



LABORATÓRIO NACIONAL  
DE ENGENHARIA CIVIL

CENTRO DE INSTRUMENTAÇÃO CIENTÍFICA  
Núcleo de Qualidade Metrológica

Proc. 1104/11/17804

## PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO DE MEDIDORES DE NÍVEL (CAUDAL) ULTRASSÓNICOS

Estudo realizado no âmbito do Projecto de Investigação  
“Desenvolvimento da Qualidade Metrológica de  
Instrumentação Científica Aplicada em Engenharia Civil”

Lisboa • Março de 2011

I&D INSTRUMENTAÇÃO CIENTÍFICA

RELATÓRIO 114/2011 – NQM



## **Procedimento de Calibração de Medidores de Nível (Caudal) Ultrassónicos**

### **Resumo**

O presente relatório apresenta um procedimento para a calibração de medidores de nível ultrassónicos desenvolvido no Centro de Instrumentação Científica do LNEC e realizado no Laboratório Central de Apoio Metrológico (LCAM/LNEC), cuja aplicação habitual se destina à medição de caudal de escoamentos em superfície livre, nomeadamente, em caleiras Parshall.

## **Ultrasonic Level (Flow) Meters Calibration Procedure**

### **Abstract**

This report presents a calibration procedure for ultrasonic level (flow) meters developed at LNEC's Scientific Instrumentation Centre and performed at the Central Laboratory for Metrological Support (LCAM/LNEC). These ultrasonic level meters are applied in open channel flow measurement, namely, in Parshall flumes.

## **Procédure d'Étalonnage des Mesureurs de Niveau (Débit) Ultrasoniques**

### **Résumé**

Ce rapport présente une procédure pour l'étalonnage des mesureurs de niveau (débit) ultrasoniques développée au Centre d'Instrumentation Scientifique du LNEC et réalisée au Laboratoire Central de Soutien Métrologique (LCAM/LNEC). Ces mesureurs de niveau ultrasoniques sont utilisés afin de mesurer le débit dans les canaux ouverts, particulièrement, sur les buses Parshall.



# ÍNDICE

|   |          |
|---|----------|
| <b>1. INTRODUÇÃO .....</b>  | <b>1</b> |
| <b>2. CONTEÚDO DO RELATÓRIO .....</b>   | <b>3</b> |
| <br>  |          |
| <b>Anexo 1</b> Procedimento de Calibração de Medidores de Nível<br>(Caudal) Ultrassónicos ..... | <b>5</b> |



# PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO DE MEDIDORES DE NÍVEL (CAUDAL) ULTRASSÓNICOS

## 1 INTRODUÇÃO

No âmbito do processo “Desenvolvimento da Qualidade Metrológica de Instrumentação Científica Aplicada em Engenharia Civil” o Núcleo de Qualidade Metrológica (NQM) do Centro de Instrumentação Científica tem promovido, entre outros estudos, a elaboração de procedimentos aplicáveis à calibração de instrumentos de medição e ao ensaio de equipamentos laboratoriais.

Esta actividade foi inicialmente orientada para a satisfação das necessidades do Laboratório Central de Apoio Metrológico (LCAM/LNEC), inserido no NQM, dos laboratórios de ensaio acreditados do LNEC e, ainda, de clientes externos. No entanto, a vocação natural de serviço transversal do NQM tem conduzido a uma crescente solicitação deste tipo de actividade por parte de sectores do LNEC, bem como de entidades externas, que desenvolvem acções fora do ambiente laboratorial comum, nomeadamente, realizando a medição e monitorização de grandezas em ambiente industrial e em ensaios de campo.

No caso de solicitações de entidades externas particularmente vocacionadas para a actividade de engenharia civil, sempre que se verifica que o laboratório dispõe de meios para promover novas actividades e que não existe, no mercado, oferta de serviços para esse efeito, procura-se desenvolver soluções que permitam, por um lado, dar resposta a essas necessidades e, por outro lado, potenciar a rendibilidade dos recursos do LCAM/LNEC.

Estas circunstâncias verificaram-se no presente caso, onde sucessivas solicitações ao LNEC visando a calibração de medidores de nível ultrassónicos utilizados na medição de caudal em superfície livre com caleira Parshall e a ausência de ofertas alternativas para este efeito no mercado, levaram o NQM a analisar a adequação dos meios de que dispõe e, satisfeito este requisito prévio, a desenvolver um procedimento para proceder a este tipo de calibração contribuindo, assim, para a resolução de uma dificuldade suscitada por entidades que desenvolvem a sua acção no contexto ambiental (de saneamento e de tratamento de águas residuais), efectuando medições de caudal que carecem de uma rastreabilidade apropriada no contexto do Sistema Internacional (SI) de unidades. Desta forma, o LNEC

contribui para o processo de garantia da qualidade das medições no contexto nacional, de acordo com a sua missão.

Os procedimentos de calibração desenvolvidos no NQM são, regra geral, baseados em normas portuguesas ou, na ausência destas, em normas estrangeiras ou internacionais. Contudo, em casos como o presente, em que a instrumentação não possui requisitos normativos explicitamente dedicados à sua calibração, o NQM tem vindo a desenvolver procedimentos de calibração por analogia com a tipologia da instrumentação em causa e tendo em consideração o método de medição aplicado, com vista a estabelecer um procedimento interno suportado em regras que permitam atingir os aspectos fundamentais de garantia da qualidade das medições. Assim, é efectuada a caracterização metrológica, considerada crítica para assegurar o bom desempenho instrumental, a identificação dos padrões de referência adequados, a selecção do método de calibração aplicável e das etapas do procedimento de ensaio. Complementarmente são identificadas as contribuições para a avaliação da incerteza de medição associada aos resultados da calibração e recolhida a informação relevante para a elaboração do certificado de calibração.

Num contexto mais amplo refira-se que o procedimento objecto do presente relatório faz parte do acervo de mais de 60 procedimentos de calibração e ensaio metrológico desenvolvidos pelo NQM ao longo da sua existência, os quais contêm indicações pormenorizadas dos diferentes aspectos que suportam os serviços prestados pelo LCAM/LNEC constituindo uma parte importante do Sistema de Gestão (da Qualidade) deste laboratório, que se encontra acreditado no quadro do Sistema Português da Qualidade desde 1994.

Refira-se, também, que o interesse da publicação periódica deste tipo de documentos resulta da necessidade de consolidação e disseminação de conhecimento associado à introdução de novos procedimentos, situação que ocorre neste caso, bem como, da necessidade de introdução de revisões periódicas destes documentos, ditada quer pela evolução dos processos operativos quer pela adopção de requisitos mais exigentes. Esta iniciativa tem como objectivo colateral divulgar informação relevante e actualizada, ainda que de uma forma reservada, aos clientes do LCAM/LNEC, que assim poderão interpretar melhor os resultados das calibrações ou dos ensaios metrológicos realizados.



## 2 CONTEÚDO DO RELATÓRIO

No presente relatório é divulgado, em Anexo, o Procedimento E3601 designado por “Procedimento de Calibração de Medidores de Nível (Caudal) Ultrassónicos”, o qual foi elaborado com base num método de calibração desenvolvido internamente com o objectivo de efectuar a avaliação de um conjunto de requisitos metrológicos que pretendem assegurar a qualidade das medições e a rastreabilidade deste tipo de medidores de nível.

O procedimento da calibração destinado à calibração de medidores de nível (caudal) ultrassónicos é constituído por um conjunto de secções incluindo:

- uma apresentação introdutória contendo detalhes relativos aos princípios de funcionamento, instalação e alinhamento;
- as operações preparatórias que devem anteceder a realização do ensaio de avaliação do nível de exactidão da grandeza mensurável;
- o procedimento de calibração visando a avaliação dos desvios de calibração observados, os quais são obtidos pela diferença entre as indicações do equipamento de leitura do medidor de nível ultrassónico e os valores observados com o padrão de referência;
- a avaliação das incertezas de medição tendo em conta as contribuições associadas ao padrão, ao sistema de medição a calibrar e ao método utilizado;
- e o conteúdo informativo do certificado de calibração.

A concretização dos ensaios de calibração de medidores de nível (caudal) ultrassónicos é efectuada nas instalações do LCAM/LNEC com recurso a padrões de referência deste laboratório, rastreados aos padrões primários das respectivas grandezas, assegurando o cumprimento de requisitos normativos aplicáveis.

**VISTOS**

O Director do CIC,



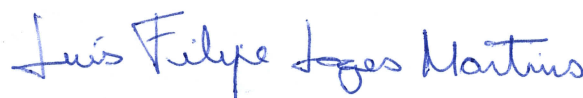
Carlos Oliveira Costa

**AUTORIA**



Álvaro Silva Ribeiro

Lic.º em Física Tecnológica, Doutor  
Investigador Auxiliar, Chefe do NQM



Luís Filipe Lages Martins

Lic.º em Engenharia Mecânica  
Bolsheiro de Doutoramento



João Onofre Benevente

Eng.º Técnico  
Técnico Superior

## **ANEXO 1**

### **Procedimento de Calibração de Medidores de Nível (Caudal) Ultrassónicos**





**Laboratório Nacional de Engenharia Civil**

Centro de Instrumentação Científica

Laboratório Central de Apoio Metrológico



---

**Procedimento LCAM/LNEC E3601 – V.01**

**Medidores de nível (caudal) ultrassónicos**

**INDICE**

---

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1 - ÂMBITO E EQUIPAMENTO DE REFERÊNCIA .....</b>                               | <b>3</b>  |
| <b>2 - PRINCÍPIO DE MEDIÇÃO .....</b>   | <b>3</b>  |
| <b>3 - MÉTODO DE CALIBRAÇÃO .....</b>   | <b>3</b>  |
| <b>4 - PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO .....</b>                                       | <b>3</b>  |
| 4.1 - Introdução .....  | 3         |
| 4.2 - Capacidade do LCAM/LNEC para calibrar um medidor de nível ultrassônico      | 4         |
| 4.3 - Limpeza, inspeção visual e montagem.....                                    | 4         |
| 4.4 - Condições ambientais durante a calibração .....                             | 6         |
| 4.5 - Instalação do medidor de nível na MMC 3D .....                              | 6         |
| 4.6 - Procedimento de calibração.....   | 7         |
| 4.7 - Determinação dos resultados e da incerteza de medição.....                  | 8         |
| 4.8 - Certificado de calibração.....  | 8         |
| <b>5 - DOCUMENTOS DE REFERÊNCIA .....</b>   | <b>9</b>  |
| <br>  |           |
| <b>Anexo 1 - Modelo matemático e componentes da avaliação de incertezas .....</b> | <b>10</b> |

RESERVADO

## **1 – ÂMBITO E EQUIPAMENTO DE REFERÊNCIA**

---

O Laboratório Central de Apoio Metrológico do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LCAM/LNEC) executa, em laboratório, a calibração de medidores de nível (caudal) ultrassónicos cuja resolução não ultrapasse 0,005 mm e o intervalo de medição esteja compreendido entre 0 mm e 1200 mm.

Para realizar a calibração mencionada o LCAM/LNEC dispõe do seguinte equipamento padrão:

- *MMC 3D (Máquina de medição de coordenadas tridimensionais) rastreada aos padrões primários da grandeza comprimento.*

## **2 - PRINCÍPIO DE MEDIÇÃO**

---

O princípio de medição consiste na aplicação de deslocamentos de referência gerados pelo corpo móvel do equipamento de calibração (MMC 3D) os quais são medidos pelo medidor de nível com recurso à emissão de sinais ultrassónicos e à subsequente recepção dos sinais reflectidos por um alvo instalado no corpo móvel e deslocando-se solidariamente com este.

## **3 - MÉTODO DE CALIBRAÇÃO**

---

O método de calibração baseia-se na comparação directa entre a indicação de referência associada ao deslocamento entre o sensor de emissão/recepção e o alvo e os valores indicados pela cadeia de medição a calibrar.

## **4 - PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO**

---

### **4.1 - Introdução**

Apresenta-se, a seguir, um procedimento de calibração de medidores de nível ultrassónicos com alcance até 600 mm (na posição vertical) e 1200 mm (na posição horizontal) elaborado pelo LCAM/LNEC.

#### **4.2 - Capacidade do LCAM/LNEC para calibrar um medidor de nível ultrassónico**

Quando solicitado para calibrar um medidor de nível ultrassónico, o LCAM/LNEC avaliará a sua capacidade laboratorial para efectuar a operação tendo em conta o alcance, a exactidão do equipamento de calibração e a resolução do medidor de nível.

#### **4.3 – Limpeza, inspecção visual e montagem**

O medidor de nível ultrassónico deverá ser limpo previamente à execução da calibração de modo a retirar impurezas associadas à sua aplicação. Este processo deverá ser executado num espaço com acesso e drenagem de águas, usando luvas e óculos de protecção e outro equipamento que se considere adequado.

O medidor de nível a calibrar e o alvo deverão ser colocados na sala laboratorial de medição de comprimento onde se encontra a MMC 3D pelo menos uma hora antes de iniciar a execução do ensaio de calibração.

A inspecção visual deverá incluir a observação da superfície de interface à emissão e de recepção do sinal de reflexão, anotando-se sinais de deformação, degradação ou outros que possam ser considerados relevantes para o processo de medição. Dever-se-á verificar o estado de junções e cabos de ligação ao indicador.

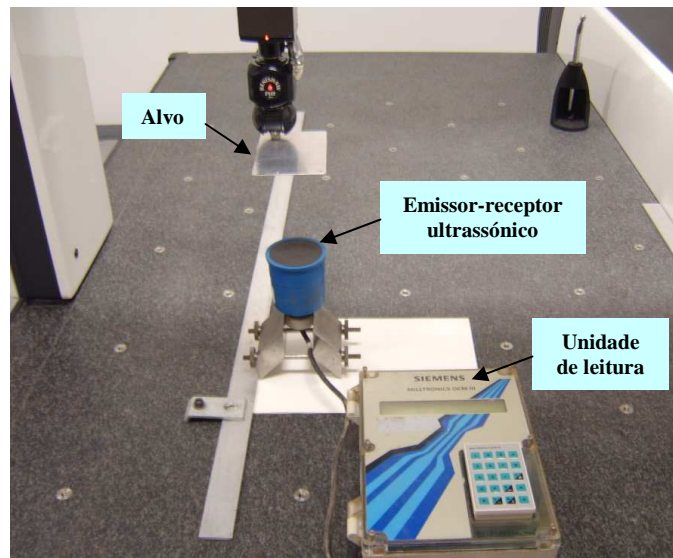
A montagem do alvo na ponteira deve seguir o seguinte procedimento:

- a. retirar a ponteira do apalpador da MMC 3D;*
- b. instalar o alvo (placa metálica reflectora) no braço da MMC 3D recorrendo a elementos de ligação roscados;*
- c. ajustamento de paralelismo entre a superfície de interface de emissão e recepção do sinal ultrassónico e o alvo, efectuando o encosto da superfície reflectora do alvo com a interface mencionada;*
- d. afastar o alvo até à distância máxima correspondente ao nível zero.*

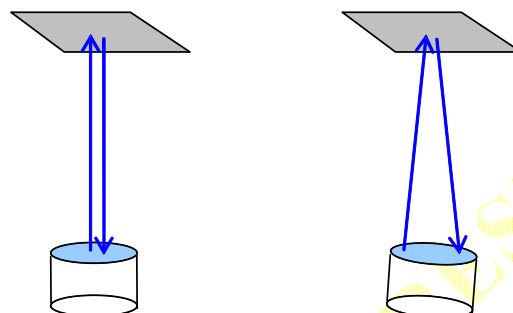


A montagem do emissor-receptor ultrassónico deverá ser efectuada na posição vertical se o alcance máximo a observar não ultrapassar 600 mm ou na horizontal no caso do alcance máximo ser superior a 600 mm e até ao limite máximo de 1 200 mm.

No caso de se aplicar a montagem vertical dever-se-ão utilizar, sempre que possível, os acessórios do medidor de nível e assegurar que o emissor-receptor ultrassónico se encontra o mais paralelo possível ao plano da MMC 3D, visando um adequado alinhamento do eixo vertical de medição (*vide* Figura 1). Essa situação poderá ser verificada mediante um ensaio prévio que detecta o valor mínimo da distância observada entre a interface do emissor-receptor ultrassónico e o alvo colocado na mesma vertical em posição fixa, conforme ilustrado na Figura 2.



*Figura 1 – Montagem experimental.*



*Figura 2 – Alinhamento vertical do emissor-receptor com o alvo.*

No caso da montagem horizontal, dever-se-á assegurar que o plano definido pela interface do emissor-receptor ultrassónico se encontra ortogonal ao plano da mesa da MMC 3D e que se estabelece um alinhamento horizontal adequado, de forma equivalente ao mencionado para a montagem vertical. Neste tipo de montagem dever-se-á utilizar um apoio de modo a impedir que o cone de propagação do sinal da fonte emissora para o alvo e o cone de propagação de retorno do sinal criem perturbações devido a reflexões de sinal provenientes da superfície do plano da mesa da MMC 3D.

Tal como no caso anterior, dever-se-á efectuar um ensaio prévio visando obter o melhor alinhamento mantendo o alvo numa posição fixa e procurando a posição da interface do emissor-receptor ultrassónico que minimiza a distância observada.

#### **4.4 – Condições ambientais durante a calibração**

Durante a realização dos ensaios deverá ser efectuada a medição das condições ambientais da sala laboratorial, a qual deverá ter valores de temperatura e humidade relativa de  $(20 \pm 1) ^\circ\text{C}$  e  $(50 \pm 15) \% \text{ hr}$ , respectivamente, de acordo com os requisitos estabelecidos para o espaço laboratorial dedicado a medições dimensionais e geométricas.

#### **4.5 – Preparação da calibração**

Para se proceder à execução do ensaio deve-se conhecer previamente alguns dados paramétricos associados à utilização do medidor de nível, em particular, a sua zona morta (a cota a partir da qual o medidor de nível deixa de efectuar leituras – na instalação em caleiras equivale à distância mínima da superfície do fluido relativamente à interface do emissor-receptor ultrassónico, ou seja, o nível máximo de fluido que se pode detectar) e o seu alcance máximo,  $d_Q(\text{max})$ , que determina o caudal nulo e, de forma equivalente, o nível zero de fluido, como se observa na Figura 3 (esta última informação deverá coincidir com a parametrização da cadeia de medição para o valor de caudal nulo).

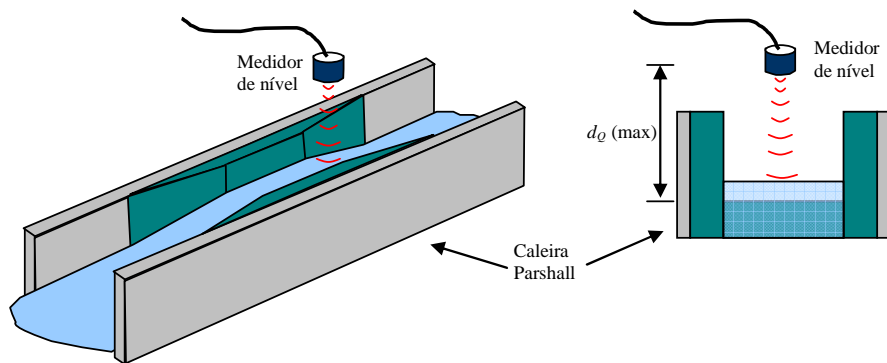


Figura 3 – Medidor de nível em caldeira Parshall (em perspectiva e corte transversal).

De modo a que se reproduza adequadamente o funcionamento do medidor de nível, a determinação dos patamares de ensaio deverá ter em consideração que o “zero” da escala do medidor de nível corresponderá, portanto, ao afastamento máximo entre a posição de referência deste na instalação experimental de calibração e a posição do alvo.

#### 4.6 - Procedimento de calibração

O ensaio de calibração visa a determinação dos desvios de indicação e de repetibilidade em medidores de nível ultrassónicos, sendo composto pelas seguintes tarefas operacionais:

- Verificar se a alimentação eléctrica da cadeia de medição do medidor de nível, constituída pelo emissor-receptor ultrassónico e unidade de leitura, se encontra devidamente ligada;*
- Verificar as ligações entre o emissor-receptor ultrassónico e a unidade de leitura;*
- Seleccionar seis patamares de ensaio equitativamente distribuídos entre o patamar correspondente ao zero do equipamento a calibrar (nível mínimo) e o valor máximo de caudal mensurável (definido previamente pelo cliente ou correspondente ao limite superior de detecção);*
- Efectuar o deslocamento do alvo até à distância máxima de ensaio (nível mínimo) correspondente ao zero observado na unidade de leitura;*
- Na posição estabelecida em d. efectuar o zero da MMC 3D no eixo em que se pretende realizar a medição (vertical, OZ, ou horizontal, OY);*
- Deslocar o alvo para o primeiro dos patamares de ensaio considerados em c. e anotar a indicação obtida com o equipamento a calibrar;*

- g. *Repetir a operação indicada em f. para os restantes patamares de ensaio no sentido ascendente e descendente;*
- h. *Repetir duas vezes o procedimento descrito de d. a g.;*
- i. *Efectuar ensaio de repetibilidade num patamar de ensaio a 50 % do intervalo de medição definido em c., promovendo em cada uma das cinco repetições, o deslocamento prévio do alvo até à distância máxima de ensaio (nível mínimo) correspondente ao zero observado na unidade de leitura e efectuar o zero da MMC 3D no eixo em que se pretende realizar a medição (vertical, OZ, ou horizontal, OY).*

#### **4.7 - Determinação dos resultados e da incerteza de medição**

- a. *Para cada patamar de ensaio calcular:*
  - *o valor médio das indicações obtidas no equipamento a calibrar.*
- b. *Exprimir a repetibilidade dos resultados da calibração como a máxima dispersão dos valores medidos no ensaio de repetibilidade.*
- c. *Determinar a incerteza de medição expandida para um intervalo de confiança de 95% de acordo com [1-3].*

#### **4.8 - Certificado de calibração**

Preencher o certificado de calibração de acordo com [4] referindo:

- *a identificação do medidor de nível a calibrar;*
- *a identificação do equipamento de referência utilizado;*
- *a temperatura e a humidade relativa ambientais;*
- *os valores que compõem o quadro de resultados (valores de referência e valores médios das indicações obtidas no medidor de nível a calibrar);*
- *a repetibilidade do ensaio de calibração;*
- *a incerteza de medição expandida [1-3] para um intervalo de confiança de 95 %.*

## **5 - DOCUMENTOS DE REFERÊNCIA**

---

- [1] *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM)*, Genève (Suíça): International Organization for Standardization (ISO), 1995.
- [2] *Guia para a Expressão da Incerteza de Medição nos Laboratórios de Calibração*, Caparica (Portugal): Instituto Português da Qualidade (IPQ), 1996.
- [3] *Avaliação da Incerteza Associada à Calibração de Equipamentos de Medição de Comprimento por Comparação Directa*, Relatório LNEC 274/01, Lisboa (Portugal): Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), 2001.
- [4] *Vocabulário Internacional de Metrologia (VIM)*, 3ª Edição, Caparica (Portugal): Instituto Português da Qualidade (IPQ), 2008.

RESERVADO

## **ANEXO 1 – Modelo matemático e componentes da avaliação de incertezas**

A calibração de equipamentos de medição dimensional visa a identificação e quantificação de desvios de calibração,  $\delta l_i$ , dados pelas diferenças entre os valores lidos (ou valores nominais, no caso de padrões que materializam uma grandeza dimensional),  $l_i$ , e os valores convencionais ou valores de referência,  $l_{s,i}$ , traduzindo-se esse modelo matemático na seguinte expressão:

$$\delta l_i = l_i - l_{s,i}. \quad (A1)$$

Os valores observados estão sujeitos ao efeito de dilatação térmica devido à variação de temperatura que habitualmente ocorre durante o processo de calibração, pelo que o modelo matemático anterior deverá ser complementado com a contribuição associada à correcção devido à diferença da temperatura dos equipamentos relativamente à temperatura de referência de 20 °C:

$$\delta l = l(1 + \alpha \cdot \delta\theta) - l_s(1 + \alpha_s \cdot \delta\theta_s), \quad (A2)$$

em que  $\delta\theta = (\theta - \theta_{ref}) = (\theta - 20^\circ \text{C})$  e  $\delta\theta_s = (\theta_s - \theta_{ref}) = (\theta_s - 20^\circ \text{C})$ .

A expressão (A2) pode ser reformulada da seguinte forma:

$$l = \frac{l_s(1 + \alpha_s \cdot \delta\theta_s) + \delta l}{(1 + \alpha \cdot \delta\theta)}, \quad (A3)$$

$$l = [l_s(1 + \alpha_s \cdot \delta\theta_s) + \delta l] \cdot \left[ \frac{1}{1 + \alpha \cdot \delta\theta} \right]. \quad (A4)$$

Considerando que o segundo termo do segundo membro é uma função do tipo  $(1 \pm x)^n$ , pode-se substituir esse termo pela seu desenvolvimento em série de Taylor (no caso, de terceira ordem), o qual possui a seguinte expressão genérica:

$$(1 \pm x)^n = 1 \pm n \cdot x + \frac{n(n-1)}{2!} \cdot x^2 \pm \frac{n(n-1)(n-2)}{3!} \cdot x^3 + R_3, \quad (A5)$$

onde  $R_3$  representa o termo residual de terceira ordem.

Aplicando (A5) ao segundo termo do segundo membro de (A4) desenvolvido na sua primeira ordem vem

$$(1 + \alpha \cdot \delta\theta)^{-1} = 1 - \alpha \cdot \delta\theta + R_1. \quad (A6)$$

Usando esta aproximação em (A4) resulta

$$l \approx [l_s(1 + \alpha_s \cdot \delta\theta_s) + \delta l] \cdot [1 - \alpha \cdot \delta\theta] \Leftrightarrow$$
$$\Leftrightarrow l \approx l_s + \delta l + l_s \cdot \alpha_s \cdot \delta\theta_s - l_s \cdot \alpha \cdot \delta\theta - l_s \cdot \alpha_s \cdot \delta\theta_s \cdot \alpha \cdot \delta\theta - \delta l \cdot \alpha \cdot \delta\theta. \quad (A7)$$

assumindo que as relações de proporcionalidade seguintes são adequadas tendo em consideração as magnitudes das grandezas em causa,

$$l_s \cdot \alpha_s \cdot \delta\theta_s \cdot \alpha \cdot \delta\theta \ll l_s \cdot \alpha_s \cdot \delta\theta_s, \quad (A8)$$

$$\delta l \cdot \alpha \cdot \delta\theta \ll \delta l. \quad (A9)$$

Aplica-se uma simplificação à expressão (A7) que toma a seguinte forma:

$$l \approx l_s + \delta l + l_s \cdot \alpha_s \cdot \delta\theta_s - l_s \cdot \alpha \cdot \delta\theta \Leftrightarrow \quad (A10)$$

$$\Leftrightarrow l \approx l_s + \delta l + l_s (\alpha_s \delta\theta_s - \alpha \cdot \delta\theta). \quad (A11)$$

O passo final consiste em promover as mudanças de variáveis

$$\Delta\alpha = (\alpha - \alpha_s), \quad (A12)$$

$$\Delta\theta = (\theta - \theta_s), \quad (A13)$$

permitindo obter

$$l_s (\alpha_s \cdot \delta\theta_s - \alpha \cdot \delta\theta) = -l_s (\alpha \cdot \delta\theta - \alpha_s \cdot \delta\theta_s) =$$
$$= -l_s (\alpha \cdot \delta\theta - \alpha_s \cdot \delta\theta + \alpha_s \cdot \delta\theta - \alpha_s \cdot \delta\theta_s) =$$
$$= -l_s (\delta\theta \cdot \Delta\alpha + \alpha_s \cdot \Delta\theta). \quad (A14)$$

e, conseqüentemente,

$$l \approx l_s + \delta l - l_s (\delta\theta \cdot \Delta\alpha + \alpha_s \cdot \Delta\theta). \quad (A15)$$

Esta última expressão constitui o modelo matemático aplicável (de acordo com o GUM [1]) a este tipo de medição, de natureza dimensional, representando uma função das seguintes variáveis:

$$l = f(l_s, \delta l, \alpha_s, \delta\theta, \Delta\alpha, \Delta\theta). \quad (A16)$$

A determinação dos coeficientes de sensibilidade aplicada ao modelo matemático adoptado origina as seguintes parcelas:

$$c_{l_s} = \frac{\partial f}{\partial l_s} = 1 - (\delta\theta \cdot \Delta\alpha + \alpha_s \cdot \Delta\theta) \approx 1$$

$$c_{\delta l} = \frac{\partial f}{\partial(\delta l)} = 1$$

$$c_{\alpha_s} = \frac{\partial f}{\partial\alpha_s} = -l_s \cdot \Delta\theta \approx 0$$

$$c_{\delta\theta} = \frac{\partial f}{\partial(\delta\theta)} = -l_s \cdot \Delta\alpha \approx 0$$

$$c_{\Delta\alpha} = \frac{\partial f}{\partial(\Delta\alpha)} = -l_s \cdot \delta\theta$$

$$c_{\Delta\theta} = \frac{\partial f}{\partial(\Delta\theta)} = -l_s \cdot \alpha_s$$

Segue-se a identificação das fontes de incerteza que podem contribuir para a avaliação da incerteza de medição padrão, apontadas no diagrama que se segue e descritas na Tabela A1.1.

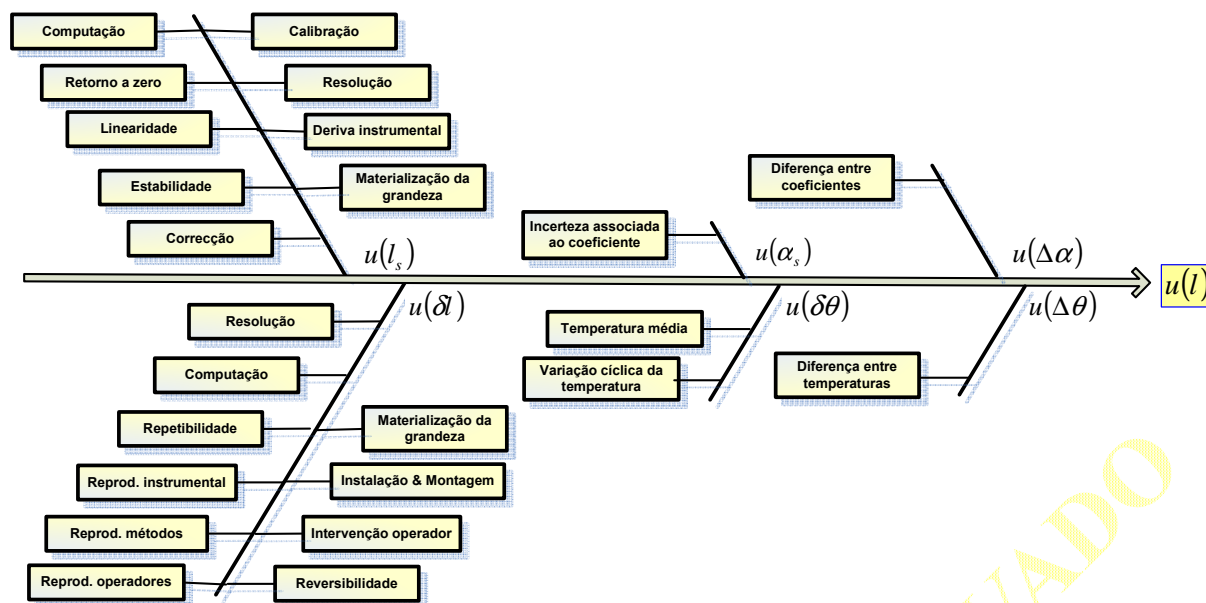


Figura A1.1 – Contribuições para a incerteza de medição do valor lido.

Nota: quando considerado aconselhável ou praticável pela Chefia do Laboratório, as contribuições associadas à calibração, correção dos valores de referência e deriva podem ser agrupadas no parâmetro designado por incerteza instrumental alvo aplicada no critério de confirmação metrológica.



Tabela A1.1 – Descrição de características das componentes de incerteza

| Grandeza de entrada | Contribuição  | PDF adotada | Informação de quantificação                 | Coefficiente de sensibilidade                           | Graus de liberdade * |
|---------------------|---|-------------|---|---|----------------------|
| $l_s$               | Calibração  | Normal      | Certificado de calibração (Tipo B)          | 1   | $n_{cc}$ **          |
|                     | Resolução   | Rectangular | Caracterização metrológica (Tipo B)         | 1   | 50                   |
|                     | Deriva instrumental   | Triangular  | Certificado de calibração (Tipo B)          | 1   | 50                   |
|                     | Materialização da grandeza  | Rectangular | Caracterização metrológica (Tipo B)         | 1   | 50                   |
|                     | Aritmética finita / computação  | Rectangular | Caracterização metrológica (Tipo B)         | 1   | 50                   |
|                     | Retorno a zero  | Rectangular | Caracterização metrológica (Tipo B)         | 1   | 50                   |
|                     | Linearidade   | Rectangular | Caracterização metrológica (Tipo B)         | 1   | 50                   |
|                     | Estabilidade  | Rectangular | Caracterização metrológica (Tipo B)         | 1   | 50                   |
|                     | Correcções dos valores de referência  | Rectangular | Certificado calibração - regressão (Tipo B) | 1   | 50                   |
| $\delta l$          | Resolução do equipamento a calibrar   | Rectangular | Caracterização metrológica (Tipo B)         | 1   | 50                   |
|                     | Aritmética finita / computação  | Rectangular | Caracterização metrológica (Tipo B)         | 1   | 50                   |
|                     | Repetibilidade  | Normal      | Dados experimentais (Tipo A)                | 1   | $(n - 1)$ ***        |
|                     | Reprodutibilidade (instrumental)  | Normal      | Dados experimentais (Tipo B)                | 1   | $n_{pm}$             |
|                     | Reprodutibilidade (métodos)   | Normal      | Dados experimentais (Tipo B)                | 1   | $n_{pm}$             |
|                     | Reprodutibilidade (operadores)  | Normal      | Dados experimentais (Tipo B)                | 1   | $n_{po}$             |
|                     | Materialização da grandeza  | Rectangular | Caracterização metrológica (Tipo B)         | 1   | 50                   |
|                     | Instalação e montagem   | Rectangular | Caracterização metrológica (Tipo B)         | 1   | 50                   |
|                     | Intervenção do operador   | Rectangular | Caracterização metrológica (Tipo B)         | 1   | 50                   |
|                     | Reversibilidade   | Rectangular | Caracterização metrológica (Tipo B)         | 1   | 50                   |
| $\alpha_s$          | Valor nominal do coeficiente linear de expansão térmica do equipamento de referência        | Rectangular | Bibliografia de referência (Tipo B)         | $- 0,1 l_s \text{ m}^\circ\text{C}$                     | 50                   |
| $\delta\theta$      | Diferença média da temperatura do eq. a calibrar relativamente à temperatura de referência. | Rectangular | Dados experimentais (Tipo B)                | $- 5 \cdot 10^{-6} l_s \text{ m}^\circ\text{C}^{-1}$    | 50                   |
|                     | Varição cíclica da temperatura no ambiente laboratorial                                     | Arcoseno    | Dados experimentais (Tipo B)                | $- 5 \cdot 10^{-6} l_s \text{ m}^\circ\text{C}^{-1}$    | 50                   |
| $\Delta\alpha$      | Diferença entre coeficientes de expansão térmica (equipamentos a calibrar e de referência). | Rectangular | Bibliografia de referência (Tipo B)         | $- 0,5 l_s \text{ m}^\circ\text{C}$                     | 50                   |
| $\Delta\theta$      | Diferença de temperatura entre equip.s a calibrar e de referência.                          | Rectangular | Dados experimentais (Tipo B)                | $- 1,15 \cdot 10^{-5} l_s \text{ m}^\circ\text{C}^{-1}$ | 50                   |

\* Os graus de liberdade indicados são aqueles geralmente adoptados, podendo ser modificados quando justificados pelas condições específicas de execução das calibrações.

\*\* Graus de liberdade expressos no certificado de calibração

\*\*\*  $n$  representa a dimensão da amostra experimental utilizada na determinação da repetibilidade (estimada com base no desvio-padrão experimental da média).



