SUMÁRIO

1 OBJETIVO

Esta Norma estabelece requisitos para expressão da incerteza de medição e da capacidade de medição e calibração por laboratórios de calibração.

2 CAMPO DE APLICAÇÃO

Este documento se aplica à Dicla, aos laboratórios de calibração acreditados e postulantes à acreditação, aos avaliadores e especialistas que atuam nos processos de acreditação de laboratórios.

Os requisitos para expressão da incerteza de medição também se aplicam aos laboratórios que realizam calibração interna. Entretanto os requisitos para capacidade de medição e calibração não se aplicam a estes laboratórios.

3 RESPONSABILIDADE

A responsabilidade pela revisão desta Norma é da Dicla.

4 SIGLAS

CMC Capacidade de medição e Calibração (anteriormente denominada melhor capacidade de medição)
EA European Accreditation Cooperation
ILAC International Laboratory Accreditation Cooperation
ISO GUM - Guia para Expressão da Incerteza de Medição

5 TERMINOLOGIA

5.1 Capacidade de Medição e Calibração (CMC) (baseado em ILAC P14)
Menor incerteza de medição que um laboratório de calibração pode obter quando realiza calibrações ou medições dentro do escopo da sua acreditação.
Nota 1: Este termo substitui o termo “melhor capacidade de medição”
Nota 2: A CMC está publicada no escopo de acreditação do laboratório de calibração.

6 HISTÓRICO DA REVISÃO E PRAZO PARA IMPLEMENTAÇÃO

6.1 No item 6.1 do Anexo, foi acrescentada um nota a respeito do relato da incerteza de medição. No item 8.3 do Anexo, foi incluída uma nota a respeito da forma de apresentação da CMC.

6.2 Foi incluído um caso de CMC para parâmetros de um serviço de calibração no Exemplo 5.

6.3 Foram feitas outras pequenas correções editoriais.

6.4 As alterações efetuadas nesta revisão não alteram requistos da acreditação, portanto entram em vigor na data da publicação do documento.

7 REQUISITO

Os laboratórios de calibração acreditados e postulantes à acreditação, bem como os laboratórios que realizam calibração interna devem estimar a incerteza da medição de acordo com o Guia para Expressão da Incerteza de Medição Os cálculos e a expressão das incertezas de medição referentes às calibrações e medições, bem como da capacidade de medição e calibração, devem ser elaborados e implementados de acordo com os princípios estabelecidos no Anexo a este documento, que foi elaborado de acordo com o ISO GUM.

/ANEXO

ANEXO

EXPRESSÃO DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO POR LABORATÓRIOS DE CALIBRAÇÃO

Sumário

Nota 1: Por tratar-se, em grande parte, de tradução de documento em língua estrangeira, este Anexo não segue completamente as prescrições da NIE-CGCRE-019.

Nota 2: Este Anexo foi inicialmente emitido em janeiro de 1999 como a Versão Brasileira do Documento de Referência EA4/02 – Expressão da Incerteza de Medição em Calibração. Aquela tradução foi feita com autorização da EA, detentora dos direitos autorais do documento original em inglês. Os membros da Comissão que preparou essa tradução estão mencionados no Apêndice G. A partir da emissão do documento ILAC P14 – ILAC Policy for Uncertainty in Calibration, tornou-se necessário fazer alterações neste Anexo de modo a adequá-lo ao documento da ILAC. As partes do texto que não correspondem ao documento EA4/02 estão sombreadas em azul.

Nota 3: O documento EA4/02 contém dois suplementos nos quais são publicados exemplos de sua aplicação na estimativa da incerteza de medição que podem ser úteis aos laboratórios. Estes exemplos não estão traduzidos neste Anexo.

Nota 4: Segundo instruções da EA, o texto pode ser traduzido para outros idiomas conforme necessário. A versão em inglês das partes que são oriundas do documento EA4/02 permanece sendo a versão definitiva.

Nota 5: Os direitos de propriedade do texto original do documento EA4/02 pertencem à EA, não podendo ser copiado para revenda.

Nota 6: O termo "Uncertainty Budget" foi traduzido por "planilha de incerteza"

1 Introdução

1.1 Este documento estabelece os princípios e os requisitos para a avaliação da incerteza de medição em calibração e para a declaração desta incerteza e da capacidade de medição e calibração por laboratórios de calibração acreditados. O tratamento é mantido em um nível geral para atender a todos os campos de calibração. O método esboçado poderá ser complementado por recomendações mais específicas para diferentes campos, para tornar a informação mais prontamente aplicável. No desenvolvimento de tais guias suplementares os princípios gerais estabelecidos neste documento devem ser seguidos para assegurar a harmonização entre os diferentes campos.

1.2 O tratamento neste documento está de acordo com o *Guia para a Expressão da Incerteza de Medição,* primeira edição publicada em 1993 em nome do BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP e OIML [ref 1]. Mas enquanto a [ref 1] estabelece regras gerais para a avaliação e expressão da incerteza de medição que podem ser seguidas na maioria dos campos da medição física, este documento concentra-se no método mais adequado para medições em laboratórios de calibração e descreve uma maneira não ambígua e harmonizada de avaliar e declarar a incerteza de medição. Este documento consiste dos seguintes tópicos:

- definições básicas para o documento,
- métodos para a avaliação da incerteza de medição das grandezas de entrada,
- relação entre a incerteza de medição da grandeza de saída e a incerteza de medição das grandezas de entrada,
- incerteza expandida de medição da grandeza de saída,
- declaração da incerteza de medição,
- um procedimento passo a passo para o cálculo da incerteza de medição.

Exemplos mostrando a aplicação do método aqui delineado para problemas de medição específicos em diferentes áreas serão fornecidos em suplementos subsequentes. A avaliação da incerteza de medição é também abordada em diversos documentos da EA os quais fornecem orientação sobre métodos de calibração, alguns deles contendo exemplos específicos.

1.3 A avaliação capacidade de medição e calibração de laboratórios de calibração acreditados e postulantes à acreditação deve ser feita pelos laboratórios de acordo com o método descrito neste documento.

2 Linhas gerais e definições

Nota: O Apêndice B contém um glossário destes termos junto com as referências aos documentos fonte dos quais as definições foram adotadas.

2.1 A declaração do resultado de uma medição somente é completa se ela contiver tanto o valor atribuído ao mensurando quanto a incerteza de medição associada a este valor. Neste documento todas as grandezas que não são conhecidas exatamente são tratadas como variáveis aleatórias, incluindo as grandezas de influência que podem afetar o valor medido.

2.2 A incerteza de medição é um parâmetro associado ao resultado de uma medição, que caracteriza a dispersão dos valores que podem ser razoavelmente atribuídos ao mensurando [ref. 2]. Neste documento o termo abreviado incerteza é utilizado no lugar de incerteza de medição desde que não haja risco de causar confusão. Para fontes típicas de incertezas em uma medição veja a lista fornecida no Apêndice C.

2.3 Os mensurandos são as grandezas particulares submetidas à medição. Em calibrações, usualmente se lida com somente um mensurando ou grandeza de saída *Y* que depende de uma série de grandezas de entrada X_i *(i= 1, 2, .., N)* de acordo com a relação funcional

$$Y = f(X_1, X_2, ... X_N) \qquad (2.1)$$

A função modelo f representa o procedimento de medição e o método de avaliação. Ela descreve como os valores da grandeza de saída *Y* são obtidos a partir dos valores das grandezas de entrada X_i. Na maioria dos casos será uma expressão analítica, mas também pode haver casos em que será descrita por um grupo de expressões que incluem correções e fatores de correção para efeitos sistemáticos, levando assim a uma equação mais complexa que não pode ser representada por uma função analítica explícita. Além disso, f pode ser determinada experimentalmente, ou existir somente como um algoritmo de computação que deve ser avaliado numericamente, ou, ainda, pode ser uma combinação dos casos descritos acima.

2.4 O conjunto de grandezas de entrada X_i pode ser agrupado em duas categorias de acordo com a maneira pela qual o valor da grandeza e sua incerteza associada tenham sido determinados:

(a) grandezas cujas estimativas e incertezas associadas são diretamente determinadas na medição em curso. Esses valores podem ser obtidos, por exemplo, de uma única observação, de observações repetidas, ou através de julgamento baseado na experiência. Eles podem envolver a avaliação de correções para as indicações dos instrumentos bem como correções para grandezas de influência, tais como temperatura ambiente, pressão barométrica ou umidade;

(b) grandezas cujas estimativas e incertezas associadas são incorporadas à medição a partir de fontes externas, tais como grandezas associadas aos padrões de medição calibrados, materiais de referência certificados, ou dados de referência obtidos de manuais ou compêndios.

2.5 Uma estimativa do mensurando *Y*, a estimativa de saída designada por *y*, é obtida pela equação (2.1) usando estimativas de entrada x_i para os valores das grandezas de entrada X_i

$$y = f(x_1, x_2, ... x_N) \qquad (2.2)$$

Entende-se que os valores de entrada são as melhores estimativas que foram corrigidas para todos os efeitos significativos para o modelo. Se não o foram, as correções necessárias devem ser introduzidas como grandezas de entrada separadas.

2.6 Para uma variável aleatória a variância de sua distribuição ou a raiz quadrada positiva da variância, chamada desvio padrão, é utilizada como uma medida da dispersão de valores. A incerteza padrão de medição associada à estimativa de saída ou resultado de medição *y*, designado por *u(y),* é o desvio padrão do mensurando *Y.* Ela deve ser determinada a partir das estimativas x_i das grandezas de entrada X_i , e suas incertezas padrão associadas $u(x_i)$. A incerteza padrão associada a uma estimativa, tem a mesma dimensão da estimativa. Em alguns casos pode ser apropriado utilizar a incerteza padrão relativa de medição, que é a incerteza padrão de medição associada a uma estimativa dividida pelo módulo desta estimativa e que é portanto adimensional. Este conceito não pode ser utilizado se a estimativa for igual à zero.

3 Avaliação da incerteza de medição das estimativas de entrada

3.1 Considerações gerais

3.1.1 A incerteza de medição associada às estimativas de entrada é avaliada de acordo com os métodos de avaliação do Tipo A ou do Tipo B. A avaliação do Tipo A da incerteza padrão é o método de avaliação da incerteza pela análise estatística de uma série de observações. Neste caso, a incerteza padrão é o desvio padrão experimental da média que se obtêm de um procedimento de cálculo da média aritmética ou de uma análise de regressão adequada. A avaliação do Tipo B da incerteza padrão é o método de avaliação da incerteza por outros meios que não a analise estatística de uma série de observações. Neste caso, a avaliação da incerteza padrão é baseada em algum outro conhecimento científico.

Nota: Existem ocasiões, raramente encontradas em calibração, quando todos os valores possíveis de uma grandeza situam-se em um lado de um valor limite único. Um caso bem conhecido é o chamado erro de coseno. Para o tratamento de tais casos especiais ver [ref. 1].

3.2 Avaliação do Tipo A da incerteza padrão

3.2.1 A avaliação do Tipo A da incerteza padrão pode ser aplicada quando tenham sido feitas várias observações independentes para uma das grandezas de entrada sob as mesmas condições de medição. Caso haja suficiente resolução no processo de medição haverá uma dispersão ou espalhamento observável nos valores obtidos.

3.2.2 Suponha que a grandeza de entrada *Xj* medida repetidamente é a grandeza *Q*.
Com *n* observações estatisticamente independentes (*n* > 1), a estimativa da grandeza *Q é* $\bar{q}$*,* a média aritmética ou a média dos valores individuais observados $q_j\,(j=1,2..,n)$;

$$\bar{q} = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n} q_j \qquad (3.1)$$

A incerteza de medição associada com a estimativa $\bar{q}$ é avaliada de acordo com um dos seguintes métodos:

(a) Uma estimativa da variância da distribuição de probabilidade fundamental é a variância experimental $S^2(q)$ dos valores de q_j que é dada por

$$s^2(q) = \frac{1}{n-1}\sum_{j=1}^{n}(q_j - \bar{q})^2 \qquad (3.2)$$

O valor (positivo) da raiz quadrada de S2(q) é chamado desvio padrão experimental. A melhor estimativa da variância da média aritmética $\bar{q}$ *é* a variância experimental da média dada por:

$$s^2(\bar{q}) = \frac{s^2(q)}{n} \qquad (3.3)$$

o valor (positivo) da raiz quadrada de $S^2(\bar{q})$ é chamada desvio padrão experimental da média. A incerteza padrão $u(\bar{q})$ associada à estimativa de entrada $\bar{q}$ é o desvio padrão experimental da média.

$$u(\bar{q}) = s(\bar{q}) \qquad (3.4)$$

Atenção: Geralmente, quando o número *n* de medições repetidas é baixo (*n* <10), a confiabilidade de uma avaliação do Tipo A da incerteza padrão, como expressa pela equação (3.4) deve ser considerada. Se o número de observações não puder ser aumentado, outros meios de avaliação da incerteza padrão apresentados neste texto devem ser considerados.

(b) Para uma medição que está bem caracterizada e sob controle estatístico, uma estimativa combinada ou estimativa agrupada da variância s_p^2, pode estar disponível e melhor caracterizar a dispersão do que o desvio padrão estimado obtido de um número limitado de observações. Se, em tal caso, o valor da grandeza de entrada *Q* for determinado como a média aritmética $\bar{q}$ de um número pequeno de n observações independentes, a variância da média pode ser estimada por:

$$s^2(\bar{q}) = \frac{s_p^2}{n} \tag{3.5}$$

A incerteza padrão é deduzida a partir deste valor pela equação (3.4).

3.3 Avaliação do Tipo B da incerteza padrão

3.3.1 A avaliação do Tipo B da incerteza padrão é a avaliação da incerteza associada com uma estimativa x_i. de uma grandeza de entrada X_i feita por outros meios que não a análise estatística de uma série de observações. A incerteza padrão $u(x_i)$ é avaliada pelo julgamento científico baseado em todas as informações disponíveis sobre a possível variabilidade de X_i. Valores pertencentes a esta categoria podem ser obtidos a partir de:

- dados de medições,
- experiência ou conhecimento geral do comportamento e propriedades de materiais e
- instrumentos relevantes,
- especificações do fabricante,
- dados provenientes de calibração e de outros certificados,
- incertezas atribuídas a dados de referência provenientes de manuais ou publicações

3.3.2 O uso adequado da informação disponível para uma avaliação do Tipo B da incerteza padrão de medição exige discernimento baseado na experiência e conhecimento geral, sendo essa uma habilidade que pode ser aprendida com a prática. Uma avaliação do Tipo B da incerteza padrão bem fundamentada pode ser tão confiável quanto uma avaliação do Tipo A, especialmente em uma situação de medição em que a avaliação do Tipo A é baseada somente em um número comparativamente pequeno de observações estatisticamente independentes. Os seguintes casos devem ser distinguidos:

(a) Quando somente um único valor é conhecido para a grandeza X_i, por exemplo uma única medida, um valor resultante de uma medição anterior, um valor de referência da literatura, ou um valor de correção, este valor será utilizado no lugar de x_i. A incerteza padrão u(x_i) associada a x_i, deve ser adotada quando fornecida. Caso contrário, ela deve ser calculada a partir de dados de incertezas inequívocos. Se dados dessa natureza não estão disponíveis, a incerteza deve ser avaliada com base na experiência.

(b) Quando pode ser suposta uma distribuição de probabilidade para a grandeza X_i, baseada na teoria ou na experiência, então a esperança apropriada ou valor esperado, e a raiz quadrada da variância desta distribuição, devem ser considerados como a estimativa x_i e a incerteza padrão associada $u(x_i)$ respectivamente.

(c) Se somente os limites superior e inferior a_+ e a_- podem ser estimados para o valor da grandeza X_i (por exemplo, especificações do fabricante de um instrumento de medição, uma faixa de temperatura, um erro de arredondamento ou truncamento resultante da redução de dados automatizados), uma distribuição de probabilidade com densidade de probabilidade constante entre esses limites (distribuição de probabilidade retangular) deve ser suposta para a possível variabilidade da grandeza de entrada X_i. De acordo com o caso (b) acima tem-se:

$$x_i = \frac{1}{2}(a_+ + a_-) \tag{3.6}$$

para o valor estimado, e

$$u^2(x_i) = \frac{1}{12}(a_+ - a_-)^2 \tag{3.7}$$

para o quadrado da incerteza padrão. Se a diferença entre os valores limites for denotada por 2*a*, a equação (3.7) resulta em:

$$u^2(x_i) = \frac{1}{3}a^2 \tag{3.8}$$

A distribuição retangular é uma descrição razoável, em termos de probabilidade, do conhecimento inadequado sobre a grandeza de entrada X_i na ausência de qualquer outra informação que não os limites de variabilidade. Mas se é sabido que valores da grandeza em questão, próximos ao centro do intervalo de variabilidade são mais prováveis do que valores próximos aos limites, uma distribuição triangular ou normal pode ser um modelo melhor. Por outro lado, se os valores próximos aos limites são mais prováveis do que valores próximos ao centro, uma distribuição em forma-de-U pode ser mais apropriada.

4 Cálculo da incerteza padrão da estimativa de saída

4.1 Para grandezas de entrada não correlacionadas o quadrado da incerteza padrão associada com a estimativa de saída *y* é dado por:

$$\mu^2(y) = \sum_{i=1}^{N} \mu_i^2(y) \tag{4.1}$$

Nota: Existem casos, que ocorrem raramente em calibração, onde a função modelo é fortemente não linear ou alguns dos coeficientes de sensibilidade [ver equação (4.2) e (4.3)] são insignificantes e termos de ordem superior devem ser incluídos na equação (4.1). Para o tratamento de tais casos especiais veja [ref. 1].

A grandeza $\mu_i(y)(i = 1,2,.,N)$ é a contribuição à incerteza padrão associada à estimativa de saída *y*, resultante da incerteza padrão associada à estimativa de entrada x_i :

$$\mu_i(y) = c_i \mu(x_i) \tag{4.2}$$

onde c_i *é o coeficiente de sensibilidade* associado com a estimativa de entrada x_i, isto é, a derivada parcial da função modelo *f* com relação à variável X_i avaliada para as estimativas de entrada x_i

$$c_i = \frac{\partial f}{\partial x_i} = \frac{\partial f}{\partial X_i} \quad \left| X_i = x_1 ... X_N = x_N \right. \qquad (4.3)$$

4.2 O coeficiente de sensibilidade descreve o quanto a estimativa de saída *y é* influenciada por variações da estimativa de entrada x_i . Ele pode ser avaliado a partir da função modelo *f*, pela equação (4.3), ou usando métodos numéricos, isto é, calculando a mudança na estimativa de saída y devido a uma mudança na estimativa de entrada x_i de + *u(*x_i*) e - u(*x_i*)* e tomando, para os valores de c_i*,* a diferença resultante em *y* dividida por 2*u*(x_i). Algumas vezes pode ser mais apropriado encontrar a variação na estimativa de saída *y* de um experimento, simplesmente pela repetição da medição, por exemplo, $x_i \pm u(x_i)$*.*

4.3 Enquanto que *u(*x_i*)* é sempre positiva, a contribuição u_i(*y*) de acordo com a equação (4.2) é positiva ou negativa, dependendo do sinal do coeficiente de sensibilidade c_i. O sinal de u_i(*y*) deve ser levado em conta no caso de grandezas de entrada correlacionadas, (ver equação (D4) no Apêndice D).

4.4 Se a função modelo f é uma soma ou diferença das grandezas de entrada X_i:

$$f(X_1, X_2 .... X_N) = \sum_{i=1}^{N} p_i X_i \qquad (4.4)$$

a estimativa de saída de acordo com a equação (2.2) é dada pela correspondente soma ou diferença das estimativas de entrada:

$$y = \sum_{i=1}^{N} p_i X_i \qquad (4.5)$$

enquanto os coeficientes de sensibilidade se igualam a p_i e a equação (4. 1) se converte em:

$$u^2(y) = \sum_{i-1}^{N} p_i^2 u^2(x_i) \qquad (4.6)$$

4.5 Se a função modelo *f* é um produto ou quociente das estimativas de entrada X_i

$$f(X_1, X_2 .... X_N) = c \prod_{i=1}^{N} X_i^{p_i} \qquad (4.7)$$

a estimativa de saída novamente é o produto ou quociente correspondente das estimativas de entrada.

$$y = c \prod_{i=1}^{N} x_i^{p_i} \qquad (4.8)$$

Os coeficientes de sensibilidade são, neste caso, iguais a $p_i y / x_i$, e uma expressão análoga à equação (4.6) é obtida pela equação (4.1), caso as incertezas padrão relativas *w(y) =u(y) /* $|y|$ *e* $w(x_i) = u(x_i)/|x_i|$*)* são utilizadas:

$$w^2(y) = \sum_{i=1}^{N} p_i^2 w^2(x_i) \qquad (4.9)$$

4.6 Se duas grandezas de entrada X_i e X_k forem de algum modo correlacionadas, isto se forem mutuamente dependentes de uma ou de outra forma, sua covariância deve também ser levada em conta como uma contribuição à incerteza. Veja no Apêndice D como isto deve ser feito. A habilidade para levar em conta o efeito de correlações depende do conhecimento do processo de medição e do julgamento das dependências mútuas das grandezas de entrada. De um modo geral, deve-se ter em mente que negligenciar correlações entre as grandezas de entrada pode levar a avaliações incorretas da incerteza padrão do mensurando.

4.7. A covariância associada com as estimativas de duas grandezas de entrada X_i e X_k pode ser considerada nula ou tratada como insignificante se:
(a)as grandezas de entrada forem independentes, por exemplo, porque elas foram repetidas, mas não simultaneamente observadas em diferentes experimentos independentes, ou porque, elas representam grandezas resultantes de diferentes avaliações que tenham sido feitas de modo independente, ou se
(b)cada uma das grandezas de entrada X_i e X_k pode ser tratada como constante, ou se
(c)investigações não fornecerem informações que indiquem a presença de correlação entre as grandezas de entrada X_i e X_k.
Às vezes correlações podem ser eliminadas pela escolha apropriada da função modelo.

4.8 A análise de incertezas para uma medição - às vezes chamada de planilha de incerteza de medição≠ - deve incluir uma relação de todas as fontes de incerteza junto com as incertezas padrão associadas da medição e os métodos para avaliá-las. Para medições repetidas, o número *n* de observações também deve ser declarado. Para garantir maior clareza, recomenda-se apresentar os dados relevantes para esta análise na forma de uma tabela. Nesta tabela todas as grandezas devem ser representadas por um símbolo X_i, ou uma identificação abreviada. Para cada grandeza, devem ser especificadas pelo menos a estimativa x_i, a incerteza padrão de medição associada $u(x_i)$, o coeficiente de sensibilidade c_i e as diversas contribuições de incerteza $u_i(y)$. A dimensão de cada uma das grandezas também deve ser declarada junto aos valores numéricos fornecidos na tabela.

4.9 Um exemplo formal deste arranjo é apresentado na Tabela 4. 1, sendo aplicável ao caso de grandezas de entrada não correlacionadas. A incerteza padrão associada com o resultado da medição *u(y),* fornecida no canto inferior direito da tabela é a raiz quadrada da soma quadrática de todas as contribuições de incerteza apresentadas na coluna mais à direita. A parte sombreada da tabela não é preenchida.

Tabela 4.1: Esquema de um arranjo organizado das grandezas, estimativas, incertezas padrão, coeficientes de sensibilidade e contribuições de incertezas utilizadas na análise de incerteza de uma medição.

Grandeza X_i	Estimativa x_1	Distribuição de probabilidade[2]	Incerteza Padrão $u(x_1)$	Coeficiente de sensibilidade c_1	Contribuição para a incerteza padrão $u_1(y)$	Graus de Liberdade
X_I	x_1		$u(x_1)$	c_1	$u_1(y)$	V_1
X_2	x_2		$u(x_2)$	c_2	$u_2(y)$	V_2
- -	- -					- -
X_N	x_N		$u(x_N)$	c_N	$u_N(y)$	V_N

Y	y	k=			$u(y)$	V_{eff}

Nota de Tradução - Para enriquecer a planilha e dar transparência ao cálculo da incerteza de medição, foram incluídas como sugestão, na presente tradução, as colunas da distribuição de probabilidade e de graus de liberdade, que não constam do documento original.

5 Incerteza expandida de medição

5.1 Os laboratórios de calibração acreditados devem declarar uma incerteza de medição expandida U, obtida pela multiplicação da incerteza padrão $u(y)$ da estimativa de saída y por um fator de abrangência k .

$$U = ku(y) \qquad (5.1)$$

Nos casos em que uma distribuição normal (Gaussiana) possa ser atribuída ao mensurando e a incerteza padrão associada à estimativa de saída tenha suficiente confiabilidade, o fator de abrangência padronizado k=2 deve ser utilizado. A incerteza expandida atribuída corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%. Estas condições são satisfeitas na maioria dos casos de serviços de calibração.

5.2 A hipótese de uma distribuição normal nem sempre pode ser facilmente confirmada experimentalmente. Porém, nos casos em que vamos componentes de incerteza, (isto é, $N \geq 3$) derivados de distribuições de probabilidade bem comportadas de grandezas independentes, por exemplo, distribuições normais ou distribuições retangulares, contribuem para a incerteza padrão associada com a estimativa de saída com quantidades, comparáveis, as condições do Teorema Central do Limite são satisfeitas e pode se supor que a distribuição da grandeza de saída é normal, com um alto grau de aproximação.

5.3 A confiabilidade da incerteza padrão atribuída à estimativa de saída é determinada por seu grau de liberdade efetivo (ver Apêndice E). Entretanto, o critério de confiabilidade é sempre satisfeito se nenhuma das contribuições para a incerteza for obtida de uma avaliação do Tipo A baseada em menos de 10 observações repetidas.

5.4 Se uma dessas condições (normalidade ou confiabilidade suficiente) não for satisfeita, o fator de abrangência padronizado *k* = 2 pode fornecer uma incerteza expandida que corresponde a uma probabilidade de abrangência menor que 95%. Nestes casos, para assegurar que seja declarado um valor de incerteza expandida correspondente a mesma probabilidade de abrangência que no caso normal, outros procedimentos devem ser seguidos. O uso de aproximadamente a mesma probabilidade de abrangência é essencial sempre que dois resultados de medição da mesma grandeza possam ser comparados, por exemplo, quando se analisam os resultados de uma comparação interlaboratorial ou se avalia conformidade com uma especificação.

5.5 Mesmo se uma distribuição normal puder ser suposta, ainda poderá ocorrer que a incerteza padrão associada com a estimativa de saída não tenha confiabilidade suficiente. Se, neste caso, não for conveniente aumentar o número n de repetições da medição ou utilizar uma avaliação do Tipo B no lugar da avaliação do Tipo A, que tem pouca confiabilidade, deve ser utilizado o método fornecido no Apêndice E.

5.6 Para os demais casos, isto é, todos os casos onde a hipótese da distribuição normal não possa ser justificada, informações sobre a real distribuição de probabilidade da estimativa de saída devem ser utilizadas para se obter um valor do fator de abrangência *k* que corresponda a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%.

6 Declaração da incerteza de medição em certificados de calibração e em relatórios de medição

6.1 O resultado da medição relatado no certificado de calibração e no relatório de serviços de medição acreditados deve incluir o valor da grandeza medida *y* e a incerteza expandida associada U. O resultado completo da medição deve normalmente ser fornecido na forma *(y ± U),* ambos expressos na unidade da grandeza medida ou com incerteza expandida expressa em termos relativos *(U / |y|).* Os resultados podem ainda ser apresentados em forma de tabela.

Nota 1: O sinal ± somente deve ser utilizado precedendo a incerteza expandida U quando o resultado completo for transcrito na forma “y ± U”. Quando da apresentação dos valores medidos e suas respectivas incertezas de medição em uma tabela, não é correto utilizar o sinal ±. Neste caso, deve-se relatar apenas o valor de U isoladamente. Este sinal também não deve ser usado nas situações em que a incerteza expandida for relatada em separado dos valores medidos, na forma “U =”. Por exemplo: U = 0,3oC.

Nota 2: Para incertezas assimétricas podem ser necessárias outras formas de apresentação diferentes de (y± *U). Isso também se aplica a casos onde a incerteza é determinada por simulação de Monte Carlo (propagação de distribuições) ou com unidades logarítmicas.*

6.1.1 O fator de abrangência (*k*) e a probabilidade de abrangência devem ser relatados no certificado. Para isso, deve ser adicionada uma nota explicativa, que pode ter o seguinte conteúdo:
“A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza padrão da medição multiplicada pelo fator de abrangência *k*, de tal forma que a probabilidade de abrangência corresponda a aproximadamente 95%.”

6.2 Entretanto, nos casos onde o procedimento do Apêndice E tenha sido seguido, a nota adicional deve conter o seguinte:

A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza padrão de medição multiplicada pelo fator de abrangência *k* = XX, o qual para uma distribuição *t* com v_{eff} = YY graus de liberdade efetivos corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%. A incerteza padrão da medição foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02.

6.3 O valor numérico da incerteza expandida deve ser apresentado com no máximo dois algarismos significativos. O valor numérico do resultado da medição, em sua forma final, deve ser arredondado para o último algarismo significativo do valor da incerteza expandida, atribuída ao resultado da medição. Para o processo de arredondamento, as regras usuais de arredondamento de números devem ser utilizadas aplicando-se as orientações estabelecidas na seção 7 do ISO GUM.
Nota: Para mais informações sobre arredondamento ver ISO 80000-1:2009

6.4 As contribuições para a incerteza declarada no certificado de calibração ou medição devem incluir as contribuições de curto prazo obtidas durante a calibração e as contribuições que possam ser atribuídas ao dispositivo calibrado ou medido. Onde aplicável, a incerteza deve cobrir as mesmas contribuições para a incerteza que foram incluídas na avaliação da CMC, exceto que os componentes de incerteza avaliados para o "melhor dispositivo existente" devem ser substituídos por aqueles oriundos do dispositivo efetivamente calibrado.

6.5 A incerteza de medição declarada no certificado de calibração não pode ser menor que a Capacidade de Medição e Calibração (CMC) constante no escopo de acreditação do laboratório para o serviço realizado. O laboratório pode declarar apenas incertezas de medição iguais ou maiores que a sua CMC, devido às contribuições relativas às propriedades ou características do dispositivo calibrado ou medido.
Nota: A declaração de incerteza de medição menor que a CMC é considerada pela Cgcre como a realização de um serviço fora do escopo da acreditação e implica nas penalidades previstas na NIT-Dicla-031.

7 Procedimento passo a passo para o cálculo da incerteza de medição

7.1 Os passos seguintes constituem um guia para o uso deste documento na prática
(Nota: exemplos resolvidos em documentos suplementares):

(a) Expressar em termos matemáticos a dependência do mensurando (grandeza de saída) Y com as grandezas de entrada X_i , conforme a equação (2.1). No caso de uma comparação direta de dois padrões a equação pode ser muito simples, por exemplo $Y = X_1 + X_2$.
(b) Identificar e aplicar todas as correções significativas.
(c) Relacionar todas as fontes de incerteza na forma de uma análise de incertezas de acordo com a seção 4.

d) Calcular a incerteza padrão $u(\bar{q})$ para as grandezas medidas repetidamente de acordo com a subseção 3.2.
(e) No caso de valores individuais, por exemplo, valores resultantes de medições prévias, valores de correção ou valores da literatura, adotar a incerteza padrão onde ela foi fornecida ou possa ser calculada de acordo com o parágrafo 3.3.2(a). Prestar atenção à forma utilizada na apresentação da incerteza. Se não houver nenhum dado disponível a partir do qual a incerteza padrão possa ser calculada, declarar um valor de $u(x_i)$ com base na experiência científica.
(f) Para grandezas de entrada para as quais a distribuição de probabilidade seja conhecida ou possa ser suposta, calcular a esperança e a incerteza padrão $u(x_i)$ de acordo com o parágrafo 3.3.2(b). Se somente os limites inferior e superior forem fornecidos ou possam ser estimados, calcular a incerteza padrão $u(x_i)$ de acordo com o parágrafo 3.3.2(c).
(g) Calcular para cada grandeza de entrada X_j a contribuição $u_i(y)$ para a incerteza associada com a estimativa de saída resultante da estimativa de entrada x_j de acordo com as

equações (4.2) e (4.3) e somar seus quadrados como descrito na equação (4.1) para obter o quadrado da incerteza padrão *u(y)* do mensurando. Se, consideramos que, as grandezas de entrada são correlacionadas, aplicar o procedimento fornecido no Apêndice D.

(h) Calcular a incerteza expandida *U* por meio da multiplicação da incerteza padrão *u(y)* associada à grandeza de saída por um fator de abrangência *k* escolhido de acordo com a seção 5.

(i) Relatar o resultado da medição no certificado de calibração incluindo a estimativa *y* do mensurando, a incerteza expandida associada *U* e o fator de abrangência *k* de acordo com a seção 6.

8 Requisitos para a Avaliação da Capacidade de Medição e Calibração (CMC)

8.1 Os laboratórios de calibração devem aplicar os requisitos definidos neste documento para a estimativa da incerteza de medição para determinarem a sua capacidade de medição e calibração (CMC) para todos os serviços inclusos em seu escopo de acreditação.
Nota: Caso o laboratório de calibração utilize mais de um método para realizar uma determinada calibração ou medição, a CMC se referirá ao método pelo qual o laboratório obtém a menor incerteza de medição.

8.2 Não deve haver qualquer ambigüidade na expressão da CMC. A CMC deve ser determinada para cada valor individual ou faixa de valores do mensurando incluídos no escopo de acreditação. O valor da CMC deve ser aplicável ao valor individual ou à faixa de valores a que se refere. No caso de expressão da CMC para uma faixa de valores, o laboratório deve demonstrar que obtém a CMC para todos os valores da faixa.

8.3 A CMC pode ser expressa de uma das seguintes formas:

a) Um valor individual, que é válido para toda a faixa de medição à qual se refere.

b) Uma faixa de valores. Neste caso os procedimentos e/ou planilhas de incerteza de medição do laboratório devem descrever a forma como é feita a interpolação para determinar os valores intermediários da CMC nesta faixa de valores.

c) Uma função explícita do mensurando.

d) Uma matriz onde os valores da incerteza de medição dependem de valores do mensurando e de parâmetros adicionais.

Nota 1: Intervalos abertos ("$U < x$") não são permitidos.

Nota 2: Cada valor incluso no escopo admite apenas um único valor de CMC. Não pode haver sobreposição de valores ou faixas no escopo.

Nota 3: O Apêndice F contém exemplos de expressão da CMC.

8.4 A CMC deve ser expressa como uma incerteza expandida com probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%. A CMC deve ser sempre expressa na unidade do mensurando ou como um termo relativo ao mensurando, por exemplo, um percentual.

8.5 Para determinação de sua CMC os laboratórios de calibração devem dispor de evidências de que são capazes de fornecer a seus clientes calibrações para as quais a incerteza de medição seja igual à sua CMC. Na determinação da CMC, os laboratórios devem levar em conta o desempenho do "melhor dispositivo existente" para o tipo de calibração em questão

Nota 1: O "melhor dispositivo existente" é entendido com um dispositivo a ser calibrado ou medido que esteja disponível aos clientes do laboratório ou ao laboratório, comercialmente ou de alguma outra forma, mesmo se o dispositivo particular que for considerado na CMC tiver um desempenho especial ou um longo histórico de calibrações.

Nota 2: Deve ser salientado que, de acordo com a definição de capacidade de medição e calibração, este conceito só é aplicável a resultados para os quais o laboratório reivindica sua condição de laboratório acreditado. Então, estritamente falando, o termo tem um caráter administrativo e não necessariamente precisa refletir a real capacidade técnica do laboratório. É possível que um laboratório solicite a acreditação para uma CMC maior que sua capacidade técnica se o laboratório tiver razões para isso. Tais razões usualmente envolvem, por exemplo:

a) casos em que o laboratório utilize estimativas mais conservadoras de contribuições para a incerteza de medição,
b) decisão do laboratório de assumir condições técnicas de contorno que simplifiquem seus procedimentos,
c) casos em que a obtenção de incertezas menores que a CMC requeiram cuidados especiais que gerariam custos adicionais e encareceriam sobremaneira o serviço.
d) casos onde a capacidade real do laboratório tenha que ser mantida confidencial para o público em geral, por exemplo, quando o laboratório estiver fazendo pesquisa e desenvolvendo ou quando fornece serviços para clientes especiais.

8.5.1 A CMC deve incluir a contribuição para a incerteza oriunda da repetitividade e convém que inclua contribuições oriundas da reprodutibilidade, quando disponíveis. Convém, entretanto, que a CMC não inclua contribuições oriundas de imperfeições que existam mesmo no melhor dispositivo que seja calibrado.

8.5.1.1 Reconhece-se que para algumas calibrações o “melhor dispositivo existente” na realidade não existe e/ou as contribuições para a incerteza oriundas do dispositivo afetam significativamente a incerteza. Neste caso, se tais contribuições para a incerteza oriundas do dispositivo puderem ser separadas de outras contribuições, o laboratório pode excluir estas contribuições da CMC. Neste caso, o escopo de acreditação do laboratório deve identificar claramente que as contribuições oriundas do dispositivo não estão incluídas na CMC. Esta identificação será feita da seguinte forma:

a) Antes da CMC que não inclui as contribuições oriundas do dispositivo calibrado deve ser escrito um asterisco (*). (ver Anexo F, Exemplo 9)

b) Ao final de cada folha do escopo de acreditação a Cgcre incluirá a seguinte nota: “Nota: A CMC identificada por um asterisco (*) não inclui todas as contribuições oriundas do instrumento ou padrão calibrado ou do dispositivo medido.”.

Apêndice A - Referências bibliográficas

[1] *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement,* primeira edição, 1993, corrigida e reimpressa em 1995, International Organization for Standardization (Genebra, Suíça).

[2] *International Vocabulary of Basic and General Terns in Metrology,* segunda edição, 1993, International Organization for Standardization (Genebra, Suiça).

[3] International Standard ISO 3534-1 *Statistics - Vocabulary and symbols - Part I: Probability and General Statistical Terms,* primeira edição, 1993. International Organization for Standardization (Genebra, Suíça).

[4] ISO 80000-1:2009 Quantities and Units – Part 1: General

[5] ILAC P14:11/2010 ILAC Policy for Uncertainty in Calibration

Nota de Tradução: As duas primeiras referências citadas acima já foram traduzidas para a língua portuguesa com os seguintes títulos:

[1] Guia para expressão da incerteza de medição, terceira edição brasileira, 2005.

[2] Vocabulário Internacional de termos fundamentais e gerais de metrologia, publicado pelo Inmetro Portaria Inmetro 029, de 10/03/1995.
Nota: Não está sendo referenciada a versão atualizada do VIM de modo a manter a coerência com a terminologia utilizada no documento original EA-4/02 em inglês.

[3] A referência 3 não possui tradução, embora sua versão anterior tenha sido publicada pela ABNT em 1988 com o título Estatística: Terminologia (NBR 10536).

Apêndice B -*Glossário de alguns termos relevantes*

B1 coeficiente de correlação.(da [ref. 1] seção C.3.6)
Medida da dependência mútua relativa de duas variáveis aleatórias, igual à razão de suas variâncias e à raiz quadrada positiva do produto de suas variâncias.

B2 coeficiente de sensibilidade associado a uma estimativa de entrada (da [ref. 1] seção 5.1.3)
Variação diferencial na estimativa de saída gerada por uma variação diferencial em uma estimativa de entrada dividida por esta variação na estimativa de entrada.

B3 correlação ([ref 3] termo 1.13)
Relação entre duas ou mais variáveis aleatórias dentro de uma distribuição de duas ou mais variáveis aleatórias.

B4 covariância (da [ref. 1] seção C.3.4)
Medida da dependência mútua de duas variáveis aleatórias, igual ao valor esperado do produto dos desvios das duas variáveis aleatórias em relação a seus respectivos valores esperados.

B5 desvio padrão experimental (da [ref 2] termo 3.8)
Raiz quadrada positiva da variância experimental.

B6 desvio padrão (da [ref. 3] termo 1.23)
Raiz quadrada positiva da variância de uma variável aleatória.

B7 distribuição de probabilidade ([ref. 3] termo 1.3)
Uma função que fornece a probabilidade de uma variável aleatória assumir qualquer valor dado ou pertencer a um dado conjunto de valores.

B8 estimativa agrupada da variância (da [ref. 1] seção 4.2.4)
Estimativa da variância experimental obtida de grande número de observações do mesmo mensurando em medições bem caracterizadas sob controle estatístico.

B9 estimativa de entrada (da [ref. 1] seção 4.1.4)
Estimativa de uma grandeza de entrada utilizada na avaliação do resultado de uma medição.

B10 estimativa de saída (da [ref. 1] seção 4.1.4)
Resultado de uma medição calculado pela função modelo, a partir das estimativas de entrada.

B11 fator de abrangência ([ref. 1] termo 2.3.6)
Fator numérico utilizado como um multiplicador da incerteza padrão de medição de modo a obter uma incerteza expandida de medição.

B 12 grandeza de entrada (da [ref 1] seção 4.1.2)
Grandeza da qual o mensurando depende, levada em conta no processo de avaliação do resultado de uma medição.

B13 grandeza de saída (da [ref. 1] seção 4.1.2)
Grandeza que representa o mensurando na avaliação de uma medição.

B14 incerteza de medição ([ref. 2] termo 3.9)
Parâmetro, associado ao resultado de uma medição, que caracteriza a dispersão dos valores que podem ser razoavelmente atribuídos a um mensurando.

B 15 incerteza expandida ([ref. 1] termo 2.3.5)
Grandeza que define um intervalo em tomo do resultado de uma medição com a qual se espera abranger uma grande fração da distribuição dos valores que possam ser razoavelmente atribuídos ao mensurando.

B 16 incerteza padrão de medição ([ref. 1] termo 2.3.1)
Incerteza de medição expressa como um desvio padrão.

B 17 incerteza padrão relativa de medição (da [ref. 1] seção 5.1.6)
Incerteza padrão de uma grandeza dividida pela estimativa desta grandeza.

B 18 média aritmética ([ref. 3] termo 2.26)
Soma dos valores dividido pelo número de valores.

B19 capacidade de medição e calibração (CMC) (baseado em ILAC P14)
Menor incerteza de medição que um laboratório de calibração pode obter quando realiza calibrações ou medições dentro do escopo da sua acreditação.

Nota 1: Este termo substitui o termo “melhor capacidade de medição”

Nota 2: A CMC está publicada no escopo de acreditação do laboratório de calibração.

B20 mensurando ([ref. 2] termo 2.6)
Grandeza específica submetida sujeita à medição.

B21 método de avaliação do Tipo A ([ref. 1] termo 2.3.2)
Método de avaliação da incerteza de medição pela análise estatística de séries de observações.

B22 método de avaliação do Tipo B ([ref. 1] seção 2.3.3)
Método de avaliação da incerteza de medição por outros meios que não a análise estatística de séries de observações.

B23 probabilidade de abrangência (da [ref. 1] termo 2.3.5, nota 1)
Fração, usualmente grande, da distribuição de valores, como um resultado de uma medição que pode razoavelmente ser atribuído ao mensurando.

B24 variância experimental (da [ref. 1] seção 4.2.2)
Grandeza que caracteriza a dispersão dos resultados de uma série de *n* observações do mesmo mensurando dado pela equação (3.2) no texto.

B25 variância (da [ref. 3] termo 1.22)
Valor esperado do quadrado do desvio de uma variável aleatória em relação a seu valor esperado.

B26 variável aleatória ([ref. 3] termo 1.2)
Uma variável que pode assumir qualquer um dos valores de um conjunto especificado de valores e com a qual esteja associada uma distribuição de probabilidade.

Apêndice C -Fontes de incerteza de medição

C1 A incerteza do resultado de uma medição reflete a falta de conhecimento completo do valor do mensurando. O conhecimento completo requer uma infinita quantidade de informações. Fenômenos que contribuem para a incerteza e desta maneira para o fato de que o resultado de uma medição não possa ser caracterizado por um único valor, são denominados de fontes de incertezas. Na prática, há muitas possíveis fontes de incerteza em uma medição [ref. 1], incluindo:

(a) definição incompleta do mensurando;
(b) realização imperfeita da definição do mensurando;
(c) amostragem não representativa - a amostra medida pode não representar o mensurando definido;
(d) conhecimento inadequado de efeitos das condições ambientais ou medições imperfeitas destas;
(e) tendências pessoais na leitura de instrumentos analógicos;
(f) resolução finita do instrumento ou limiar de mobilidade;
(g) valores inexatos dos padrões de medição e dos materiais de referência;
(h) valores inexatos de constantes e outros parâmetros obtidos de fontes externas e utilizados no algoritmo de redução de dados;
(i) aproximações e suposições incorporadas ao método e ao procedimento de medição;
(j) variações nas observações repetidas do mensurando sob condições aparentemente idênticas.

C2 Estas fontes não são necessariamente independentes. Algumas das fontes de (a) a (i) podem contribuir para (j)

Apêndice D -*Grandezas de entrada correlacionadas*

D1 Se duas grandezas X_j e X_k são, sabidamente, correlacionadas em certo grau isto é, se elas são dependentes uma da outra - a covariância associada às duas estimativas x_j e x_k

$$u(x_i, x_k) = u(x_i)u(x_k)r(x_i, x_k) \qquad (i \neq k) \qquad \text{(D. 1)}$$

$r(x_i, x_k)$

deve ser considerada como uma contribuição adicional à incerteza. O grau da correlação é caracterizado pelo coeficiente de correlação $r(x_i, x_k)$ (onde $i \neq k$ e $|r| \leq 1$.

D2 No caso de n pares independentes de observações repetidas simultaneamente, de duas grandezas *P* e *Q,* a covariância, associada às médias aritmética $\bar{p}$ e $\bar{q}$, é dada por

$$s\,\bar{p},\bar{q} = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{j=1}^{n} (p_j - \bar{p})(q_j - \bar{q}) \qquad \text{(D.2)}$$

e, por substituição, r pode ser calculado pela equação (D. 1).

D3 Para as grandezas de influência, qualquer grau de correlação deve ser baseado na experiência. Quando há correlação, a equação (4. 1) deve ser substituída por

$$u^2(y) = \sum_{j=1}^{N} c_j^2 u^2(x_j) + 2\sum_{i=1}^{N-1} \sum_{k=i+1}^{N} c_i c_k u(x_i, x_k) \qquad \text{(D.3)}$$

onde c_i e c_k são os coeficientes de sensibilidade definidos pela equação (4.3)
ou

$$u^2(y) = \sum_{i=1}^{N} u_i^2(y) + 2\sum_{i=1}^{N-1} \sum_{k=i+1}^{N} u_i(y)u_k(y)r(x_i, x_k) \qquad \text{(D.4)}$$

com as contribuições $u_i(y)$ à incerteza padrão da estimativa de saída *y* resultante da incerteza padrão das estimativas de entrada x_i fornecida pela equação (4.2). Deve ser notado que a segunda somatória de termos da equação (D.3) ou (D.4) pode tomar-se negativa.

D4 Na prática, as grandezas de entrada são frequentemente correlacionadas porque na avaliação de seus valores é utilizado o mesmo padrão de referência, instrumento de medição, dado de referência, ou até o método de medição, tendo uma incerteza significativa. Sem prejuízo de generalidade, suponha que duas grandezas de entrada X_1 e X_2 estimados por x_1 e x_2 dependam do conjunto de variáveis independentes $Q_l(1=1,2,..L)$

$$\begin{aligned} X_1 &= g_1(Q_1, Q_2 ... Q_L) \\ X_2 &= g_2(Q_1, Q_2 ... Q_L) \end{aligned} \qquad \text{(D.5)}$$

embora algumas destas variáveis possam não aparecer necessariamente em ambas as funções. As estimativas x_1 e x_2 das grandezas de entrada serão correlacionadas em algum grau, mesmo se as estimativas q_1(1=1,2, ... L) forem não correlacionadas. Neste caso, a covariância $u(x_1, x_2)$ associada às estimativas x_1 e x_2 é dada por

$$u(x_1, x_2) = \sum_{l=1}^{L} c_{1l} c_{2l} u^2(q_l) \qquad \text{(D.6)}$$

onde c_{1l} e c_{2l} são os coeficientes de sensibilidade derivados das funções g_1 e g_2 em analogia à equação (4.3). Porque somente contribuem para a somatória aqueles termos cujos coeficientes de sensibilidade não sejam desprezíveis, a covariância é zero se não existir variável comum às funções g_1 e g_2. O coeficiente de correlação $r(x_l, x_2)$ associado às estimativas x_l e x_2 é determinado pela equações (D.6) conjugada com a equação (D.1).

D5 O exemplo a seguir demonstra as correlações existentes entre os valores atribuídos a dois artefatos padrão que são calibrados com o mesmo padrão de referência.

Problema de medição

Os dois padrões X_j e X_2 são comparados com o padrão de referência Q_s por meio de um sistema de medição capaz de determinar uma diferença z entre seus valores com uma incerteza padrão associada $u(z)$. O valor q_s do padrão de referência é conhecido com uma incerteza padrão $u(q_s)$.

Modelo matemático

As estimativas de x_1 e x_2 dependem do valor q_s, do padrão de referência e das diferenças observadas z_1, e z_2 conforme as relações

$$x_1 = q_s - z_1$$
$$x_2 = q_s - z_2 \qquad \text{(D.7)}$$

Incertezas padrão e covariâncias

Supõe-se que as estimativas x_1, x_2 e q_s não sejam correlacionadas porque foram determinadas em medições diferentes. As incertezas padrão são calculadas a partir da equação (4.4) e a covariância associada com as estimativas x_1 e x_2 é calculada a partir da equação (D.6), supondo que $u(z_l)=u(z_2)=u(z)$,

$$u^2(x_1) = u^2(q_s) + u^2(z)$$

$$u^2(x_2) = u^2(q_s) + u^2(z) \qquad \text{(D.8)}$$

$$u(x_1, x_2) = u^2(q_s)$$

O coeficiente de correlação deduzido destes resultados é:

$$r(x_1, x_2) = \frac{u^2(q_s)}{u^2(q_s) + u^2(z)} \qquad \text{(D.9)}$$

Seu valor está compreendido entre 0 e +1, dependendo da razão entre as incertezas padrão *u*(q_s) e *u(z)*.

D6 O caso descrito pela equação (D.5) é uma situação onde a inclusão da correlação na avaliação da incerteza padrão do mensurando pode ser evitada por uma escolha apropriada da função modelo. Introduzindo diretamente as variáveis independentes Q_l pela substituição das variáveis originais X_1 e X_2 na função modelo *f*, de acordo com as equações de transformação (D.5), resulta em uma nova função modelo que não mais contenha as variáveis correlacionadas X_1 e X_2 ..

D7 Há casos entretanto, onde a correlação entre duas grandezas de entrada X_1 e X_2 não pode ser evitada, por exemplo, usando o mesmo instrumento de medição ou o mesmo padrão de referência na avaliação das estimativas de entrada x_1 e x_2, mas onde as equações de transformação para as novas variáveis independentes não são disponíveis. Se além disso o grau de correlação não é exatamente conhecido pode ser útil avaliar a influência máxima que esta correlação pode ter através de uma estimativa do limite superior da incerteza padrão do mensurando, o qual, no caso em que não foi necessário levar em consideração outras correlações, toma a forma

$$u^2(y) \leq (|u_2(y)| + |u_2(y)|)^2 + u_r^2(y) \qquad \text{(D.10)}$$

sendo u_r,*(y)* a contribuição para a incerteza padrão de todas as grandezas de entrada restantes, supostas não serem correlacionadas.

Nota: A equação (D.10) é facilmente generalizada para casos de um ou vários grupos com duas ou mais grandezas de entrada correlacionadas. Neste caso, uma soma de termos do pior caso deve ser introduzida na equação (D.10) para cada grupo de grandezas correlacionadas.

Apêndice E -*Fatores de Abrangência Obtidos a partir dos Graus de Liberdade Efetivos*

E1 Para estimar o valor de um fator de abrangência *k* correspondente a uma probabilidade de abrangência especificada, é necessário que seja levada em conta a confiabilidade da incerteza padrão *u(y)* da estimativa de saída y. Isto implica considerar o quão bem *u(y)* estima o desvio padrão associado ao resultado da medição. Para uma estimativa do desvio padrão de uma distribuição normal, os graus de liberdade desta estimativa, que depende do tamanho da amostra na qual ela está baseada, é uma medida da confiabilidade. Analogamente, uma medida adequada da confiabilidade da incerteza padrão associada a uma estimativa de saída é seu grau de liberdade efetivo v_{eff} , que é aproximado por uma combinação apropriada dos graus de liberdade efetivos das diferentes contribuições da incerteza $u_i(y)$.

E2 O procedimento para o cálculo de um fator de abrangência apropriado *k*, quando as condições do teorema central do limite são satisfeitas, compreende os três seguintes passos:

(a) Obter uma incerteza padrão associada à estimativa de saída de acordo com o procedimento descrito passo a passo na seção 7.

(b) Estimar os graus de liberdade efetivos v_{eff} da incerteza padrão *u(y)*, associada à estimativa de saída *y* a partir da fórmula de Welch-Satterhwaite

$$v_{eff} = \frac{u^4(y)}{\sum_{i=1}^{N} \frac{u_i^4(y)}{v_i}} \qquad \text{(E.1)}$$

onde os $u_i(y)$ $(i=1,2,..,N)$, definidos na equação (4.2), são as contribuições para a incerteza padrão associada à estimativa de saída *y*, resultante da incerteza padrão associada à estimativa de entrada x_i, que se admite sejam mutuamente independentes estatisticamente, e vi são os graus de liberdade efetivo da contribuição da incerteza padrão $u_i(y)$.

Para uma incerteza padrão $u(\bar{q})$obtida de uma avaliação do Tipo A como discutida na subseção 3.1, os graus de liberdade são dados por $v_i=n$-l. *É* mais problemático associar graus de liberdade com uma incerteza padrão $u(x_i)$ obtida pela avaliação do Tipo B. Entretanto, é uma prática comum efetuar tais avaliações de maneira a assegurar que qualquer sub-estimativa seja evitada. Se, por exemplo, os limites inferior e superior a_- *e* a_+, são estabelecidos, eles são usualmente escolhidos de tal forma que a probabilidade da grandeza em questão cair fora desses limites é de fato extremamente pequena. Sob a hipótese de que esta prática seja seguida, os graus de liberdade da incerteza padrão $u(x_i)$ obtidos de uma avaliação do Tipo B podem ser tomados como sendo $v_i \rightarrow \infty$.

(c) Obter o fator de abrangência *k* através da tabela E.1, deste Apêndice. Esta tabela é baseada na distribuição-*t* avaliada para uma probabilidade de abrangência de 95,45%. Se v_{eff} não for inteiro, o que é usualmente o caso, truncar v_{eff} para o próximo menor inteiro.

Tabela E.1: fatores de abrangência *k* para diferentes graus de liberdade v_{eff}

v_{eff}	1	2	3	4	5	6	7	8	10	20	50	∞
K	13,97	4,53	3,31	2,87	2,65	2,52	2,43	2,37	2,28	2,13	2,05	2,00

APÊNDICE F – Exemplos de Expressão da Capacidade de Medição e Calibração (CMC)

Este Apêndice apresenta alguns exemplos de expressão da Capacidade de Medição e Calibração aplicando-se o procedimento estabelecido na seção 8 deste Anexo.

Exemplo 1: Um valor de CMC para um único valor da grandeza

No caso de medidas materializadas é comum expressar a CMC para os valores individuais, embora haja situações em que, mesmo neste caso a CMC pode ser expressa para uma faixa de valores. Abaixo exemplos de especificação da CMC para valores individuais discretos:

Faixa	CMC
1 g	0,016 mg
10 pF. (1 kHz)	0,02 %
1 Ω	0,24 mΩ

Quando a CMC C se refere a uma faixa ela deve ser aplicável a todos os valores da faixa e não apenas à menor incerteza que pode ser obtida em um único ponto da faixa.

A CMC declarada para uma determinada faixa de valores deve ser verdadeira para cada valor medido naquela faixa específica.

Exemplo 2: Um único valor para toda a faixa:

Faixa	CMC
10 V até 100 V	0,002 V

Neste caso, o laboratório não poderá declarar em seus certificados de calibração uma incerteza de medição menor que 0,002 V para nenhum dos pontos da faixa, mesmo que existam razões para isto, como por exemplo:

a) se o valor da CMC for realmente fixo para toda a faixa e não depender de forma alguma do valor medido, ou então, se esta dependência for desprezível e eliminada nos arredondamentos.

b) se o laboratório consegue obter incertezas menores (Ex. 0,0011 V no ponto 1 V e 0,0013 V no ponto 20 V), mas decidiu, por questão de conservadorismo, declarar a incerteza com apenas um algarismo significativo, ou por qualquer outro motivo resolveu arredondar a incerteza para simplificar os cálculos.

Exemplo 3: Valor em percentual ou ppm

Faixa	CMC
até 100 kN	0,31 %
> 100 kN até 500kN	0,43 %

Exemplo 4: Um valor fixo somado a um percentual/ppm do valor medido

Faixa	CMC
> 1 Mpa até 100 MPa	0,01 Mpa + 10 ppm

Exemplo 5: Um valor fixo somado a um fator que depende linearmente do valor medido

Faixa	CMC
até 100 mm	(0,8 + L/500) µm, L em mm
> 100 mm até 1000 mm	(1,3 + L/300) µm, L em mm
Diâmetro: até 600 mm	(0,7 + L/1000) mm, L em mm
Circularidade até 200 mm	(0,7 + L/100) mm, L em mm

A apresentação da CMC dos exemplos 3, 4 e 5 pode ser oriunda, por exemplo, das seguintes razões:

a) O laboratório observou que a incerteza varia linearmente com o valor medido.

b) A função que descreve a variação da incerteza com o valor medido não é linear (em alguns casos poderia resultar em valores maiores ou menores que a aqueles da função linear), mas se aproxima bastante disto e o laboratório, pelos mesmos motivos exposto acima com respeito ao exemplo 2 decidiu aproximá-la para uma função linear.Mesmo assim, o laboratório nunca poderia declarar incertezas de medição menores que a CMC em seus certificados de calibração, mesmo que esta incerteza fosse resultado de seus cálculos.

Exemplo 6: Uma função quadrática do valor medido

Faixa	CMC
0,5 até 100 mm	Q (28, 0,5 L) µm ou $\sqrt{28 + (0,5\ L)^2}\,\mu m$

Onde L é o comprimento em milímetros.

No exemplo (6) a CMC é expressa como uma função quadrática composta de uma constante e de uma contribuição que varia de acordo com o valor medido.

Exemplo 7: Subdivisão de faixas do mensurando:

No exemplo abaixo temos subdivisão de faixas do mensurando. Nesta situação é importante atentar para que não aconteça a indicação de mais do que uma única CMC para cada valor: Este exemplo inclui além do mensurando, outros parâmetros dos quais depende a CMC.

Faixa	CMC
Coaxial 75 Ω ohm conector Tipo N ≥ 20MHz até ≤ 1 GHz	
≥ -100 dBm até < -80dBm	2,0 dB
≥ - 80 dBm até < -60dBm	1,8dB

Exemplo 8: Uma faixa de valores.

Faixa	CMC
até 200 ^{0}C	de 0,3 ^{0}C até 0,5 ^{0}C
> 200 ^{0}C até 1000 ^{0}C	de 0,7 ^{0}C até 1,0 ^{0}C

Neste caso, o laboratório pode ter, por exemplo, constatado que a incerteza não varia linearmente com o valor medido e, portanto, decidiu apresentar apenas os valores mínimo e máximo da CMC para uma dada faixa. Estes valores são normalmente obtidos, respectivamente, para os limites inferior e superior da faixa. É importante observar que a função que define esta CMC para uma dada faixa deve ser a mesma em toda a faixa, sendo usado o mesmo método de medição para toda a faixa. Caso os métodos ou funções sejam diferentes, a faixa deve ser subdividida.

Exemplo 9 A CMC não inclui contribuições oriundas do “melhor dispositivo existente”

Faixa	CMC
até 100 kN	* 0,31 %

Antes da CMC que não inclui as contribuições oriundas do dispositivo calibrado ou medido deve ser escrito um asterisco (*).

Ao final da página do escopo de acreditação será acrescentada a seguinte nota:

“**Nota**: A CMC identificada por um asterisco (*) não inclui contribuições oriundas do instrumento ou padrão calibrado ou do dispositivo medido.”

Apêndice G - Comissão de Tradução e Revisão da Primeira Edição Brasileira

A Coordenação Geral de Acreditação agradece aos membros da Comissão que preparou a tradução para emissão da primeira versão deste documento.

Prof. Maurício Nogueira Frota, Diretor da Dimci/Inmetro
Josefa Paredes Villalobos, Presidente do GT-3/RBC/Dicla/Inmetro, Incerteza de Medição
Adauto de Oliveira (Inmetro)
Álvaro de Medeiros Farias Theisen (Labelo/PUCRG)
Celso Pinto Saraiva (CPqD/Campinas)
Gilberto Fidélis (Certi/SC)
José Carlos Valente de Oliveira (Inmetro)
José Eustáquio da Silva (Cetec/MG)
José Luciano Duarte (IF/USP)
Léa Contier de Freitas (Inmetro)
Luiz Gonzaga Mezzalira (Mackenzie/SP)
Marco Antônio Giaggio (Certi/SC)
Marcos Motta de Souza (Inmetro)
Maurício Soares (Inmetro)
Nelson Schoeler (Certi/SC)
Renato Nunes Teixeira (Inmetro)
Ricardo José de Carvalho (ON/RJ)
Valter Quilici Pereira (CNEN/MG)
Vitor Manoel Loayza de Mendoza (Inmetro)
Walter Link (IPT/SP)
Walter Yoshiriko Aibe (Inmetro)
Wilson Maftoun (LAC/Copel/PR)