

4

Incerteza de medição da cadeia de calibração proposta

4.1

Introdução

4.1.1

Incerteza de medição

Uma vez que o valor verdadeiro do resultado de uma medição não é conhecido, qualquer resultado de uma medição será somente uma aproximação ou estimativa do valor de um mensurando. Sendo assim, a equação completa que representará o valor de tal mensurando deverá incluir a dúvida deste resultado, a qual é traduzida por sua incerteza de medição. A incerteza de medição é a indicação quantitativa da qualidade dos resultados de medição, sem a qual os mesmos não poderiam ser comparados entre si, com os valores de referência especificados ou com um padrão.

De acordo com o contexto da globalização, primordialmente na comercialização de produtos, é necessária a adoção de um procedimento universal para a estimativa da incerteza dos resultados de medição, tendo em vista a necessidade da comparabilidade entre resultados, visando ao intercâmbio entre as instituições nacionais e internacionais, em atendimento principalmente à nova era do mercado mundial.

O Guia para Expressão da Incerteza data de 1977, com o CIPM (*Comité International des Poids et Mètures*) reconhecendo a ausência de um consenso mundial sobre o cálculo da incerteza de um resultado de medição. O CIPM então solicitou ao BIPM (*Bureau International des Poids et Mètures*) que tratasse o problema em conjunto com os laboratórios nacionais de metrologia, e que fizesse uma recomendação para uma metodologia de estimativa de incerteza de medição. Esta responsabilidade foi conferida à ISO (*International Organization for Standardization*) – TAG 4 (*Technical Advisory Group on Metrology 4*). O TAG 4, por sua vez, estabeleceu o *Working Group 3 (WG3)* composto por especialistas designados pelo BIPM, IEC (*International Electrotechnical Commission*), ISO e OIML (*International Organization of Legal Metrology*) sendo, também, referendado pelo presidente do TAG 4.

A primeira versão do Guia para Expressão da Incerteza de Medição surgiu em 1993 como ISO/TAG4-WG3 1993. Este guia foi revisado e publicado em 1995 com o título: "*Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*" (ISO GUM 95).

Mais recentemente no Brasil, foi publicada a tradução do Guia com o seguinte título: "Guia para a Equação da Incerteza de Medição - Terceira Edição Brasileira *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement* - Edição Revisada (Agosto de 2003) - ABNT - INMETRO".

A Divisão de Acreditação de Laboratórios DICLA - INMETRO, de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025:2005, exige que os laboratórios postulantes a acreditação na Rede Brasileira de Calibração (RBC) e na Rede Brasileira de Laboratório de Ensaios (RBLE) apresentem as suas incertezas de acordo com as diretrizes do documento EA-4/02 (1999). Este documento apresenta uma planilha para a compilação das incertezas das fontes que influenciam uma medição e define o conceito de melhor capacidade de medição do laboratório. A melhor capacidade de medição expressa o nível de qualidade da medição proposto pelo laboratório na acreditação para a prestação dos serviços que o mesmo se propõe a realizar, no âmbito da Rede Brasileira de Calibração e/ou Rede Brasileira de Laboratórios de Ensaios.

4.1.2

Interpretação do conceito da incerteza de medição

A Figura 35 facilita o entendimento de um Resultado Corrigido de Uma Medição, segundo o VIM.

A Figura 35 mostra que o erro aleatório de uma medição, o qual é avaliado por uma medida de dispersão (dúvida) sempre permanecerá. Conclui-se, então, que a incerteza é avaliada por uma medida de dispersão. Na Figura 35, somente é representada a incerteza referente às repetições de uma medição. A avaliação da incerteza total do mensurando é estimada pela propagação de todas as incertezas referentes a suas fontes de entrada.

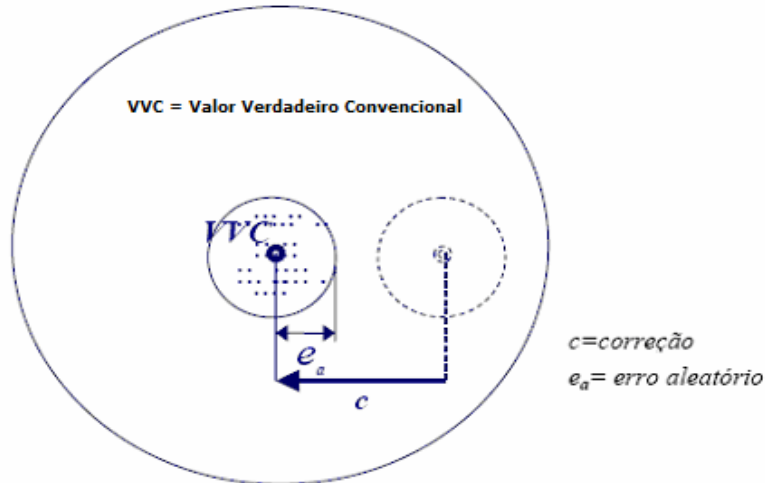


Figura 35 – Resultado Corrigido de uma Medição.

A avaliação da incerteza do resultado de medição pode ser exemplificada da seguinte forma: o mensurando é sempre a saída e as respectivas fontes de incerteza, as entradas. Esta explicação pode ser mostrada em um gráfico cartesiano, no qual a ordenada é o mensurando e cada abscissa é uma das fontes de entrada de incerteza. Por exemplo, na avaliação da incerteza de medição de um mensurando $y = f(x, a)$ podem ser elaborados os gráficos da Figura 36.

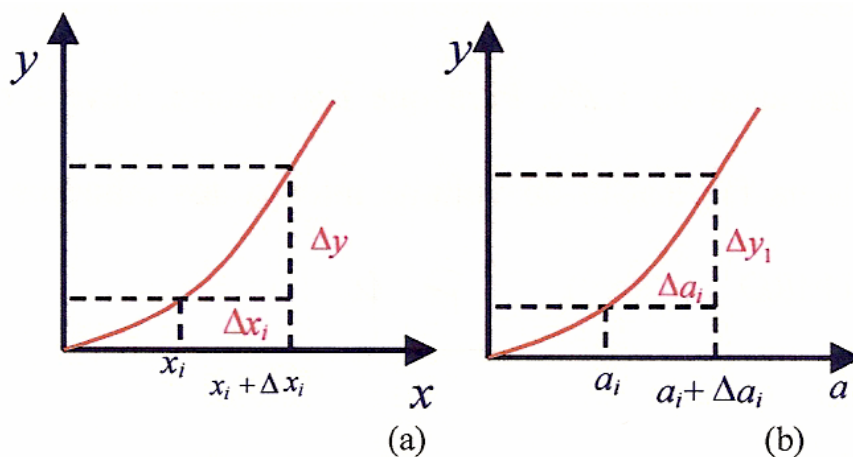


Figura 36 – Variação do mensurando y em função das grandezas de entrada (a) x e (b) a .

Observando os gráficos da Figura 36, verifica-se que existe uma função que define como o mensurando varia em relação a cada fonte de entrada. Neste

momento do processo de avaliação da incerteza, há a possibilidade de se visualizar o impacto da incerteza de cada fonte na incerteza do mensurando, uma vez que pode ser calculada a taxa de variação da incerteza do mensurando em relação a cada fonte de entrada. Esta taxa de variação do mensurando em relação a cada fonte de entrada denomina-se coeficiente de sensibilidade, sendo este definido pela derivada parcial da função em relação a cada entrada.

O conceito da derivada define o caráter pontual da incerteza de medição. Isto significa que a avaliação da incerteza de medição de um instrumento é realizada ponto a ponto em toda sua faixa de operação. A aplicação do coeficiente de sensibilidade permite a conversão da unidade da fonte de entrada para a do mensurando, levando-se em conta também que trata do efeito de ponderação. Por exemplo, numa titulação, o mensurando é a concentração desconhecida de uma solução, a qual é definida pela seguinte equação:

$$N' = \frac{NV}{V'} \quad (1)$$

Onde:

N' = concentração da solução desconhecida;

N = concentração da solução padrão;

V = volume de solução padrão utilizada;

V' = volume da solução desconhecida utilizada.

O coeficiente de sensibilidade da incerteza da concentração N' em relação à incerteza da concentração N é definida pela equação X.

$$\frac{\partial N'}{\partial N} = \frac{V}{V'} \quad (2)$$

Neste caso, quando as unidades do mensurando e da fonte de entrada são as mesmas, o coeficiente de sensibilidade será igual à unidade, caso contrário, o coeficiente de sensibilidade será diferente do valor unitário. Isto mostra que o coeficiente de sensibilidade, além de atuar como conversor de unidades, é também um fator de ponderação.

4.2

Estimativa da incerteza de medição conforme o ISO GUM 95

A metodologia do ISO GUM 95 pode ser resumida nos seguintes passos principais: 1) definição do mensurando; 2) elaboração do diagrama causa-efeito; 3) estimativa das incertezas das fontes de entrada; 4) cálculo dos coeficientes de sensibilidade; 5) cálculo das componentes de incerteza; 6) combinação das componentes; 7) cálculo dos graus de liberdade efetivos; 8) determinação do fator de abrangência; 9) estimativa da incerteza expandida.

Dentre estas etapas, a mais importante é a definição do mensurando. Uma boa fundamentação do mensurando certamente possibilita a elaboração de um diagrama causa-efeito adequado e, conseqüentemente, uma estimativa da incerteza mais realista, a qual contemple todas as fontes que impactam no mensurando.

Na implementação desta metodologia deve-se interpretar e avaliar os valores gerados a cada passo, para que a estimativa da incerteza de medição não se torne apenas um simples cálculo ou uma atividade para atender ao requisito respectivo da norma ABNT NBR ISO/IEC 17025:2005.

A metodologia de cálculo estabelecida desta forma possibilita ao técnico identificar rapidamente fontes de incerteza que são preponderantes em qualquer instante no processo de estimativa geral.

4.2.1

Definição do mensurando

Geralmente o mensurando não é medido diretamente, mas determinado a partir de “n” grandezas de entrada, por meio de uma relação funcional:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (3)$$

onde x_1, x_2, \dots, x_n são as grandezas cujos valores e respectivas incertezas são diretamente determinados durante a medição como, por exemplo: temperatura ambiente, pressão barométrica, umidade, etc.

Existem também outras grandezas cujos valores e incertezas provêm de fontes externas para a medição, tais como: certificados de padrões, declaração do fabricante, materiais de referência, valores de referência na literatura, etc.

4.2.2 Diagrama causa-efeito

Um diagrama causa-efeito bem elaborado é uma ferramenta muito importante para a definição da equação do mensurando. A Figura 37 apresenta o diagrama causa-efeito para a estimativa da incerteza de medição, por exemplo, uma Força com as seguintes condições de contorno: I) o valor da grandeza massa foi obtido a partir de uma média de 10 leituras e cada repetição do valor de massa foi medida por uma balança dispondo de um certificado de calibração; II) a aceleração da gravidade local apresenta um resultado de medição.

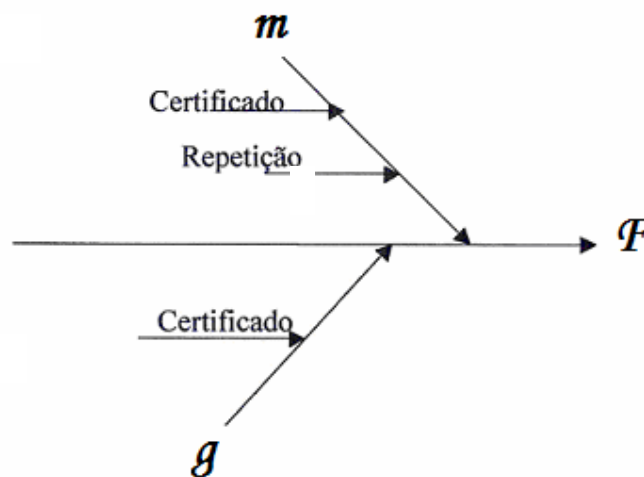


Figura 37 - Diagrama causa-efeito da medição de uma força.

O diagrama causa-efeito identifica todas as fontes de incerteza que definem a incerteza do mensurando.

O sistema de calibração proposto é ilustrada na Figura 38, aqui repetida por conveniência.

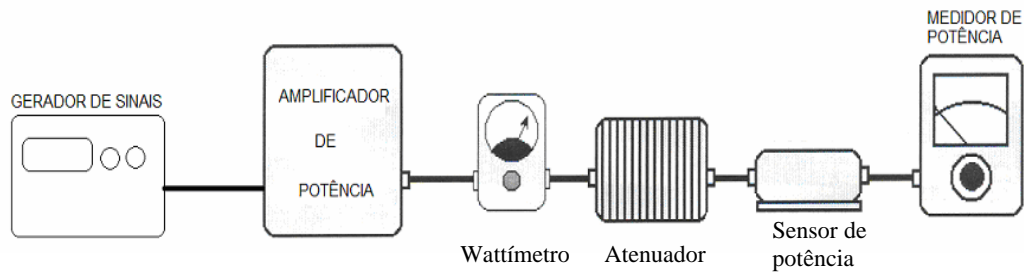


Figura 38 - Nova Metodologia proposta para calibração do medidor e detector de potência.

Considerando os diversos componentes da cadeia acima, pode-se construir o diagrama causa-efeito indicado na Figura 39.

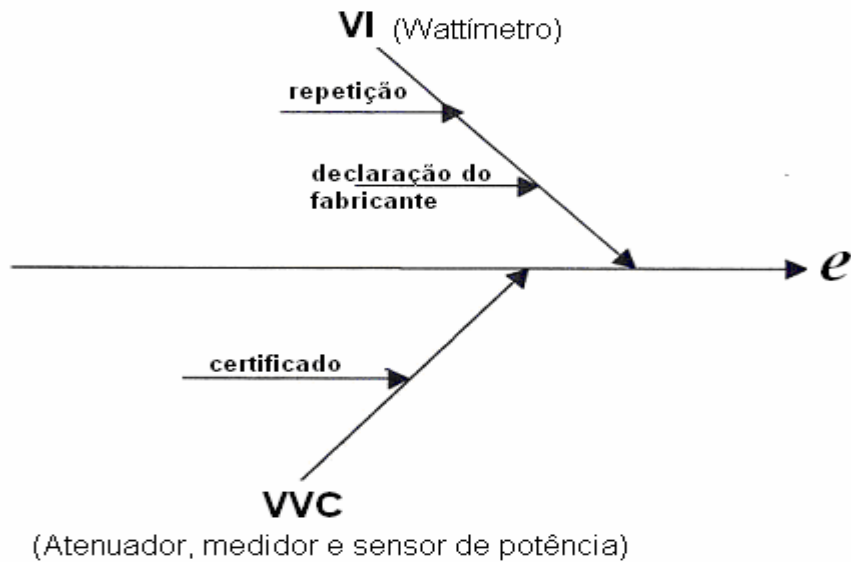


Figura 39 - Diagrama Causa-efeito para o Sistema de Calibração Proposta.

$$e(W) = VI(W) - VVC(W) = VI(W) - \frac{10^{y/10} \cdot Ind(mW)}{1000} \quad (4)$$

Onde:

VI = Indicação do Instrumento a Calibrar(W).

VVC = Valor Verdadeiro Convencional(W).

y = Fator de atenuação.

Ind = Indicação do padrão (mW).

e = erro (W)

4.2.3 Avaliação das incertezas–padrão

As incertezas–padrão de cada fonte de entrada, $u(x_i)$, são estimadas em função do modo que a fonte de entrada aparece para definir o mensurando.

4.2.3.1 Avaliação *Tipo A* da incerteza–padrão

A avaliação tipo A da incerteza–padrão é intrínseca ao processo de medição e é realizada por meio de um tratamento específico do conjunto de repetições das observações de x_i . Quando são executadas n repetições das medições da grandeza de entrada x_i sob condições de repetitividade, uma das avaliações Tipo A da incerteza–padrão é:

$$u(\bar{x}_i) = \frac{s(x_i)}{\sqrt{n}}, \tag{5}$$

$s(x_i)$ = desvio padrão dos valores individuais do conjunto de repetições;

n = número de repetições do conjunto.

No caso da cadeia de calibração proposta, considere-se, como exemplo, o conjunto de medidas mostrado na Tabela 1:

Tabela 9 – Planilha de cálculo do detector 50 C.

Faixa	FA	DF	DFp	VI				Padrão	Fator de converção	V V C
				Medições (W)			Média			
MHz	dB	%	%	1	2	3	(W)	(mW)	(W)	
100	30,294	5	1,8	49	49,2	49,1	49,1	46,727	1,07004	50
150	30,277	5	1,8	47,2	47,22	47,2	47,20667	46,91	1,06586	50
250	30,235	5	1,8	47,25	47,2	47,28	47,24333	47,366	1,055602	50

VI							Padrão		
Erros(W)			média	Desvio Padrão	u_{rep}	u_{fab}	u_{vi}	u_p	u_p
1	2	3	(W)	(W)	(W)	(W)	(W)	(mW)	(W)
-1	-0,8	-0,9	-0,9	0,1	0,057735	1,417395	1,41857	0,485604	0,519615
-2,8	-2,78	-2,8	-2,79	0,0115	0,006667	1,362739	1,362755	0,487508	0,519615
-2,75	-2,8	-2,72	-2,76	0,0404	0,023333	1,363798	1,363997	0,492246	0,519615

coef. de Sensib.		Comp. de Incerteza		Incerteza comb.	v_{eff}	k	$U(v;95\%)$
C_{ivi}	C_{ivvc}	u_{evi}	u_{evvc}	$u_{c(e)}$			
		(W)	(W)	(W)			(W)
1	-1	1,41857	0,51962	1,510742091	937635	1,96	2,961
1	-1	1,362755	0,51962	1,458458864	4,58E+09	1,96	2,8585
1	-1	1,363997	0,51962	1,459619208	30625355	1,96	2,8608

FA - Fator de Atenuação



Valores Medidos

DF - Declaração do Fabricante



Valores Calculados

DFp - Declaração do Fabricante do Padrão

Resultado da Medição: 50 ± 2,96 W
 50 ± 2,86 W
 50 ± 2,86 W

Considerando as medidas da Tabela 1 acima, tem-se a seguinte incerteza-padrão

Tipo A:

$$u_{Rep} = \frac{s(x_i)}{\sqrt{n}} = \frac{0,1}{\sqrt{3}} = 0,057735$$

Tabela 10 – Avaliação Tipo A.

VI					
Erros(W)			média	Desvio Padrão	u_{rep}
1	2	3	(W)	(W)	(W)
-1	-0,8	-0,9	-0,9	0,1	0,057735
-2,8	-2,78	-2,8	-2,79333	0,011547	0,006667
-2,75	-2,8	-2,72	-2,75667	0,040415	0,023333

4.2.3.2

Avaliação Tipo B da incerteza-padrão

Quando a avaliação da incerteza da fonte de entrada é realizada por um método diferente do estatístico, a avaliação da incerteza-padrão é denominada do Tipo B. Uma das estatísticas da incerteza-padrão Tipo B, $u(x_i)$, é realizada quando os valores de x_i têm uma determinada distribuição assumida e um intervalo de dispersão. As distribuições normalmente enfocadas são a retangular, a triangular e a normal, entre outras. Assumindo-se que a variação de x_i tenha distribuição retangular em um intervalo simétrico $[-a,+a]$, a estimativa da incerteza-padrão neste caso é definida por

$$u(x_i) = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (6)$$

Assumindo-se que x_i tenha agora uma distribuição triangular num intervalo $[-a,+a]$, a estimativa da incerteza-padrão é definida por

$$u(x_i) = \frac{a}{\sqrt{6}} \quad (7)$$

Quando a incerteza de uma fonte de entrada x_i provém de um certificado de calibração com as informações da probabilidade e do fator de abrangência (k), a estimativa da incerteza-padrão é definida pela equação:

$$u(x_i) = \frac{U}{k} \quad (8)$$

onde “ U ” é a incerteza expandida e “ k ” o coeficiente de abrangência declarados no certificado de calibração da respectiva fonte de entrada.

No caso da cadeia de calibração proposta, considerando as medidas da Tabela 1, tem-se a seguinte incerteza-padrão Tipo B, conforme declaração do Fabricante: 5% de escala cheia. Ou seja,

$$u_{fab} = \frac{5}{100 \cdot \sqrt{3}} \cdot 49,100 = 1,41739491 W$$

Tabela 11 – Avaliação Tipo B.

VI						
Erros(W)			média	Desvio Padrão	u_{rep}	u_{fab}
1	2	3	(W)	(W)	(W)	(W)
-1	-0,8	-0,9	-0,9	0,1	0,057735	1,417395
-2,8	-2,78	-2,8	-2,79333	0,011547	0,006667	1,362739
-2,75	-2,8	-2,72	-2,75667	0,040415	0,023333	1,363798

4.2.3.3 Cálculo dos coeficientes de sensibilidade

Uma vez estimadas as incertezas das fontes de entrada, é necessário definir os coeficientes de sensibilidade do mensurando em relação a cada fonte de entrada. O coeficiente de sensibilidade do mensurando y em relação a uma determinada grandeza de entrada x_i é definido como:

$$c_i = \frac{\partial y}{\partial x_i} \quad (9)$$

O coeficiente de sensibilidade estima a variação do mensurando em relação a qualquer variação de uma dada fonte de entrada. No caso de não ocorrer uma relação direta entre o mensurando com alguma fonte de entrada é necessário realizar um experimento para se determinar qual é a variação do mensurando em relação a essa dada fonte de entrada.

4.2.4 Componentes de Incerteza

Com a estimação das incertezas-padrão das fontes de entrada do mensurando e os seus coeficientes de sensibilidade calculados, cada respectiva componente de incerteza na unidade do mensurando pode ser avaliada pela seguinte equação:

$$u_{x_i}(y) = \frac{\partial y}{\partial x_i} u(x_i) = c_{x_i} u(x_i) \quad (10)$$

onde:

$u_{x_i}(y)$ = componentes de incerteza na unidade do mensurando referente à fonte

x_i ;

c_{x_i} = coeficiente de sensibilidade referente à fonte x_i ;

$u(x_i)$ = incerteza referente à fonte x_i .

Nesta etapa da metodologia de cálculo é possível avaliar de forma mais objetiva o impacto da incerteza de cada fonte de entrada na incerteza combinada do mensurando. A interpretação desta etapa do ISO GUM 95 é muito importante pois, neste momento, o documento se estabelece como uma ferramenta robusta para definir de forma orientada e objetiva as prioridades e a exatidão necessárias de qualquer de suas fontes; além disso, há a necessidade de otimizar os limites de tolerância do respectivo processo.

4.2.5 Cálculo da incerteza-padrão combinada

A estimativa da incerteza-padrão combinada, $u_c(y)$, é obtida a partir da combinação das incertezas-padrão, $u_c(y)$, de cada uma das fontes de entrada x_i . O ISO GUM 95 estabelece duas equações para a combinação de incertezas: uma para incertezas não correlacionadas e outra para quando há correlação entre as incertezas.

4.2.5.1 Incerteza combinada de fontes de entrada não correlacionadas

Quando as incertezas-padrão das fontes de entrada não são correlacionadas, a incerteza-padrão combinada $u_c(y)$ do mensurando é calculada pela equação:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \cdot u(x_i) \right)^2} \quad (11)$$

4.2.5.2 Incertezas das grandezas de entrada correlacionadas

Quando as incertezas-padrão das fontes de entrada são correlacionadas, a incerteza-padrão combinada $u_c(y)$ do mensurando é estimada pela equação:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i, x_j) = \sum_{i=1}^N \left[\frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i, x_j) \quad (12)$$

onde:

$u(x_i, x_j) = u(x_i, x_j)$ é a covariância estimada associada com x_i e x_j .

A equação pode ser reescrita na equação abaixo, a qual é estabelecida em termos de coeficientes de correlação, que são mais prontamente interpretados do que covariâncias:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left[\frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i) u(x_j) r(x_i, x_j), \quad (12a)$$

onde o coeficiente de correlação é definido pela equação:

$$r(x_i, x_j) = \frac{u(x_i, x_j)}{u(x_i)u(x_j)}, \quad (13)$$

considerando-se ainda:

$$r(x_i, x_j) = r(x_j, x_i) \text{ e } -1 \leq r(x_i, x_j) \leq +1. \quad (14)$$

Se as incertezas das fontes de entrada são 100% correlacionadas, $r(x_i, x_j)=1$; desta forma a equação (12a) pode ser reescrita conforme a equação abaixo.

$$u_c^2(y) = c_{x_i}^2 u^2(x_i) + c_{x_j}^2 u^2(x_j) + 2.c_{x_i}.c_{x_j} u(x_i)u(x_j) \quad (15)$$

Denominando $c_{x_i}^2 u^2(x_i) = a^2$ e $c_{x_j}^2 u^2(x_j) = b^2$, a equação fica:

$$u_c^2(y) = a^2 + b^2 + 2ab = (a + b)^2. \quad (16)$$

Conclui-se então pela equação anterior que, quando as incertezas das fontes de entrada são 100% correlacionadas ($r = 1$), a incerteza-padrão combinada será a soma linear delas, duas a duas.

4.2.5.3 Incerteza-padrão combinada do novo método de calibração

No caso do novo método de calibração, como as incertezas do VI e do VVC são 100% correlacionadas, a incerteza-padrão combinada é dada por:

$$u_{c(e)} = \sqrt{(u_e(VI))^2 + (u_e(VVC))^2} = \sqrt{1,418570^2 + 0,519615^2} = 1,510742 W$$

Tabela 12 – Coeficiente de Sensibilidade e Incerteza combinada.

coef. de Sensibilidade		Componentes de Incerteza		Incerteza comb.
C _i v _i	C _i v _{v c}	u _e v _i	u _e v _{v c}	u _c (e)
		(W)	(W)	(W)
1	-1	1,41857029	0,519615242	1,510742091
1	-1	1,36275539	0,519615242	1,458458864
1	-1	1,36399715	0,519615242	1,459619208

4.2.6 Determinação dos graus de liberdade

O número de graus de liberdade efetivos da incerteza-padrão combinada de um mensurando é calculado pela equação de Welch-Sattethrwaite:

$$v_{eff} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(y)}{v_i}} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{(u(x_i).c_i)^4}{v_i}} \quad (17)$$

onde:

N = número de fontes de entrada;

ν_i = respectivos graus de liberdade das fontes de entrada;

$u(y)$ = incerteza-padrão da fonte de entrada na unidade do mensurando

$u(x_i)$ = incerteza-padrão da fonte de entrada;

c_i = coeficiente de sensibilidade referente a cada fonte de entrada.

O número de graus de liberdade é um número inteiro. Sempre que houver números decimais no valor dos graus de liberdade efetivos, somente a parte inteira do número deve ser considerada. O número de graus de liberdade de uma incerteza-padrão tipo B é considerado infinito.

No caso da cadeia de calibração proposta nesta dissertação, tem-se:

$$\nu_{eff} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(y)}{\nu_i}} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{(u(x_i) \cdot c_i)^4}{\nu_i}} = \frac{1,510742^4}{\frac{0,03333^4}{2}} = 937635 \cong \infty$$

Tabela 13 – Graus de liberdade.

coef. de Sensibilidade		Componentes de Incerteza		Incerteza comb.	veff
C _{ivi}	C _{iv v c}	u _{evi}	u _{ev v c}	u _{c(e)}	
		(W)	(W)	(W)	
1	-1	1,41857029	0,519615242	1,510742091	937635
1	-1	1,36275539	0,519615242	1,458458864	4,58E+09
1	-1	1,36399715	0,519615242	1,459619208	30625355

4.2.7

Determinação do fator de abrangência

O fator de abrangência (“ k ”) é definido a partir da distribuição t de Student e depende da probabilidade de abrangência, geralmente 95,45%, e dos graus de liberdade efetivos da incerteza-padrão combinada $u_c(y)$ do mensurando.

No caso da cadeia de calibração proposta nesta dissertação, considerando os cálculos das seções anteriores, tem-se:

$$k = 1,96$$

Tabela 14 – Fator de abrangência.

coef. de Sensibilidade		Componentes de Incerteza		Incerteza comb.	veff	k
C _i v _i	C _i v _{v c}	u _e v _i	u _e v _{v c}	u _c (e)		
		(W)	(W)	(W)		
1	-1	1,41857029	0,519615242	1,510742091	937635	1,960
1	-1	1,36275539	0,519615242	1,458458864	4,58E+09	1,960
1	-1	1,36399715	0,519615242	1,459619208	30625355	1,960

4.2.8 Estimativa da incerteza expandida

Eventualmente, a incerteza-padrão combinada $u_c(y)$ pode ser utilizada para expressar a incerteza em um resultado de medição. Porém, em algumas aplicações comerciais, industriais reguladas, e quando a segurança e a saúde estão em foco, se faz necessária a declaração de uma incerteza que defina um intervalo em torno do resultado de medição. Espera-se que este intervalo englobe uma grande porção da distribuição de valores que podem razoavelmente ser atribuído ao mensurando. A incerteza expandida U , para uma determinada probabilidade de abrangência p , é estimada pela equação:

$$U = k_{(p,v)} \cdot u_c(y) \tag{18}$$

No caso da cadeia de calibração proposta nesta dissertação, considerando os cálculos das seções anteriores, tem-se:

$$U(95%; k = 1,96) = 2,96 W$$

Tabela 15 – Incerteza Expandida.

coef. de Sensibilidade		Componentes de Incerteza		Incerteza comb.	v_{eff}	k	$U(v;95\%)$
C_{ivi}	C_{ivvc}	u_{evi}	u_{evvc}	$u_{c(e)}$			
		(W)	(W)	(W)			(W)
1	-1	1,41857029	0,519615242	1,510742091	937635	1,960	2,96
1	-1	1,36275539	0,519615242	1,458458864	4,58E+09	1,960	2,86
1	-1	1,36399715	0,519615242	1,459619208	30625355	1,960	2,86

4.2.9

Balanço das Incertezas

Em todo cálculo de estimativa da incerteza deve-se sempre elaborar um gráfico onde podem ser observadas, de maneira rápida, clara e objetiva, as fontes que predominam na incerteza de medição de um mensurando. Isto é importante porque, se os limites da tolerância de um processo necessitarem de uma otimização, o gráfico indicará rapidamente, de forma orientada, quais são as fontes prioritárias para a melhoria de sua exatidão de forma a atender os limites otimizados de tolerância.

Neste estudo de caso observa-se, na Figura 40, que o valor preponderante no balanço das incertezas da indicação do instrumento a calibrar é aquele referente à contribuição de incerteza do fabricante do instrumento, que é o mesmo utilizado nos transmissores localizados nos aeroportos e nos Destacamentos. Observa-se, ainda, que a contribuição da incerteza da repetição pouco contribui para a incerteza total.

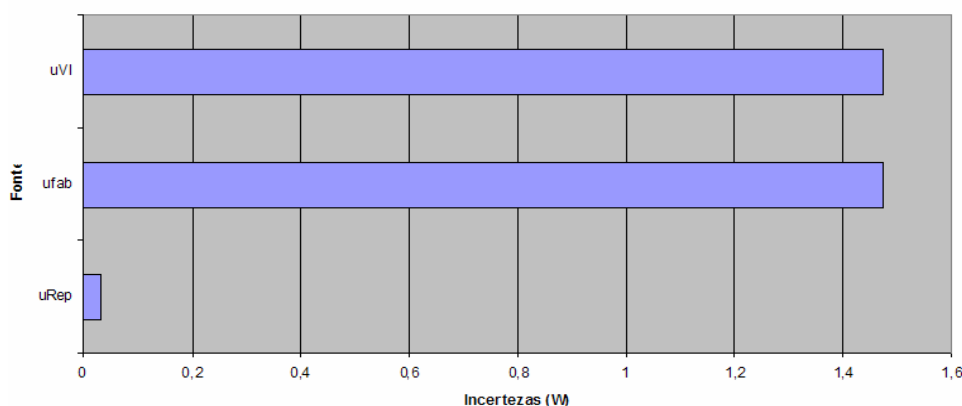


Figura 40 - Balanço das incertezas da indicação do instrumento a calibrar.

Observando o gráfico da Figura 41, verifica-se que a fonte preponderante na incerteza ainda é aquela referente à contribuição de incerteza do fabricante do instrumento. A prioridade de melhoria de incerteza das fontes seria, portanto, a substituição do instrumento de medição, e depois do padrão utilizado na medição. Certamente, não ocorrendo este tipo de avaliação gráfica, a primeira solução seria a aquisição de um padrão de melhor qualidade metrológica.

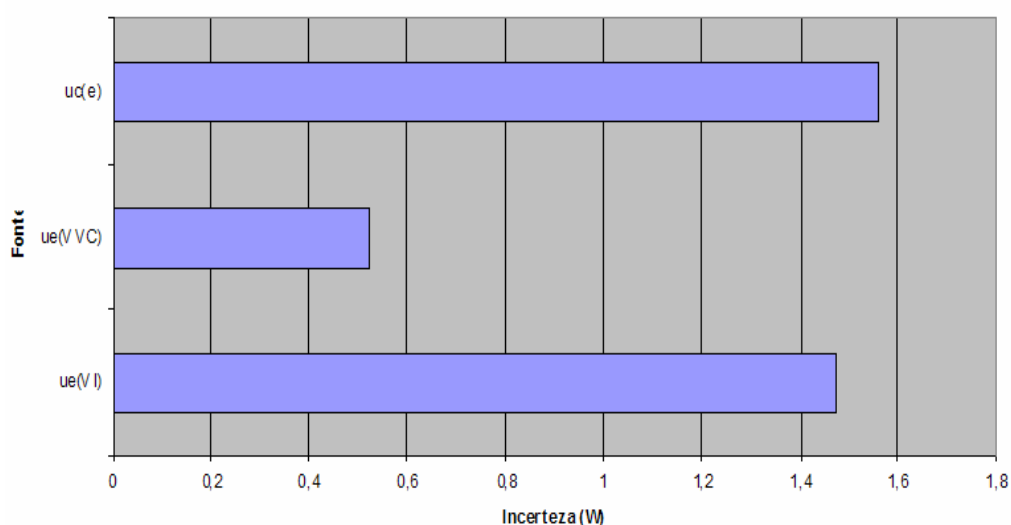


Figura 41 – Balanço das Incertezas no Erro (W).

Esta forma de cálculo possibilita avaliar e definir a qualquer momento quais as fontes de incerteza, tais como: exatidão da instrumentação, metodologia de medição, condições ambientais, etc. Estes devem ter a prioridade de redução de sua incerteza em função da necessidade de otimização da tolerância do respectivo processo.

4.3

Estudos de caso com estimativa da incerteza de medição.

Formulário

$$e(W) = VI(W) - VVC(W) = VI(W) - \frac{10^{\frac{y}{10}} \cdot Ind(mW)}{1000}$$

$$u(\bar{x}_i) = \frac{s(x_i)}{\sqrt{n}}$$

$$u(x_i) = \frac{a}{\sqrt{3}}$$

$$c_i = \frac{\partial y}{\partial x_i}$$

$$u_{x_i}(y) = \frac{\partial y}{\partial x_i} u(x_i) = c_{x_i} u(x_i)$$

$$u_{x_i}(y) = \frac{\partial y}{\partial x_i} u(x_i) = c_{x_i} u(x_i)$$

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i, x_j) = \sum_{i=1}^N \left[\frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i, x_j)$$

$$u_{c(s)} = \sqrt{(u_s(VI))^2 + (u_s(VVC))^2}$$

$$v_{eff} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(y)}{v_i}} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{(u(x_i) \cdot c_i)^4}{v_i}}$$

$$U = k_{(p,v)} \cdot u_c(y)$$

Tabela 16 – 1000W - Faixa de 2MHz a 30MHz.

Faixa	FA	DF	DFp	VI				Padrão	Fator de converção	V V C
				Medições (W)			Média			
				1	2	3				
MHz	dB	%	%	(W)			(W)	(mW)		(W)
2	30,29	5	1,8	994,5	994	994,5	994,333	935,406	1,069055	1000
20	30,292	5	1,8	995,1	995,2	995,1	995,133	934,975	1,069547	1000
30	30,291	5	1,8	994,6	994,5	994,5	994,5333	935,19	1,069301	1000

VI							Padrão		
Erros(W)				Desvio Padrão	u_{rep}	u_{fab}	u_{vi}	u_p	u_p
1	2	3	média						
(W)	(W)	(W)	(W)	(W)	(W)	(W)	(W)	(mW)	(W)
-5,500	-6,000	-5,500	-5,667	0,2887	0,166667	28,70393	28,70441	9,721021	10,3923
-4,900	-4,800	-4,900	-4,867	0,0577	0,033333	28,72702	28,72704	9,716545	10,3923
-5,400	-5,500	-5,500	-5,467	0,0577	0,033333	28,70970	28,70972	9,718783	10,3923

coef. de Sensib.		Comp. De Incerteza		Incerteza comb.	v_{eff}	k	U(v;95%)
C_{ivi}	C_{ivvc}	u_{evi}	u_{evvc}	$u_c(e)$			
		(W)	(W)	(W)			(W)
1	-1	28,70441	10,3923	30,52774846	2251200079	1,960	59,83
1	-1	28,72704	10,3923	30,54902732	1,4109E+12	1,960	59,87
1	-1	28,70972	10,3923	30,53274041	1,4079E+12	1,960	59,84

FA - Fator de Atenuação

 Valores Medidos

DF - Declaração do Fabricante

 Valores Calculados

DFp - Declaração do Fabricante do Padrão

Resultado da Medição: 1000 ± 59,83 W
 1000 ± 59,87 W
 1000 ± 59,84 W

Tabela 17 – 100W - Faixa de 100MHz a 250MHz.

Faixa	FA	DF	DFp	VI				Padrão	Fator de conversão	V V C
				Medições (W)			Média			
MHz	dB	%	%	1	2	3	(W)	(mW)	(W)	
100	30,294	5	1,8	94,9	94,8	94,9	94,867	93,454	1,07004	100
150	30,277	5	1,8	96	95,9	96	95,96667	93,821	1,06586	100
250	30,235	5	1,8	93,5	93,4	93,5	93,46667	94,733	1,055602	100

VI							Padrão		
Erros(W)			média	Desvio Padrão	<i>u rep</i>	<i>u fab</i>	<i>u vi</i>	<i>u p</i>	<i>u p</i>
1	2	3	(W)	(W)	(W)	(W)	(W)	(mW)	(W)
-5,1	-5,2	-5,1	-5,133	0,057735027	0,033333	2,738565	2,738768	0,971207	1,03923
-4	-4,1	-4	-4,033	0,057735027	0,033333	2,770319	2,77052	0,975016	1,03923
-6,5	-6,6	-6,5	-6,533	0,057735027	0,033333	2,69815	2,698356	0,984491	1,03923

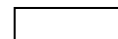
coef. de Sensib.		Comp. de Incerteza		Incerteza comb.	<i>veff</i>	<i>k</i>	U(v;95%)
<i>C_{vi}</i>	<i>C_{vvc}</i>	<i>u_{evi}</i>	<i>u_{evvc}</i>	<i>u_{c(e)}</i>			(W)
		(W)	(W)	(W)			
1	-1	2,738767	1,039231	2,929308	1,19E+08	1,960	5,7413
1	-1	2,770519	1,039231	2,959016	1,24E+08	1,960	5,7996
1	-1	2,698356	1,039231	2,891562	1,13E+08	1,960	5,6674

FA - Fator de Atenuação



Valores Medidos

DF - Declaração do Fabricante



Valores Calculados

DFp - Declaração do Fabricante do Padrão

Resultado da Medição:

100 ±

5,74 W

100 ±

5,80 W

100 ±

5,67 W

Tabela 18 – 250W - Faixa de 2MHz a 30MHz.

Faixa	FA	DF	DFp	VI				Padrão	Fator de conversão	V V C
				Medições (W)			Média			
MHz	dB	%	%	1	2	3	(W)	(mW)		(W)
2	30,29	5	1,8	254,1	245	245,2	248,1	233,851	1,069055	250
20	30,292	5	1,8	244,9	244,8	245	244,9	233,744	1,069547	250
30	30,291	5	1,8	242,2	242,3	242,4	242,3	233,798	1,069301	250

VI							Padrão		
Erros(W)			média	Desvio Padrão	u_{rep}	u_{fab}	u_{vi}	u_p	u_p
1	2	3	(W)	(W)	(W)	(W)	(W)	(mW)	(W)
4,1	-5	-4,8	-1,9	5,197114584	3,000556	7,16203	7,765179	2,430255	2,59808
-5,1	-5,2	-5	-5,1	0,1	0,057735	7,069654	7,06989	2,429136	2,59808
-7,8	-7,7	-7,6	-7,7	0,1	0,057735	6,994599	6,994837	2,429696	2,59808

coef. de Sensib.		Comp. de Incerteza		Incerteza comb.	v_{eff}	k	$U(v;95\%)$
C_{ivi}	C_{ivvc}	u_{evi}	u_{evvc}	$u_{c(e)}$			
		(W)	(W)	(W)			(W)
1	-1	7,765179	2,598076	8,188285	110	1,982	16,23
1	-1	7,06989	2,598076	7,532154	5,79E+08	1,96	14,76
1	-1	6,994837	2,598076	7,461752	5,58E+08	1,96	14,62

FA - Fator de Atenuação

DF - Declaração do Fabricante

DFp - Declaração do Fabricante do Padrão

 Valores Medidos

 Valores Calculados

Resultado da Medição:	250 ±	16,23 W
	250 ±	14,76 W
	250 ±	14,62 W

Tabela 19 – 25W - Faixa de 50MHz a 125MHz.

Faixa	FA	DF	DFp	VI				Padrão	Fator de conversão	V V C
				Medições (W)			Média			
MHz	dB	%	%	1	2	3	(W)	(mW)	(W)	
50	30,293	5	1,8	25,5	25,6	25,5	25,533	23,369	1,069794	25
100	30,294	5	1,8	23,5	23,6	23,5	23,533	23,364	1,07004	25
125	30,284	5	1,8	23,5	23,4	23,3	23,4	23,417	1,067579	25

VI							Padrão		
Erros(W)			média	Desvio Padrão	u_{rep}	u_{fab}	u_{vi}	u_p	u_p
1	2	3	(W)	(W)	(W)	(W)	(W)	(mW)	(W)
0,5	0,6	0,5	0,5333	0,057735027	0,033333	0,737084	0,737837	0,242858	0,25981
-1,5	-1,4	-1,5	-1,4667	0,057735027	0,033333	0,679349	0,680166	0,242802	0,25981
-1,5	-1,6	-1,7	-1,6	0,1	0,057735	0,6755	0,677963	0,243362	0,25981

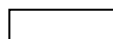
coef. de Sensib.		Comp. de Incerteza		Incerteza comb.	v_{eff}	k	$U(v;95\%)$
C_{vi}	C_{vvc}	u_{evi}	u_{evvc}	$u_{c(e)}$			(W)
		(W)	(W)	(W)			
1	-1	0,737837	0,259808	0,782243	606570	1,96	1,53
1	-1	0,680166	0,259808	0,728097	455274	1,96	1,43
1	-1	0,677963	0,259808	0,726039	50016	1,96	1,42

FA - Fator de Atenuação



Valores Medidos

DF - Declaração do Fabricante



Valores Calculados

DFp - Declaração do Fabricante do Padrão

Resultado da

Medição:

25 ± 1,53 W

25 ± 1,43 W

25 ± 1,42 W

Tabela 20 – 25W - Faixa de 100MHz a 250MHz.

Faixa	FA	DF	DFp	VI				Padrão	Fator de converção	V V C
				Medições (W)			Média			
MHz	dB	%	%	1	2	3	(W)	(mW)		(W)
100	30,294	5	1,8	25,5	25,4	25,5	25,467	23,364	1,07004	25
150	30,277	5	1,8	24,63	24,7	24,73	24,687	23,455	1,06586	25
250	30,235	5	1,8	24,48	24,45	24,55	24,49333	23,683	1,055602	25

VI								Padrão	
Erros(W)			média	Desvio Padrão	u_{rep}	u_{fab}	u_{vi}	u_p	u_p
1	2	3	(W)	(W)	(W)	(W)	(W)	(mW)	(W)
0,5	0,4	0,5	0,4667	0,05773	0,033333	0,735159	0,735915	0,242802	0,25981
-0,37	-0,3	-0,27	0,3133	0,05131	0,029627	0,712643	0,713258	0,243754	0,25981
-0,52	-0,55	-0,45	0,5067	0,05131	0,029627	0,707062	0,707682	0,246123	0,25981

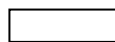
coef. de Sensib.		Comp. de Incerteza		Incerteza comb.	v_{eff}	k	$U(v;95\%)$
C_{vi}	C_{vvc}	u_{evi}	u_{evvc}	$u_{c(e)}$			
		(W)	(W)	(W)			(W)
1	-1	0,735915	0,259808	0,78043	600966	1,96	1,53
1	-1	0,713258	0,259808	0,759103	861913	1,96	1,49
1	-1	0,707682	0,259808	0,753866	838373	1,96	1,48

FA - Fator de Atenuação



Valores Medidos

DF - Declaração do Fabricante



Valores Calculados

DFp - Declaração do Fabricante do Padrão

Resultado da Medição: 25 ± 1,53 W
 25 ± 1,49 W
 25 ± 1,48 W

O próximo Capítulo apresenta as Conclusões e Recomendações para Trabalhos Futuros.