub> ] =	2369

Incerteza combinada U <sub>c</sub> (y) =	0,587 A
Factor de expansão =	2,00
Incerteza expandida (95%) U =	1,17 A

Resultado Final:

**(100,1 ± 1,2) A**

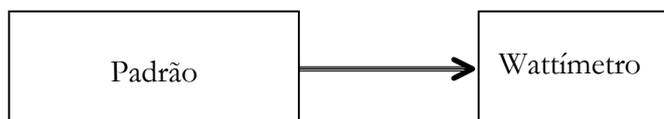
## **4. CALIBRAÇÃO DE UM WATTÍMETRO MONOFÁSICO**

### **4.1 DESCRIÇÃO DO MÉTODO DE MEDIÇÃO**

Tomando como válida a expressão  $P = U \times I \times \cos \phi$ , este método consiste na simulação de potência alternada por meio de duas fontes, tensão e corrente, em que a relação de fase dos dois sinais é controlada por um desfazador.

O método de calibração consiste na aplicação directa de um sinal de potência ao wattímetro.

Utiliza-se um sistema de geração de potência eléctrica como instrumento padrão e um wattímetro como instrumento de medição.



A calibração é realizada a uma temperatura de  $(23 \pm 3)$  °C, e humidade relativa de  $(50 \pm 15)$  % respeitando as especificações de funcionamento dos equipamentos.

O efeito de carga do circuito amperimétrico e voltimétrico do wattímetro sobre o gerador de potência, deve encontrar-se dentro dos limites de modo que este garanta a sua especificação.

A resistência dos cabos e contactos bem como a corrente de fuga, apresentam um erro sistemático considerado desprezável face à especificação do padrão.

(Cabos curtos de baixa capacidade (50 pF/0,5 m) e baixa f.e.m. térmica e de contacto.)

Respeitar o período de “warm-up” dos equipamentos.

Estabilização térmica dos equipamentos/montagem às condições ambientais descritas anteriormente.

## 4.2 DETERMINAÇÃO DA INCERTEZA

□ Identificação das várias componentes da incerteza, devidas a:

- fonte de tensão;
- fonte de corrente;
- desfazador;
- dispersão das leituras efectuadas;
- resolução do wattímetro a calibrar.

□ Modelo Matemático

O cálculo da incerteza é baseado na expressão a seguir mencionada.

$$P = U \times I \times fP$$

sendo:  $P$  → valor de potência em estudo

$U$  → valor de tensão aplicada

$I$  → valor de corrente injectada

$fP$  → factor de potência

□ Aplicação numérica

Considere-se  $U = 220 \text{ V}$ ,  $I = 5 \text{ A @ } 60 \text{ Hz}$  e  $fP = 0,707$  ( $\varphi=45^\circ$ )

Grandeza	Valor aplicado	Especificações	
		± ( % da leitura + val. residual )	
		% da leitura	Val. Residual
Tensão	220 V	0,05	6,6 mV
Corrente	5 A	0,06	2 mA
Factor de Potência	0,707	0,26	-

***Influência da fonte de tensão.***

- Tensão de 220 V

$$\text{Tolerância} = \pm ( 0,05 \% \times 220 \text{ V} + 6,6 \text{ mV} ) = \pm 116,6 \text{ mV}$$

- Incerteza tipo B e distribuição rectangular

***Influência da fonte de corrente.***

- Corrente de 5 A

$$\text{Tolerância} = \pm ( 0,06 \% \times 5 \text{ A} + 2 \text{ mA} ) = \pm 5,000 \text{ mA}$$

- Incerteza tipo B e distribuição rectangular

***Influência do factor de potência.***

- Factor de potência 0,707 ( $\varphi = 45^\circ$ )

$$\text{Tolerância} = \pm ( 0,26 \% \times 0,707 ) = \pm 1,838\text{E-3}$$

- Incerteza tipo B e distribuição rectangular

***Influência da resolução do wattímetro a calibrar.***

- Resolução do **wattímetro** = 0,1 W
- Incerteza tipo B e distribuição rectangular

**Desvio padrão das leituras**

Os diferentes valores obtidos, encontram-se apresentados na tabela seguinte:

N.º	Valor lido [W]
1	777,1
2	777,2
3	777,2
4	777,1
5	776,9
6	777,1
7	777,1
8	776,8
9	777,1
10	777,1

Média aritmética: 777,1 W  
 Desv. Pad. Experimental da Média = 3,958E-2 W  
 Nº de graus de liberdade: n-1 = 9

- Incerteza Tipo A e distribuição normal

Tabela resumo do processo de avaliação e balanço da incerteza:

Fonte de incerteza	Processo de avaliação	Valor da componente	Tipo de avaliação A ou B / Distrib.	Incerteza padrão [u(x <sub>i</sub> )]	Coefficiente Sensibilidade [c <sub>i</sub> ]	Componente Quadrático [c <sub>i</sub> x u(x <sub>i</sub> )] <sup>2</sup>	Nº de graus de liberdade [v <sub>i</sub> ]
Fonte de tensão	Especificação de fabricante	116,6E-3 V	B/Rectangular	6,731E-2 V	3,535 A	5,663E-2 W <sup>2</sup>	∞
Fonte de corrente	Especificação de fabricante	5,000E-3 A	B/Rectangular	2,89E-3 A	155,54 V	2,016E-1 W <sup>2</sup>	∞
Desfazador	Especificação de fabricante	1,838E-3	B/Rectangular	1,061E-3	1100 W	1,363 W <sup>2</sup>	∞
Dispersão de leituras	Desv. padrão experimental da média	3,958E-2 W	A/Normal	3,958E-2 W	1	1,567E-3 W <sup>2</sup>	n-1=9
Wattímetro	Resolução	0,05 W	B/Rectangular	57,74E-3 W	1	8,333E-3 W <sup>2</sup>	∞

Σ	1,623 W <sup>2</sup>
[v <sub>efect</sub> ] =	9,7E6

Incerteza Combinada Uc(y) =	1,274 W
Factor de expansão k =	2,00
Incerteza Expandida (95 %) U =	2,5 W

Resultado final  $P = ( 777,1 \pm 2,5 ) W$

## 5. MEDIÇÃO DE ATENUAÇÃO EM RF PELO MÉTODO DE SUBSTITUIÇÃO

### 5.1 DESCRIÇÃO DO MÉTODO DE MEDIÇÃO

O presente método implica uma leitura de referência (fig.1), após o que será introduzido o atenuador a calibrar (fig.2). A atenuação atribuível ao atenuador a calibrar é calculada a partir de  $B/A$  para leitura de valores lineares, ou como  $B - A$  se as leituras forem em dB, sendo:

$A$ : O valor da leitura de referência obtida através do esquema da figura 1.

$B$ : O valor da leitura obtida através do esquema da figura 2.

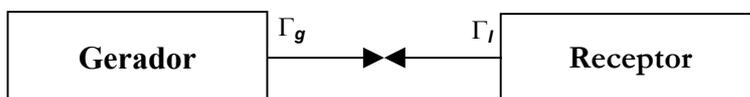


Fig. 1: Medida do nível de referência ( $A$ )

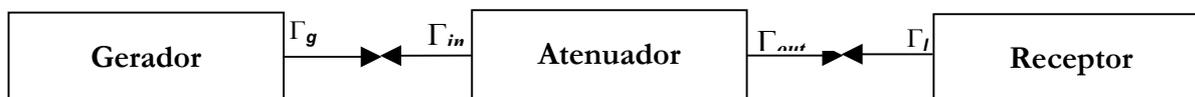


Fig. 2: Medida do nível ( $B$ )

$\Gamma_g$ : Coeficiente de reflexão à saída do gerador

$\Gamma_r$ : Coeficiente de reflexão à entrada do receptor

$\Gamma_{in}$ : Coeficiente de reflexão à entrada do atenuador

$\Gamma_{out}$ : Coeficiente de reflexão à saída do atenuador

### 5.2 DETERMINAÇÃO DA INCERTEZA

$P_a$  - Nível absoluto face a mudança de faixa de atenuação de entrada no receptor.

$P_l$  - Linearidade (no receptor).

$E_g$  - Estabilidade do gerador

$N$  - Ruído eléctrico

Desadaptação de Impedâncias:

$M_{g/l}$  - Incerteza devido à desadaptação de impedâncias entre o gerador e o receptor.

$M_{g/in}$  - Incerteza devido à desadaptação de impedâncias entre o gerador e o atenuador.

$M_{out/l}$  - Incerteza devido à desadaptação de impedâncias entre o atenuador e o receptor.

$M_{g/aten/l}$  - Incerteza devido à desadaptação de impedâncias entre o gerador e o receptor, após introdução do atenuador.

$L$  - Dispersão de Leituras

**Nota:**  $P_a$ ,  $P_b$ ,  $E_g$  e  $N$  são obtidos através das especificações do fabricante.  $M_{g/b}$ ,  $M_{g/in}$ ,  $M_{out/l}$ ,  $M_{g/aten/l}$  e  $L$  são estimadas por cálculo.

### 5.3 EXEMPLO DE APLICAÇÃO

Medição à frequência de 500 MHz da atenuação de um atenuador de 10 dB com Impedância IN/Out de 50  $\Omega$ ,  $|\Gamma_{in}| = |\Gamma_{out}| = 0,05$

Especificações do Equipamento utilizado na medição:

Receptor de medida

$$SWR(\rho_l) < 1,10 \text{ (0,05)}$$

Erro devido a mudança de faixa de nível: 0,2 %

Linearidade: 0,05 %

Ruído Eléctrico: 0,02 %

Gerador

$$SWR(\rho_g) < 1,30 \text{ (0,13)}$$

Estabilidade de saída: 0,1 dB

**Nota:**  $SWR = \frac{1 + \rho}{1 - \rho}$ , pelo que  $\rho = \frac{SWR - 1}{1 + SWR}$

SWR: Coeficiente de onda estacionária.

$\rho$ : Coeficiente de reflexão, sendo  $\rho = |\tilde{A}|$ , com  $\Gamma$ : Coeficiente de Reflexão Complexo.

As componentes de incerteza a considerar são:

- $P_a$ : Inexistente, isto porque não houve lugar a mudança de faixa de atenuação de entrada do receptor.
- $P_f$ : 0,05 %
- $E_g$ : 0,1 dB a que correspondem 1,16 % do sinal gerado, isto porque  $X(\%) = 100 \times \left[ 10^{\frac{dB}{20}} - 1 \right]$
- $N$ : 0,02 %

- **Desadaptação de Impedâncias**

A incerteza devida a desadaptações, tem uma distribuição em U obtida a partir de:

$$\text{Desadaptação de impedâncias} = \rho_1 \times \rho_2 \times \text{Ganho}_{\text{Directo}} \times \text{Ganho}_{\text{Inverso}} \times 100 \quad [\% \text{ de Tensão}]$$

Considera-se que quando se tem uma ligação directa os ganhos directo e inverso tomam o valor “1”.

Temos então:

$$Mg/l = \rho_g \times \rho_l \times 100 = 0,13 \times 0,05 \times 100 = 0,65$$

$$Mg/in = \rho_g \times \rho_{in} \times 100 = 0,13 \times 0,05 \times 100 = 0,65$$

$$Mout/l = \rho_{out} \times \rho_l \times 100 = 0,05 \times 0,05 \times 100 = 0,25$$

$$Mg/aten/l = \rho_g \times \left( 10^{\frac{-(Aten.média)}{20}} \right) \times \rho_l \times 100 = 0,13 \times (0,316)^2 \times 0,05 \times 100 = 0,065$$

- **L**: No ensaio efectuado obtiveram-se as seguintes diferenças entre os valores de referência (sem atenuador) e com o atenuador inserido:

Leitura n.º	Diferenças [dB]
1	10,008
2	10,016
3	10,013
4	10,012
5	10,019
6	9,990
7	9,994
8	9,989
9	9,989
10	9,995

Média aritmética:	10,003 dB
Desvio Padrão Experimental da Média:	0,00385 dB
N.º de Graus de Liberdade:	n-1=9

pelo que  $L = 0,00385$  dB

Tabela resumo do processo de avaliação e balanço da incerteza:

Fonte de incerteza	Processo de avaliação	Valor da componente [ $x_i$ ] [%]	Tipo de avaliação (A ou B) /Distrib.	Incerteza padrão [ $u(x_i)$ ]	Coefficiente Sensibilidade [ $c_i$ ]	Componente Quadrático [ $c_i \cdot u(x_i)$ ] <sup>2</sup>	N.º de graus de liberdade [ $v_i$ ]
$P_I$	Especif. Fabricante	0,05	B/Rectangular	0,02887	1	0,0008333	□
$E_g$	Especif. Fabricante	1,16	B/Rectangular	0,6697	1	0,4485	□
$N$	Especif. Fabricante	0,02	B/Rectangular	0,01155	1	0,0001333	□
$M_{g/l}$	Des. Imp.	0,65	B/Forma U	0,4596	1	0,2113	□
$M_{g/in}$	Des. Imp.	0,65	B/Forma U	0,4596	1	0,2113	□
$M_{out/l}$	Des. Imp.	0,25	B/Forma U	0,1768	1	0,03125	□
$M_{g/aten/l}$	Des. Imp.	0,065	B/Forma U	0,04596	1	0,002113	□
$L$	Desv. padrão experim. da média	0,00385	A/Normal	0,00385	1	1,482E-05	9

Incerteza combinada $U_c(y) =$	0,9515 %
Factor de expansão, $k =$	2
Incert. Expandida (95% confiança) $U =$	1,903 %

$\Sigma$	<b>0,9054</b>
[ $v_{efect}$ ]=	3,4E10

Aplicando a incerteza obtida na fórmula  $dB = 20 \log \left[ \frac{(V\%)}{100} + 1 \right]$

Temos que 1,903 % correspondem a 0,1637 dB, pelo que o atenuador de 10 dB em causa terá uma atenuação compreendida entre:

$10,00 \text{ dB} \pm 0,16 \text{ dB}$
--

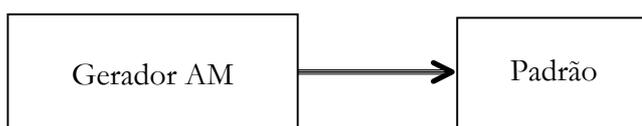
## 6. MEDIÇÃO DE MODULAÇÃO EM AMPLITUDE (AM).

### 6.1 DESCRIÇÃO DO MÉTODO DE MEDIÇÃO

O método de medição consiste na aplicação directa de um sinal modulado em amplitude, gerado pelo equipamento a calibrar, a um analisador de espectros com as seguintes características:

- Frequência da portadora 20 MHz,
- Frequência da moduladora 1 kHz,
- Percentagem de modulação 80,0 % AM

Utiliza-se o analisador de espectros como instrumento padrão.



A calibração é realizada a uma temperatura de  $(23 \pm 3)$  °C, e humidade relativa de  $(50 \pm 15)$  % respeitando as especificações de funcionamento dos equipamentos.

Respeitar o período de “warm-up” dos equipamentos.

Estabilização térmica dos equipamentos/montagem às condições ambientais descritas anteriormente.

## 6.2 DETERMINAÇÃO DA INCERTEZA

### □ Identificação das várias componentes da incerteza

- Erro de linearidade do padrão;
- resolução do equipamento a calibrar,
- dispersão das leituras efectuadas.

### □ Modelo Matemático

O cálculo da incerteza é baseado na expressão a seguir mencionada.

$$m = (A_{ble} / A_p) + (A_{bid} / A_p)$$

sendo:  $A_{ble}$  → valor da amplitude na banda lateral esquerda,

$A_{bid}$  → valor da amplitude na banda lateral direita,

$A_p$  → valor da amplitude na portadora.

### *Aplicação numérica*

$$u [(A_{ble} / A_p) + (A_{bid} / A_p)] \text{ linearidade do padrão}$$

Esta componente é dada pela especificação do analisador de espectros usado. Considera-se que é utilizado o analisador para a medição intercalada de  $(A_{ble} + A_{bid})$  e  $(A_p)$ . Deste modo a contribuição das incertezas está correlacionada através de uma razão, reduzindo a incerteza somente para a diferença provocada pelo erro de linearidade ao longo da escala. O erro máximo de linearidade do analisador de espectros para a escala em questão é de 1,5 %.

- Incerteza tipo B e distribuição rectangular

### resolução do equipamento

- Resolução do equipamento 0,05 % AM
- Incerteza tipo B e distribuição rectangular

### desvio padrão das leituras

Os diferentes valores obtidos, (% AM) encontram-se apresentados na tabela seguinte:

Nº	$[(A_{bic}/A_p) + (A_{bid}/A_p)] \times 100$
1	81,233
2	81,233
3	81,233
4	81,233
5	81,195
6	81,271
7	81,195
8	81,233
9	81,195
10	81,271

Média aritmética: 81,229 % AM  
 Desv. Pad. Exp. da Média = 0,008867 % AM  
 Nº de graus de liberdade: n-1 = 9

- Incerteza Tipo A e distribuição normal

Tabela resumo do processo de avaliação e balanço da incerteza:

Fonte de Incerteza	Processo de avaliação	Valor da componente [%AM]	Tipo de avaliação A ou B / Distrib.	Incerteza padrão $[u(x_i)]$ [% AM]	Coefficiente Sensibilidade [c]	Componente Quadrático $[c_i \cdot u(x_i)]^2$ [%AM] <sup>2</sup>	N.º de graus de liberdade [v <sub>i</sub> ]
$(A_{ble} / A_p)$	Especificação do fabricante	0,6093	B / Rectangular	0,3517	1	0,1237	∞
$(A_{bld} / A_p)$	Especificação do fabricante	0,6092	B / Rectangular	0,3517	1	0,1237	∞
Dispersão	Desv. padrão experimental da média	8,867E-03	A / Normal	8,867E-03	1	7,862E-05	n-1=9
Eq. a calibar	Resolução	0,05	B / Rectangular	0,0289	1	8,333E-04	∞

Incerteza Combinada $U_c(y) =$	0,498 % AM
Factor de expansão $k =$	2,00
Incerteza Expandida (95%) $U =$	1,0 % AM

$\Sigma$	0,2484
$[v_{\text{efect}}] =$	9,0E7

Resultado final:

$$P = (81,2 \pm 1,0) \% \text{ AM}$$

## 7. MEDIÇÃO DE POTÊNCIA RF

### 7.1 CAMPO DE APLICAÇÃO

Pretende-se descrever o procedimento de medição de potência na banda espectral da Rádio Frequência (RF), identificando as principais contribuições para a determinação da incerteza na medição. O procedimento aplica-se a sistemas de medição em “open loop”.

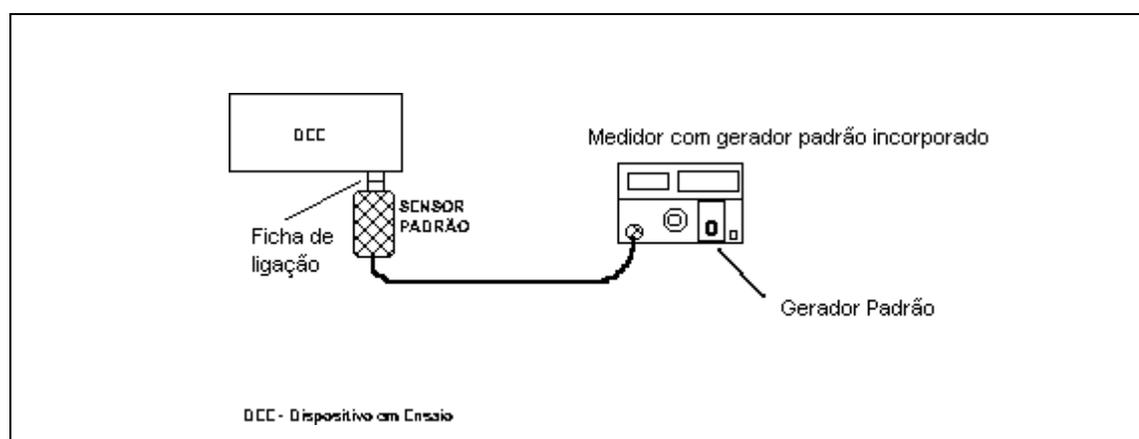
### 7.2 DESCRIÇÃO DO MÉTODO DE MEDIÇÃO

A medição baseia-se no método de substituição de potência dc.

O sistema de medição é composto por:

- um sensor de potência que converte a potência RF a medir ( $P_g$ ) numa potência dc equivalente ( $P_{sub}$ );
- um medidor que irá medir  $P_{sub}$ ;
- um gerador padrão (1 mW @ 50 MHz) que normalmente está integrado com o medidor num só equipamento.

A figura seguinte mostra este sistema com o sensor ligado ao gerador em ensaio por forma a efectuar a medição da potência gerada.



Com o gerador padrão desligado, ligar o sensor ao gerador padrão.

Para que seja removido qualquer desvio de natureza eléctrica na medição da potência, ajustar o medidor por forma a que dê a indicação de 0 mW.

Ligar o gerador padrão (1 mW @ 50 MHz).

Para adaptar o medidor para a sensibilidade do sensor padrão, inserir o factor de calibração do sensor para a frequência de 50 MHz e ajustar o medidor por forma a que dê a indicação de 1 mW.

Por fim ligar o sensor ao gerador em ensaio e introduzir o factor de calibração para a frequência em causa.

Para o resultado da medição irá considerar-se o valor médio de 10 leituras.

## 7.3 DETERMINAÇÃO DA INCERTEZA

### 7.3.1 Identificação das componentes de incerteza

Na medição de potência pelo método descrito as principais componentes para a incerteza são devidas a:

1.  $M_u$  - desadaptação de impedâncias entre o sensor e o gerador em ensaio
2.  $M_{uc}$  - desadaptação de impedâncias entre o sensor e o gerador padrão
3.  $K_c$  - factor de calibração para a frequência do gerador padrão
4.  $K_b$  - factor de calibração para a frequência em ensaio
5.  $\Delta K_b$  - deriva do factor de calibração para a frequência em ensaio
6.  $P_{cal}$  - nível de potência do gerador padrão
7.  $\Delta P_{cal}$  - deriva do nível de potência do gerador padrão
8.  $P_m$  - medidor de potência dc.
9.  $t$  - Ruído eléctrico.
10. Dispersão das leituras

### 7.3.2 Modelo Matemático

A potência à entrada do sensor,  $P_{gb}$  não é a que seria fornecida pelo gerador se este estivesse perfeitamente adaptado,  $P_{gZ0}$ . Ou seja a impedância do sensor é diferente da impedância de saída do gerador.

A relação entre estas duas quantidades é dada por:

$$P_{gz\ 0} = \frac{|1 - \tilde{\Gamma}_l \tilde{\Gamma}_g|^2}{1 - |\tilde{\Gamma}_l|^2} P_{gl} \quad (1)$$

onde:

$\Gamma_l$  é o coeficiente de reflexão de saída do gerador

$\Gamma_g$  é o coeficiente de reflexão de entrada do sensor

Nem toda a potência  $P_{gl}$  é dissipada no elemento sensor, existem perdas. Pelo que a potência de substituição dc,  $P_{sub}$ , não é exactamente igual a  $P_{gl}$ . Ou seja:

$$P_{sub} = \eta_e P_{gl} \quad (2)$$

onde:

$\eta_e$  é a eficiência efectiva de conversão dc.

O modelo matemático para a desadaptação,  $M_u$  e a definição do factor de calibração,  $K_b$  são, respectivamente dados por:

$$M_u = |1 - \tilde{\Gamma}_l \tilde{\Gamma}_g|^2 \quad (3) \text{ e } (4)$$

$$K_b = \frac{1}{\eta_e (1 - |\tilde{\Gamma}_l|^2)}$$

A relação entre a Potência medida pelo medidor,  $P_m$ , e a potência dc de substituição,  $P_{sub}$ , é dada pela seguinte equação:

$$P_m = m \times P_{sub} + t \quad (5)$$

onde:

$t$  representa a parcela de erro devido a ruído de natureza eléctrica, inerente ao sistema de medição (sensor e medidor);

$m$  traduz o desvio entre  $P_m$  e  $P_{sub}$  (sem considerar o ruído) devido à linearidade e sensibilidade do sensor.

Das equações de (1) a (5) chega-se a:

$$P_{gz0} = \frac{M_u K_b (P_m - t)}{m} \quad (6)$$

O valor para  $m$  é determinado implicitamente com o ajuste efectuado para o valor de referência do gerador padrão:

$$m = \frac{M_{uc} K_c (P_{mc} - t)}{P_{cal}} \quad (7)$$

Em que  $P_{mc}$  é o valor medido, após ajuste, da Potência de calibração. Isto é,  $P_{mc} = P_{cal}$ .

Tendo-se, finalmente:

$$P_{gz0} = \frac{M_u K_b P_{cal}}{M_{uc} K_c} \times \frac{P_m - t}{P_{mc} - t} \quad (8)$$

## 7.4 EXEMPLO DE APLICAÇÃO

Pretende-se medir a potência nominal de 50  $\mu\text{W}$  fornecida por um gerador com impedância de saída de 50  $\Omega$  à frequência de 2 GHz.

### 7.4.1 Desadaptação de impedâncias entre o sensor e o gerador em ensaio, $M_u$ .

Considere-se:

$$|\Gamma_l| < 0,091$$

$$|\Gamma_g| < 0,2$$

Atendendo a que não se conhecem  $\arg \Gamma_l$  e  $\arg \Gamma_g$ , tem-se que

$$0,9639 = (1 - |\tilde{\Gamma}_l| |\tilde{\Gamma}_g|)^2 \leq |1 - \tilde{\Gamma}_l \tilde{\Gamma}_g|^2 \leq (1 + |\tilde{\Gamma}_l| |\tilde{\Gamma}_g|)^2 = 1,0367$$

$$M_u = 1$$

$u(M_u) = 0,0367$  Tipo B distribuição em forma de U.

#### 7.4.2 Desadaptação de impedâncias entre o sensor e o gerador padrão, $M_{uc}$ .

Considere-se:

$$|\Gamma_l| < 0,091$$

$$|\Gamma_c| < 0,024$$

Atendendo a que não se conhecem  $\arg \Gamma_l$  e  $\arg \Gamma_g$ , tem-se que

$$0,9956 = (1 - |\tilde{\Gamma}_l| |\tilde{\Gamma}_g|)^2 \leq |1 - \tilde{\Gamma}_l \tilde{\Gamma}_g|^2 \leq (1 + |\tilde{\Gamma}_l| |\tilde{\Gamma}_g|)^2 = 1,0044$$

$$M_{uc} = 1$$

$u(M_{uc}) = 0,0044$  Tipo B distribuição em forma de U.

#### 7.4.3 Potência e Factor de calibração para a frequência de referência 50 MHz, $P_{mc}$ e $K_c$

Normalmente os sensores de potência são calibrados a 1 mW, tomando-se como referência a frequência de 50 MHz. Neste caso  $u(K) = 0$ .

$$K_c = 1$$

$$u(K_c) = 0$$

#### 7.4.4 Factor de calibração para a frequência de ensaio 2 GHz, $K_b$

Considere-se

$$K_b = 0,93 \text{ (93 \%)}$$

$$u(K_b) = 0,03 \text{ (3 \%)} \text{ Tipo B distribuição normal}$$

#### 7.4.5 Deriva do factor de calibração para a frequência de ensaio 2 GHz, $\Delta K_b$

Considere-se

$$\Delta K_b = \pm 0,01 \text{ (1 \%)} \text{ Tipo B distribuição rectangular}$$

#### 7.4.6 Potência RF de referência, $P_{cal}$

$$P_{cal} = 1 \text{ mW}$$

$$u(P_{cal}) = 0,9 \% = 9 \text{ }\mu\text{W}, \text{ Tipo B distribuição normal}$$

#### 7.4.7 Deriva da potência RF de referência, $P_{cal}$

$$\Delta P_{cal} = \pm 0,8 \% = 8 \text{ }\mu\text{W}, \text{ Tipo B distribuição rectangular}$$

#### 7.4.8 Exactidão do medidor de potência dc, $P_m$

$$u(P_m) = 0,5 \% = 0,25 \text{ }\mu\text{W} \text{ Tipo B distribuição rectangular}$$

#### 7.4.9 Ruído eléctrico

$$t = 0 \text{ pW}$$

$$u(t) = 15 \text{ pW} \text{ Tipo B distribuição rectangular}$$

### 7.4.10 Leituras obtidas

$P_m = 50,06 \mu\text{W}$  Obtido pela média das 10 leituras

$s(P_m) = 0,02 \mu\text{W}$  Obtido pelo desvio padrão experimental da média das 10 leituras

Tipo A distribuição normal

### 7.4.11 Processo de avaliação

Tabela resumo do processo de avaliação e balanço da incerteza:

Fonte de incerteza	Processo de avaliação	Valor da componente $[x_i]$	Tipo de avaliação (A ou B) / Distrib.	Incerteza padrão $[u(x_i)]$	Coefficiente Sensibilidade $[c_i]$	Componente Quadrático $[c_i \times u(x_i)]^2$	Nº de graus de liberdade $[v_i]$
$M_u$	Especificação	0,0367	Tipo B / Forma U	0,02595	46,556 $\mu\text{W}$	1,460 $(\mu\text{W})^2$	$\infty$
$M_w$	Especificação	0,0044	Tipo B / Forma U	0,003111	-46,556 $\mu\text{W}$	0,02098 $(\mu\text{W})^2$	$\infty$
$K_b$	Certificado	0,03	Tipo B / normal	0,015	50,060 $\mu\text{W}$	0,5639 $(\mu\text{W})^2$	50
$\Delta K_b$	Deriva	0,01	Tipo B / rectangular	0,00577	50,060 $\mu\text{W}$	0,08343 $(\mu\text{W})^2$	$\infty$
$P_{val}$	Certificado	9 $\mu\text{W}$	Tipo B / normal	4,50 $\mu\text{W}$	4,656E-02	0,04390 $(\mu\text{W})^2$	50
$\Delta P_{val}$	Deriva	8 $\mu\text{W}$	Tipo B / rectangular	4,619 $\mu\text{W}$	4,656E-02	0,04625 $(\mu\text{W})^2$	$\infty$
$P_m$	Especificação	0,25 $\mu\text{W}$	Tipo B / rectangular	0,1443 $\mu\text{W}$	0,93	0,01801 $(\mu\text{W})^2$	$\infty$
$T$	Especificação	1,50E-05 $\mu\text{W}$	Tipo B / rectangular	8,660E-06 $\mu\text{W}$	-0,8834	5,853E-11 $(\mu\text{W})^2$	$\infty$
Dispersão das Leituras	Desvio padrão experimental da média	0,02 $\mu\text{W}$	Tipo A / normal	0,01 $\mu\text{W}$	1	1,00E-04 $(\mu\text{W})^2$	9

Incerteza combinada	1,495 $\mu\text{W}$
Factor de expansão	2
Incerteza expandida	2,99 $\mu\text{W}$

$v_{effect} =$	7,8E2
----------------	-------

Resultado final

$$P_{gz0} = 50,1 \mu\text{W} \pm 3,0 \mu\text{W}$$

## **8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- [1] “Calibration: Philosophy in Practice”, Fluke, Second edition, 1994
- [2] ETSI Technical Report 01-018: Part 1: Subpart 1: Junho de 97
- [3] ETSI Technical Report 028: "Uncertainties in the Measurement of Mobile Radio Equipment Characteristics".
- [4] “Guia para a Expressão da Incerteza de Medição nos Laboratórios de Calibração” (tradução da versão do EA-4/02), IPQ, Maio de 1998
- [5] “Guide to the Expression of the Uncertainty in Measurement”, International Organization for Standardization, First Edition, BIPM, 1993.
- [6] Hewlett-Packard Company, Application Note 64 “Microwave Power Measurement”, 1977.
- [7] Namas, “The Expression of Uncertainty and Confidence in Measurement for Calibration”, Ed. 8, 1995.
- [8] “Vocabulário Internacional de Metrologia”, IPQ, 2ª edição, 1996.

## Últimos guias publicados

- 1** CALIBRAÇÃO DE MATERIAL VOLUMÉTRICO  
1995; ISBN 972 - 96727 - 0 - 9
- 2** AUDITORIAS INTERNAS DE LABORATÓRIOS QUÍMICOS  
1995; ISBN 972 - 96727 - 1 - 7
- 3** VALIDAÇÃO DE RESULTADOS EM LABORATÓRIOS QUÍMICOS  
1996; ISBN 972 - 96727 - 2 - 5
- 4** DETERMINAÇÃO DA MELHOR INCERTEZA DE MEDIÇÃO DE UM LABORATÓRIO DE CALIBRAÇÃO DE FORÇAS  
1996; ISBN 972 - 96727 - 3 - 3
- 5** DETERMINAÇÃO DA INCERTEZA DOS RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO DE INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO DE FORÇAS  
1996; ISBN 972 - 96727 - 4 - 1
- 6** ACREDITAÇÃO DE LABORATÓRIOS DE ENSAIOS MICROBIOLÓGICOS  
1996; ISBN 972 - 96727 - 5 - X
- 7** ENSAIOS INTERLABORATORIAIS EM QUÍMICA  
1996; ISBN 972 - 96727 - 6 - 8
- 8** DETERMINAÇÃO DA INCERTEZA DA CALIBRAÇÃO DE MASSAS  
1997; ISBN 972 - 96727 - 7 - 6
- 9** ALGUNS EXEMPLOS DE CARTAS DE CONTROLO EM LABORATÓRIOS DE ANÁLISE QUÍMICA  
1998; ISBN 972 - 96727 - 8 - 4
- 10** DETERMINAÇÃO DA INCERTEZA DOS RESULTADOS DE MEDIÇÃO NA CALIBRAÇÃO DE INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO NA ÁREA ELÉCTRICA  
1999; ISBN 972 - 96727 - 9 - 2
- 10** DETERMINAÇÃO DA INCERTEZA DOS RESULTADOS DE MEDIÇÃO NA CALIBRAÇÃO DE INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO NA ÁREA ELÉCTRICA VOLUME II  
1999; ISBN 972 - 96727 - 9 - 2
- 11** ELABORAÇÃO DO MANUAL DA QUALIDADE DE LABORATÓRIOS  
1999; ISBN 972 - 8574 - 00 - 2
- 12** DETERMINAÇÃO DA INCERTEZA DOS RESULTADOS DE VERIFICAÇÃO DE MÁQUINAS DE ENSAIO DE TRACÇÃO OU COMPRESSÃO  
1999; ISBN 972 - 8574 - 01 - 0
- 13** VALIDAÇÃO DE MÉTODOS INTERNOS DE ENSAIO EM ANÁLISE QUÍMICA  
2000; ISBN 972 - 8574 - 02 - 9
- 14** QUESTIONÁRIO DE AVALIAÇÃO DA SITUAÇÃO DOS LABORATÓRIOS DE ANÁLISES CLÍNICAS FACE À NOVA NORMA EN ISO/IEC 17025  
2000; ISBN 972 - 8574 - 03 - 7
- 15** GARANTIA DA QUALIDADE DE SISTEMAS INFORMÁTICOS EM LABORATÓRIOS  
2000; ISBN 972 - 8574 - 04 - 5
- 16** DETERMINAÇÃO DA MELHOR INCERTEZA DE MEDIÇÃO ASSOCIADA À CALIBRAÇÃO DE BALANÇAS MANOMÉTRICAS  
2000; ISBN 972 - 8574 - 05 - 3



Associação de Laboratórios Acreditados de Portugal

Rua Filipe Folque, 2, 6º Dto  
1050-113 LISBOA  
Telef. 21 313 98 40  
Fax 21 313 98 41  
relacre@mail.telepac.pt  
www.relacre.pt