



LABORATÓRIO NACIONAL  
DE ENGENHARIA CIVIL

CENTRO DE INSTRUMENTAÇÃO CIENTÍFICA  
Núcleo de Qualidade Metrológica

Proc. 1104/11/16133

## **A CADEIA DE RASTREABILIDADE HIGROMÉTRICA DO LABORATÓRIO CENTRAL DE APOIO METROLÓGICO DO LNEC**

Estudo realizado no âmbito do Projecto de Investigação  
"Reforço das Capacidades Metrológicas nos Domínios das  
Grandezas Comprimento, Massa, Pressão e Temperatura".

Lisboa • Março de 2009

**I&D** INSTRUMENTAÇÃO CIENTÍFICA

**RELATÓRIO 70/2009 – NQM**



**A Cadeia de Rastreabilidade Higrométrica do  
Laboratório Central de Apoio Metrológico do LNEC**

**Resumo**

Este relatório descreve a cadeia de rastreabilidade do Laboratório Central de Apoio Metrológico do LNEC (LCAM/LNEC) associada à actividade laboratorial em Higrometria. O presente documento possui uma breve referência aos principais conceitos metrológicos aplicáveis neste contexto, ao que se segue a descrição dos padrões de medição e da propagação das incertezas de medição na cadeia de rastreabilidade higrométrica.

**The Hygrometric Traceability Chain of the LNEC's  
Metrological Support Central Laboratory**

**Abstract**

This report describes the LNEC's Metrological Support Central Laboratory (LCAM/LNEC) traceability chain related with its hygrometric laboratorial activity. The present document mentions some of the main metrological concepts applied in this context and describes the measuring standards and the measurement uncertainties propagation in the hygrometric traceability chain.

**La Chaîne de Traçabilité Hygrométrique du  
Laboratoire Central de Soutien Métrologique du LNEC**

**Résumé**

Ce rapport décrit la chaîne de traçabilité du Laboratoire Central de Soutien Métrologique du LNEC (LCAM/LNEC) associée à l'activité hygrométrique de laboratoire. Le présent document fait une brève référence aux concepts métrologiques appliqués dans ce contexte et décrit les étalons de mesure et la propagation des incertitudes de mesure dans la chaîne de traçabilité hygrométrique.



## Índice de Matérias

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2 MEDIÇÃO, RASTREABILIDADE E CALIBRAÇÃO .....</b>	<b>3</b>
<b>3 OS PADRÕES DE MEDIÇÃO DO LCAM/LNEC .....</b>	<b>7</b>
<b>3.1 Introdução .....</b>	<b>7</b>
<b>3.2 Padrão primário.....</b>	<b>8</b>
3.2.1 Introdução .....	8
3.2.2 Incerteza de medição associada às curvas de calibração de termómetros de resistência e de transdutores de pressão .....	9
3.2.3 Critérios de aceitação da calibração do gerador de humidade .....	17
3.2.4 Incerteza de medição das grandezas humidade relativa e temperatura de ponto-de-orvalho.....	18
3.2.5 Incerteza de medição associada ao ensaio de calibração de um instrumento de medição termohigrométrico .....	20
<b>3.3 Padrão de transferência .....</b>	<b>27</b>
<b>3.4 Padrões de trabalho .....</b>	<b>29</b>
<b>4 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>31</b>
<b>5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>33</b>



## 1 INTRODUÇÃO

A medição de grandezas obtida com recurso à instrumentação científica constitui uma actividade de natureza transversal, aplicada aos diferentes domínios da Ciência.

A sua aplicação depende de factores tão diversificados quanto a natureza dos processos naturais envolvidos que pretende caracterizar, nomeadamente, o próprio fenómeno observável e a sua realização prática, as características metrológicas da instrumentação utilizada, o método adoptado, as condições de influência, a intervenção humana, entre outras. A conjugação destes factores, possuindo componentes de natureza aleatória, é traduzida na impossibilidade de se conhecer, com exactidão, o resultado da medição de uma grandeza.

O enquadramento probabilístico, internacionalmente aceite pelos metrologistas, impõe que a expressão do resultado da medição seja constituído pela indicação da estimativa da grandeza mensurável e da incerteza de medição associada, o que, de acordo com uma interpretação dentro dos pressupostos da garantia da Qualidade, implica a necessidade de assegurar que a instrumentação científica produz, em cada momento, as melhores estimativas das mensurandas e que as suas incertezas de medição são devidamente conhecidas e adequadas às aplicações em vista.

Sabendo-se que o comportamento da instrumentação, no que se refere a algumas das suas principais características metrológicas, exhibe ao longo do tempo um comportamento dinâmico de carácter aleatório, sendo necessário proceder a uma reavaliação periódica do seu nível de exactidão de modo a se conhecer e corrigir os seus desvios de natureza sistemática e avaliar a evolução da incerteza de medição. Este processo, repetido com periodicidades estabelecidas em recomendações, é designado por calibração (no caso de instrumentação de medição) ou de ensaio metrológico (no caso de padrões e equipamento utilizado para estabelecer a medição em condições de referência).

Os processos de calibração e ensaio metrológico visam efectuar uma comparação entre padrões e equipamentos, constituindo pressupostos cruciais para que essa comparação seja válida: que o equipamento padrão possua um nível de exactidão superior ao equipamento que é sujeito à calibração; e que o primeiro possua **rastreabilidade** aos padrões primários das grandezas fundamentais (no âmbito do Sistema Internacional) transmitindo essa propriedade ao equipamento calibrado.

No âmbito do processo “Reforço das Capacidades Metrológicas nos Domínios das Grandezas Comprimento, Massa, Pressão e Temperatura”, o Núcleo de Qualidade Metrológica (NQM) do Centro de Instrumentação Científica tem procurado promover o desenvolvimento de cadeias de rastreabilidade adequadas à natureza da actividade experimental desenvolvida pelo Laboratório Central de Apoio Metrológico (LCAM/LNEC).

Este laboratório, acreditado pelo Instituto Português da Acreditação, cumpre um conjunto de requisitos expressos na norma de referência NP EN ISO/IEC 17025 [1], entre os quais se destacam aqueles que dizem respeito à necessidade de evidenciar a qualidade dos seus resultados (no caso, relacionados com a actividade de calibração e de ensaio metrológico). Essa evidência é traduzida, entre outros aspectos, na rastreabilidade das suas medições.

Sendo a medição da humidade uma das actividades inseridas no âmbito da acreditação do laboratório, o presente relatório cumpre a dupla função de, em primeiro lugar, explicitar a estrutura da cadeia de rastreabilidade higrométrica do LCAM/LNEC e, em segundo lugar, constituir um elemento auxiliar do sistema de gestão do laboratório visando a evidência do cumprimento dos requisitos normativos relacionados com esta matéria nas auditorias a que o mesmo é regularmente interveniente.

## 2 MEDIÇÃO, RASTREABILIDADE E CALIBRAÇÃO

A actividade experimental desenvolvida no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), no âmbito da investigação científica e desenvolvimento tecnológico, tem como um dos suportes fundamentais a realização de observações de grandezas mensuráveis usando instrumentação científica, visando converter em informação quantitativa as propriedades qualitativas de objectos ou fenómenos observáveis. Esta actividade deve ser concretizada de acordo com um conjunto de preceitos estabelecidos numa base universalista (com recurso a um sistema coerente de grandezas mensuráveis e de unidades de medida) sustentada no Sistema Internacional (SI).

O processo que traduz essa conversão da natureza da informação é designado por “medição”, sendo definido no Vocabulário Internacional de Metrologia (VIM) [2] como o “processo experimental para obter um ou mais valores razoavelmente atribuíveis a uma grandeza”.

O meio que possibilita a concretização das observações é a instrumentação científica, a qual possui, necessariamente, imperfeições que determinam efeitos de natureza sistemática e de natureza aleatória que perturbam os resultados pretendidos, i.e., os resultados da medição. Esta circunstância impede que seja possível obter o conhecimento do valor verdadeiro de uma grandeza mensurável a partir da realização de uma medição. Estes efeitos são designados habitualmente por “fontes de incerteza”, cuja origem é atribuída a factores tais como [3]:

- a definição incompleta da mensuranda;
- a realização imperfeita da definição da mensuranda;
- a não-representatividade da amostragem da população em observação;
- o conhecimento inadequado dos efeitos produzidos pelas condições ambientais ou a medição imperfeita desses efeitos;
- os desvios sistemáticos associados à observação humana de instrumentação analógica;
- a resolução finita e discriminação associada a limiares de mobilidade;
- os valores inexactos de padrões de medição e de materiais de referência;

- os valores inexactos de constantes e outros parâmetros obtidos a partir de fontes externas utilizados em algoritmos de redução de dados;
- as aproximações e os pressupostos incorporados no procedimento e no método de medição;
- a variação observável na repetição de medições efectuadas em condições aparentemente idênticas.

Acresce a este conjunto de factores de influência o facto de se verificar que o comportamento das características metrológicas da instrumentação científica, observado ao longo do tempo, não permanece num estado inalterado, revelando um comportamento designado por “deriva de longo prazo”.

Este comportamento de natureza estocástica constitui um forte argumento para que se promova uma recolha de informação, com uma periodicidade adequada, de modo a que seja possível estabelecer alguma previsibilidade no que se refere ao estado metrológico da instrumentação em cada momento garantindo a sua adequação face ao uso pretendido, sendo este um requisito compreensível num enquadramento da qualidade da medição.

Esta conjugação de factores e requisitos torna imprescindível a existência de “referências” metrológicas (padrões de referência) que permitam, mediante uma comparação, estabelecer o nível de exactidão da instrumentação. Entende-se que um padrão de referência é “um padrão concebido para a calibração de outros padrões de grandezas da mesma natureza numa dada organização ou num dado local” [2].

Esta definição indica explicitamente o processo subjacente à comparação, i.e., a *calibração*. A sua definição é a seguinte: “operação que, em condições especificadas, num primeiro passo, estabelece a relação entre os valores da grandeza com incertezas de medição provenientes de padrões e as indicações correspondentes com incertezas de medição associadas e, num segundo passo, usa esta informação para estabelecer uma relação para obter o resultado de medição de uma indicação” [2].

Esta operação (de calibração) estabelece uma relação entre o instrumento de medição ou medida materializada com o seu padrão de referência directo. Contudo, esta não garante só por si a qualidade da medição. Torna-se necessário estabelecer uma *hierarquia de*

*calibração*, ou seja “uma sequência de calibrações de uma referência determinada até ao sistema de medição final em que o resultado de cada calibração depende da calibração prévia” [2].

Para que se garanta a qualidade das medições produzidas por um instrumento de medição é necessário que este se encontre incorporado numa hierarquia de calibração cujo topo é ocupado por um “padrão primário”, dotando assim, o resultado de cada medição de uma propriedade dita de “rastreadibilidade” no contexto do Sistema Internacional de Grandezas e Unidades.

A *rastreadibilidade metrológica* é definida, então, como a “propriedade de um resultado de medição através da qual o resultado pode ser relacionado a uma referência por intermédio de uma cadeia ininterrupta e documentada de calibrações, cada uma contribuindo para a incerteza de medição” [2].

Assim se constitui uma *cadeia de rastreadibilidade*, definida como a “sequência de padrões e calibrações que é usada para relacionar um resultado de medição e uma referência” [2]. Esta sequência que se estabelece entre o padrão primário e o instrumento que promove a medição final envolve, frequentemente, vários passos intermédios, existindo designações distintas para os padrões de medição que se distribuem na mesma. Em seguida, apresentam-se os principais termos e respectivas definições de acordo com o VIM [2]:

Padrão primário	Padrão estabelecido através de um procedimento de medição primário ou criado como artefacto escolhido por convenção.
Padrão secundário	Padrão estabelecido por intermédio de uma calibração com um padrão primário para uma grandeza da mesma natureza.
Padrão de referência	Padrão concebido para a calibração de outros padrões de grandezas da mesma natureza numa dada organização ou num dado local.
Padrão de trabalho	Padrão que é usado correntemente para calibrar ou verificar instrumentos de medição ou sistemas de medição.

As relações estabelecidas sucessivamente pressupõem que o padrão que serve de referência em cada comparação possui um nível de exactidão declaradamente superior ao do instrumento de medição ou do padrão que se segue.

Na cadeia de rastreabilidade são encontradas duas linhas de transferência de informação essenciais para se assegurar a qualidade da medição: a transferência de informação relativa à rastreabilidade, referenciando cada passo intermédio da cadeia a um padrão primário da grandeza mensurável; e a transferência de informação relativa à incerteza de medição, cuja quantificação final (associada à medição) resulta de um processo cumulativo associado às transferências que ocorrem em cada passo intermédio da cadeia de rastreabilidade.

As cadeias de rastreabilidade possuem, no seu topo, um padrão primário, o qual admite um valor consensual decorrente da aplicação de métodos específicos devido à sua natureza (padrões de máximo nível de exactidão), nomeadamente, comparações interlaboratoriais por pares de padrões equivalentes (*round robin*). Nos restantes casos, deve ser explícita a relação estabelecida entre os diversos padrões, visando assegurar o cumprimento do requisito normativo de rastreabilidade garantindo, dessa forma, um princípio fundamental da qualidade que é o da comparabilidade dos resultados de medições.

No contexto específico deste documento, é explicitada a rastreabilidade da instrumentação científica, calibrada ou sujeita a ensaios metrológicos, aplicada na medição higrométrica no âmbito da acreditação do LCAM/LNEC.

### 3 OS PADRÕES DE MEDIÇÃO DO LCAM/LNEC

#### 3.1 Introdução

A actividade higrométrica desenvolvida pelo LCAM/LNEC tem por objectivo a calibração e o ensaio metrológico de instrumentação dedicada à medição de grandezas como a humidade relativa e a temperatura de ponto-de-orvalho, que exprimem a quantidade de vapor de água presente numa mistura gasosa (regra geral, o ar atmosférico) relativamente ao estado de saturação.

O conjunto diversificado de padrões de medição envolvido neste contexto é constituído pelos seguintes equipamentos e instrumentos de medição:

- padrão primário<sup>1</sup> – gerador de humidade (método das duas pressões);
- padrão de transferência<sup>2</sup> – higrómetro de espelho;
- padrões de trabalho – termohigrómetros e termohigrógrafos.

A figura 1 representa esquematicamente a cadeia de rastreabilidade higrométrica do LCAM/LNEC, composta pelos padrões de medição acima mencionados.

Esta hierarquia assegura a rastreabilidade aos padrões primários das grandezas de entrada (temperatura e pressão) do padrão higrométrico primário do laboratório. O segundo aspecto relevante que é necessário evidenciar consiste na propagação da incerteza de medição das grandezas higrométricas de interesse para as diferentes posições hierárquicas da cadeia de rastreabilidade representada na figura 1.

Os resultados obtidos, que constam das secções seguintes, traduzem a propagação da incerteza de medição num contexto de caracterização das melhores capacidades do laboratório. Os valores obtidos servem, adicionalmente, para a avaliação da adequação dos equipamentos e instrumentos de medição higrométricos do LCAM/LNEC no desempenho da sua função enquanto padrões de medição de referência, transferência ou trabalho.

---

<sup>1</sup> Este equipamento pode ser designado por padrão primário em virtude de, no contexto da grandeza humidade relativa, estabelecer um procedimento primário de medição. Com efeito, a sua rastreabilidade é estabelecida superiormente em cadeias de medição das grandezas temperatura e pressão.

<sup>2</sup> No presente caso, adoptou-se a designação de “padrão de transferência” visando identificar um tipo de padrão de trabalho que, na presente cadeia de rastreabilidade, desempenha uma função específica de padrão de referência.

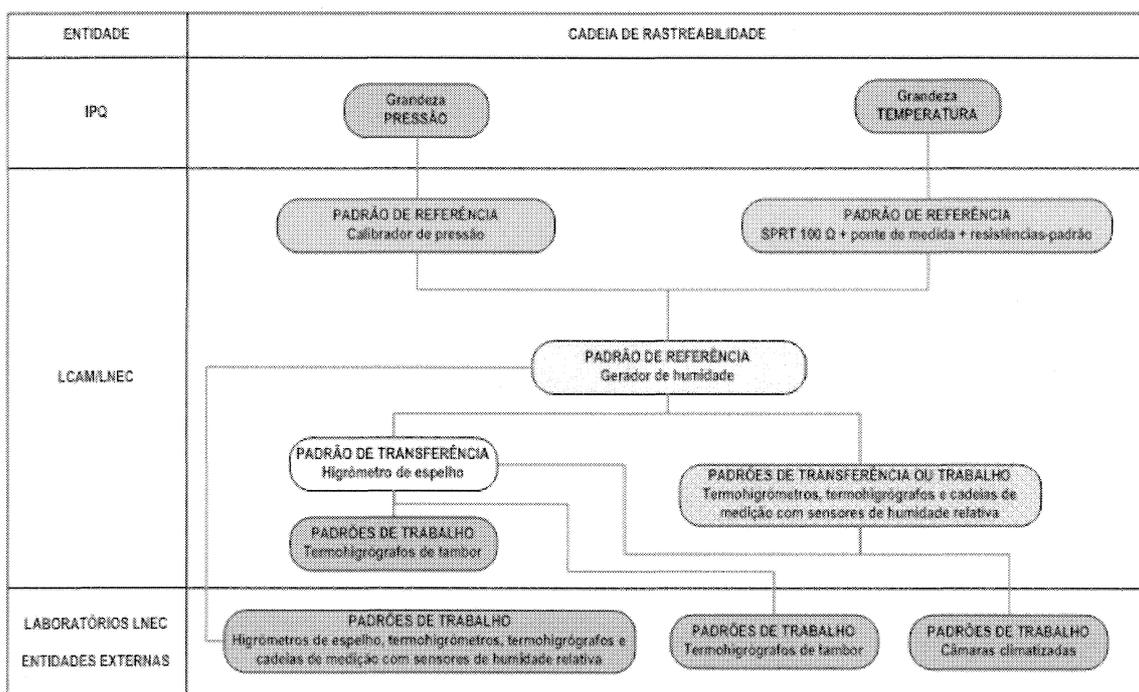


Figura 1: Cadeia de rastreabilidade higrométrica do LCAM/LNEC.

## 3.2 Padrão primário

### 3.2.1 Introdução

Atendendo ao princípio e ao método de medição associados ao padrão de referência higrométrico do LCAM/LNEC (descritos de forma pormenorizada em [4]), a rastreabilidade metrológica deste equipamento decorre da calibração das cadeias de medição que incorporam transdutores de pressão e termómetros de resistência que permitem obter, por via indirecta, as estimativas das mensurandas de interesse: humidade relativa e temperatura de ponto-de-orvalho.

No contexto do Sistema Português da Qualidade, a rastreabilidade dos padrões de referência do LCAM/LNEC para as grandezas pressão e temperatura é assegurada por entidades externas ao LNEC que garantem a ligação aos respectivos padrões nacionais.

O estudo de avaliação das incertezas de medição associadas à utilização do gerador de humidade, como padrão de referência da cadeia de rastreabilidade higrométrica, engloba quatro etapas consecutivas:

- a determinação da incerteza de medição das grandezas pressão e temperatura, obtidas indirectamente mediante as curvas de calibração associadas, respectivamente, aos transdutores de pressão e aos termómetros de resistência – *vide* secção 3.2.2;
- o estabelecimento de critérios de aceitação da calibração dos instrumentos de medição supracitados – *vide* secção 3.2.3;
- a determinação da incerteza de medição associada à calibração do gerador de humidade no que respeita às grandezas humidade relativa e temperatura de ponto-de-orvalho – *vide* secção 3.2.4;
- a determinação da incerteza de medição associada ao ensaio de calibração de um instrumento de medição higrométrico utilizando o gerador de humidade como padrão de referência – *vide* secção 3.2.5.

### **3.2.2 Incerteza de medição associada às curvas de calibração de termómetros de resistência e de transdutores de pressão**

Por definição do fabricante [5], as curvas de calibração associadas aos termómetros de resistência ou aos transdutores de pressão do gerador de humidade possuem a seguinte expressão

$$y = lin \cdot x^2 + span \cdot x + zero , \quad (1)$$

onde  $y$  corresponde à mensuranda de interesse (temperatura ou pressão absoluta),  $x$  é a contagem analógica-digital (adiante designada por *contagem AD*) associada ao instrumento de medição a calibrar e os restantes elementos são parâmetros cuja quantificação é determinada por uma aplicação computacional, embebida no gerador de humidade, fazendo uso dos dados adquiridos no ensaio de calibração.

Tratando-se de um modelo matemático não-linear do tipo quadrático, a obtenção das estimativas dos parâmetros resulta do estabelecimento de três patamares de ensaio no decurso da calibração, nos quais se tomam valores de temperatura ou pressão absoluta ( $t_1, t_2, t_3$  ou  $p_1, p_2, p_3$ , consoante aplicável) indicados pelos padrões de referência (termómetros de resistência de platina e ponte de medida ou calibrador de pressão, consoante aplicável) e as respectivas contagens AD ( $x_1, x_2, x_3$ ) das cadeias de medição do gerador, conforme representado na figura 2.

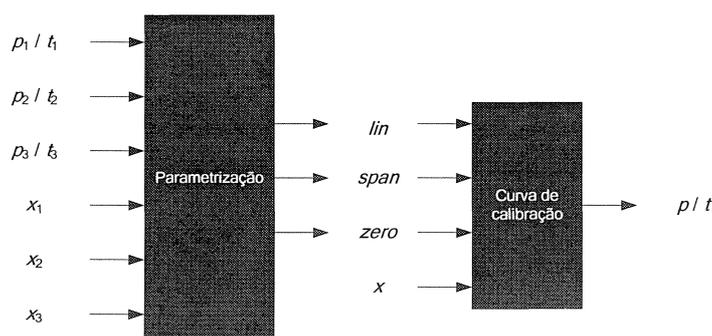


Figura 2: Diagrama das grandezas envolvidas na determinação das curvas de calibração.

No que respeita às temperaturas de referência, é possível identificar em cada medição efectuada, as seguintes fontes de incerteza de medição:

- a calibração das cadeias constituídas pelos termómetros de resistência de platina e ponte de medida utilizados;
- a estabilidade e uniformidade do meio com regulação térmica;
- a estabilidade a longo prazo;
- a resolução de cada cadeia de medição associada ao termómetro de resistência do gerador a calibrar.

A tabela 1 resume a formulação probabilística associada a cada fonte de incerteza mencionada anteriormente e indica o valor de incerteza de medição expandida (para um intervalo de confiança de 95 %), calculado segundo o método GUM [3].

Tabela 1: Componentes de incerteza associadas à medição da temperatura de referência.

Componente de incerteza	Fonte de incerteza	FdP*	Estimativa da incerteza	Coefficiente de sensibilidade	Contribuição para a incerteza	Graus de liberdade
	$X_i$		$u(x_i)$	$C_i$	$u_i(y)$	$\nu_i$
$\delta t_{cal}$	Calibração dos padrões	N	$\pm 0,007$ °C	1	$\pm 0,007$ °C	50
$\delta t_{est}$	Estabilidade do meio	R	$\pm 0,008/\sqrt{3}$ °C	1	$\pm 0,005$ °C	50
$\delta t_{uni}$	Uniformidade do meio	R	$\pm 0,010/\sqrt{3}$ °C	1	$\pm 0,006$ °C	50
$\delta t_{est,lp}$	Estabilidade a longo prazo	T	$\pm 0,010/\sqrt{6}$ °C	1	$\pm 0,004$ °C	50
$\delta t_{res}$	Resolução	R	$\pm 0,005/\sqrt{3}$ °C	1	$\pm 0,003$ °C	50

\* Siglas relativas a funções densidade de probabilidade: N – Normal; R – Rectangular/Uniforme; T – Triangular; U – Arco-seno; P – Trapezoidal.

$u(t_i)$	Incerteza de medição padrão:	$\pm 0,011 \text{ } ^\circ\text{C}$
$\nu_{\text{ef}}$	Graus de liberdade efectivos:	157
$k$	Factor de expansão:	2,00
$U_{95\%}(t_i)$	<b>Incerteza de medição expandida (95 %):</b>	<b><math>\pm 0,022 \text{ } ^\circ\text{C}</math></b>

Por sua vez, na medição das pressões absolutas de referência, é possível identificar as seguintes fontes de incerteza de medição:

- a calibração do padrão de referência utilizado;
- a estabilidade observada durante a realização do ensaio;
- a variação da pressão atmosférica;
- a resolução da cadeia de medição associada a cada transdutor de pressão a calibrar.

A informação, de natureza probabilística, relativa às fontes de incerteza referidas consta nas tabelas 2 e 3 associadas às cadeias de medição, respectivamente, do transdutor de baixa pressão (gama de medição compreendida entre 0 bar e 3,4 bar) e do transdutor de alta pressão (gama de medição compreendida entre 3,4 bar e 10,3 bar). Salienta-se que os valores de incerteza de medição expandida (para um intervalo de confiança de 95 %) foram obtidos com base no método GUM [3].

**Tabela 2:** Componentes de incerteza associadas à medição da pressão de referência (transdutor de baixa pressão).

Componente de incerteza	Fonte de incerteza	FdP*	Estimativa da incerteza	Coefficiente de sensibilidade	Contribuição para a incerteza	Graus de liberdade
	$X_i$		$u(x_i)$	$C_i$	$u_i(y)$	$\nu_i$
$\delta p_{\text{cal}}$	Calibração do padrão	N	$\pm 0,4 \text{ mbar}$	1	$\pm 0,4 \text{ mbar}$	50
$\delta p_{\text{est}}$	Estabilidade	R	$\pm 1,0/\sqrt{3} \text{ mbar}$	1	$\pm 0,6 \text{ mbar}$	50
$\delta p_{\text{patm}}$	Variação da pressão atmosférica	R	$\pm 0,5/\sqrt{3} \text{ mbar}$	1	$\pm 0,3 \text{ mbar}$	50
$\delta p_{\text{res}}$	Resolução do transdutor a calibrar	R	$\pm 0,1/\sqrt{3} \text{ mbar}$	1	$\pm 0,03 \text{ mbar}$	50

\* Siglas relativas a funções densidade de probabilidade: N – Normal; R – Rectangular/Uniforme; T – Triangular; U – Arco-seno; P – Trapezoidal.

$u(p_i)$	Incerteza de medição padrão:	$\pm 0,7$ mbar
$\nu_{ef}$	Graus de liberdade efectivos:	73
$k$	Factor de expansão:	2,00
$U_{95\%}(p_i)$	<b>Incerteza de medição expandida (95 %):</b>	<b><math>\pm 1,4</math> mbar</b>

**Tabela 3:** Componentes de incerteza associadas à medição da pressão de referência (transdutor de alta pressão).

Componente de incerteza	Fonte de incerteza	FdP*	Estimativa da incerteza	Coefficiente de sensibilidade	Contribuição para a incerteza	Graus de liberdade
	$X_i$		$u(x_i)$	$C_i$	$u_i(y)$	$\nu_i$
$\delta p_{cal}$	Calibração do padrão	N	$\pm 0,8$ mbar	1	$\pm 0,8$ mbar	50
$\delta p_{est}$	Estabilidade	R	$\pm 1,0/\sqrt{3}$ mbar	1	$\pm 0,6$ mbar	50
$\delta p_{patm}$	Variação da pressão atmosférica	R	$\pm 0,5/\sqrt{3}$ mbar	1	$\pm 0,3$ mbar	50
$\delta p_{res}$	Resolução do transdutor a calibrar	R	$\pm 0,2/\sqrt{3}$ mbar	1	$\pm 0,12$ mbar	50

\* Siglas relativas a funções densidade de probabilidade: N – Normal; R – Rectangular/Unifórm; T – Triangular; U – Arco-seno; P – Trapezoidal.

$u(p_i)$	Incerteza de medição padrão:	$\pm 1,0$ mbar
$\nu_{ef}$	Graus de liberdade efectivos:	91
$k$	Factor de expansão:	2,00
$U_{95\%}(p_i)$	<b>Incerteza de medição expandida (95 %):</b>	<b><math>\pm 2,0</math> mbar</b>

No caso das contagens AD efectuadas quer em simultâneo com a medição das temperaturas ou pressões de referência, quer após a calibração do gerador de humidade, a resolução do contador constitui a componente de incerteza dominante, na ausência de outra informação de natureza metrológica, sendo representada por uma função densidade de probabilidade rectangular, conforme consta na tabela 4.

**Tabela 4:** Componente de incerteza associada à resolução do contador AD.

Componente de incerteza	Fonte de incerteza	FdP*	Estimativa da incerteza	Coefficiente de sensibilidade	Contribuição para a incerteza	Graus de liberdade
	$X_i$		$u(x_i)$	$C_i$	$u_i(y)$	$\nu_i$
$\delta x_i$	Resolução do contador	R	$\pm 0,5/\sqrt{3}$	1	$\pm 0,29$	50

\* Siglas relativas a funções densidade de probabilidade: N – Normal; R – Rectangular/Uniforme; T – Triangular; U – Arco-seno; P – Trapezoidal.

No que se refere ao cálculo dos parâmetros das curvas de calibração, este resulta da execução de programação intrínseca ao gerador de humidade (inacessível ao utilizador). Contudo, existindo soluções analíticas para o presente caso em estudo – resolução de um sistema de equações de três equações com três incógnitas – é considerado relevante validar o processo de cálculo automático realizado, conforme exemplificado nas tabelas 5 e 6, com base em dados experimentais obtidos num ensaio de calibração realizado pelo LCAM/LNEC.

**Tabela 5:** Comparação entre as estimativas dos parâmetros obtidas pela via interna do gerador e pela via analítica (curva de calibração em temperatura).

Parâmetros	Termómetro de resistência no saturador		Termómetro de resistência na câmara de ensaio	
	Via interna	Via analítica	Via interna	Via analítica
<i>lin</i> (°C <sup>-1</sup> )	$2,11 \times 10^{-9}$	$1,88 \times 10^{-9}$	$4,19 \times 10^{-9}$	$3,89 \times 10^{-9}$
<i>span</i>	$9,96 \times 10^{-3}$	$9,96 \times 10^{-3}$	$9,95 \times 10^{-3}$	$9,96 \times 10^{-3}$
<i>zero</i> (°C)	-0,0760	-0,0765	0,198	0,192
<b>Valor máximo da diferença de temperatura obtida entre curvas de calibração</b>				
0,008 °C			0,007 °C	

**Tabela 6:** Comparação entre as estimativas dos parâmetros obtidas pela via interna do gerador e pela via analítica (curva de calibração em pressão).

Parâmetros*	Transdutor de baixa pressão		Transdutor de alta pressão	
	Via interna	Via analítica	Via interna	Via analítica
<i>lin</i> (psia <sup>-1</sup> )	$-1,10 \times 10^{-9}$	$-1,10 \times 10^{-9}$	$6,26 \times 10^{-10}$	$6,74 \times 10^{-10}$
<i>span</i>	$2,04 \times 10^{-3}$	$2,04 \times 10^{-3}$	$6,03 \times 10^{-3}$	$6,03 \times 10^{-3}$
<i>zero</i> (psia)	-0,172	-0,170	0,458	0,468
<b>Valor máximo da diferença de pressão obtida entre curvas de calibração</b>				
0,05 mbar			0,15 mbar	

\* A apresentação de resultados em unidades distintas das do SI (*pound-force per square inch absolute*) resulta do código da aplicação computacional embebido no gerador de humidade, a qual constitui uma “black box” para os utilizadores deste equipamento.

As diferenças expressas nas tabelas anteriores justificam a contabilização de uma componente de incerteza adicional associada ao cálculo da parametrização pela via interna do gerador de humidade. Neste caso, é considerado adequado a adopção da função densidade de probabilidade rectangular cujo limite de variação corresponde ao valor majorado das diferenças obtidas anteriormente, conforme é possível observar nas tabelas 7 a 9.

**Tabela 7:** Componente de incerteza associada ao cálculo da parametrização associada à calibração em temperatura pela via interna do gerador de humidade.

Componente de incerteza	Fonte de incerteza	FdP*	Estimativa da incerteza	Coefficiente de sensibilidade	Contribuição para a incerteza	Graus de liberdade
	$X_i$		$u(x_i)$	$C_i$	$u_i(y)$	$\nu_i$
$\delta t_{\text{cálculo}}$	Parametrização interna	R	$\pm 0,008/\sqrt{3}$ °C	1	$\pm 0,005$ °C	50

**Tabela 8:** Componente de incerteza associada ao cálculo da parametrização associada à calibração em baixa pressão pela via interna do gerador de humidade.

Componente de incerteza	Fonte de incerteza	FdP*	Estimativa da incerteza	Coefficiente de sensibilidade	Contribuição para a incerteza	Graus de liberdade
	$X_i$		$u(x_i)$	$C_i$	$u_i(y)$	$\nu_i$
$\delta p_{\text{cálculo}}$	Parametrização interna	R	$\pm 0,05/\sqrt{3}$ mbar	1	$\pm 0,03$ mbar	50

**Tabela 9:** Componente de incerteza associada ao cálculo da parametrização associada à calibração em alta pressão pela via interna do gerador de humidade.

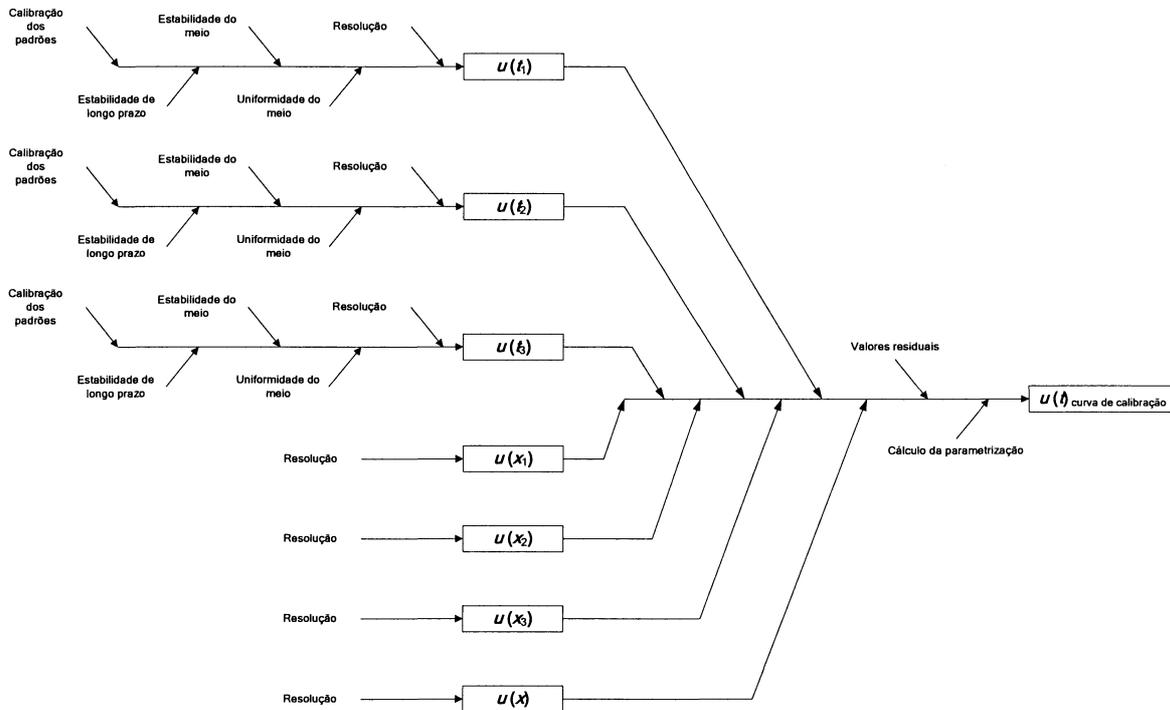
Componente de incerteza	Fonte de incerteza	FdP*	Estimativa da incerteza	Coefficiente de sensibilidade	Contribuição para a incerteza	Graus de liberdade
	$X_i$		$u(x_i)$	$C_i$	$u_i(y)$	$\nu_i$
$\delta p_{\text{cálculo}}$	Parametrização interna	R	$\pm 0,15/\sqrt{3}$ mbar	1	$\pm 0,09$ mbar	50

Para além dos três patamares de ensaio referidos anteriormente, o procedimento de calibração do gerador de humidade [6] (em temperatura ou pressão) inclui a realização de dois patamares adicionais (localizados entre os patamares de referência mencionados)

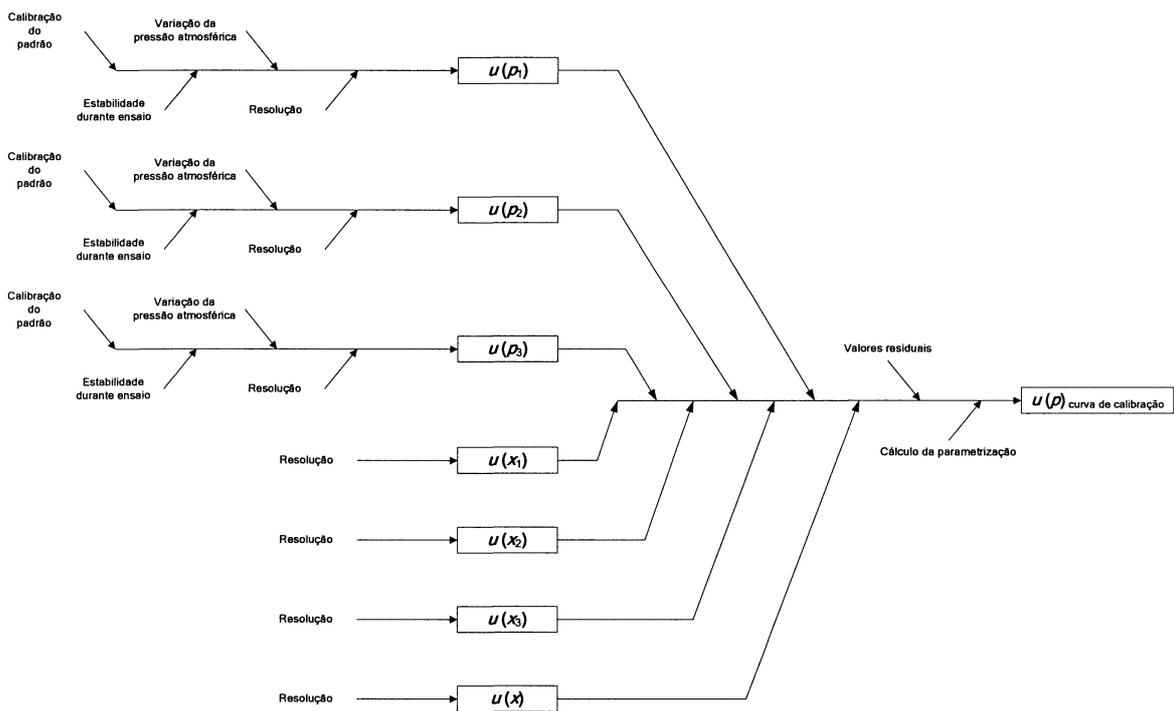
contribuindo, deste modo, para uma melhor quantificação dos resíduos produzidos com a determinação da curva de calibração.

Para a formulação probabilística desta componente de incerteza, é adoptada a função densidade de probabilidade rectangular como representativa da dispersão dos valores residuais. Esta função toma como limite de variação o valor máximo de valor residual determinado no ensaio de calibração das cadeias de medição associadas aos termómetros de resistência ou aos transdutores de pressão.

As figuras 3 e 4 ilustram a propagação das contribuições associadas às diversas componentes de incerteza referidas nesta secção, respectivamente, para a curva de calibração em temperatura e para a curva de calibração em pressão.



**Figura 3:** Diagrama de propagação de incertezas de medição na determinação da curva de calibração em temperatura.



**Figura 4:** Diagrama de propagação de incertezas de medição na determinação da curva de calibração em pressão.

Atendendo à não-linearidade intrínseca ao modelo matemático representativo da curva função de calibração, dado pela expressão (1), o cálculo da incerteza de medição da grandeza de saída (temperatura ou pressão) é efectuado usando o método de Monte Carlo [7], tendo por base a informação probabilística das componentes de incerteza apresentada nesta secção. Os resultados obtidos constam na tabela 10. Na ausência de informação que quantifique a componente de incerteza atribuída aos valores residuais produzidos, os resultados obtidos são interpretados ao abrigo do conceito de melhores incertezas de medição.

**Tabela 10:** Incertezas de medição expandidas associadas às curvas de calibração.

Contagem AD	Incerteza de medição expandida (95 %)		Contagem AD	Incerteza de medição expandida (95 %)	
	Termómetro de resistência no saturador	Termómetro de resistência na câmara de ensaio		Transdutor de baixa pressão	Transdutor de alta pressão
0	± 0,023 °C	± 0,023 °C	7000	± 1,4 mbar	± 2,0 mbar
1000	± 0,019 °C	± 0,019 °C	11000	± 1,1 mbar	± 1,6 mbar
2000	± 0,020 °C	± 0,020 °C	15000	± 1,4 mbar	± 2,0 mbar
3000	± 0,023 °C	± 0,023 °C	19000	± 1,3 mbar	± 1,9 mbar
4000	± 0,023 °C	± 0,023 °C	23000	± 1,1 mbar	± 1,6 mbar
5000	± 0,021 °C	± 0,021 °C	25000	± 1,4 mbar	± 2,0 mbar
6000	± 0,019 °C	± 0,019 °C			
7000	± 0,022 °C	± 0,023 °C			

### 3.2.3 Critérios de aceitação da calibração do gerador de humidade

O processo de aceitação metrológica do gerador de humidade é baseado na informação disponibilizada pelo fabricante do equipamento [5], segundo o qual, o nível de exactidão na medição de humidade relativa corresponde a  $\pm 0,5$  % hr, decorrente da realização da calibração dos instrumentos de medição (termómetros de resistência e transdutores de pressão) que o constituem.

De forma a garantir o valor de exactidão citado, o fabricante impõe o cumprimento de um conjunto de requisitos associados à estabilidade das condições de referência, ao nível de exactidão e à resolução dos padrões de medição utilizados na calibração dos instrumentos de medição acima referidos. Neste contexto, o LCAM/LNEC define a soma quadrática expandida (para um intervalo de confiança de 95 %) desses requisitos como a incerteza instrumental de medição alvo,  $U_{ia}(q)$ , das calibrações realizadas e cujo resultado é exposto na tabela 11.

O critério de aceitação das diferentes calibrações realizadas consiste na verificação que a incerteza de medição associada à curva de calibração, que combina os resultados expostos na tabela 10 com a incerteza de medição associada aos valores residuais produzidos (no que

se designa no LCAM/LNEC por incerteza instrumental de medição,  $U_{im}(q)$ , se encontra contida no intervalo de tolerância apresentado na tabela 11, ou seja,  $U_{im}(q) \subseteq U_{ia}(q)$ .

**Tabela 11:** Requisitos técnicos para a calibração do gerador de humidade do LCAM/LNEC [5].

Grandeza	Temperatura	Pressão	
Gama de medição	0 °C a 70 °C	0 bar a 3,4 bar	3,4 bar a 10,3 bar
Estabilidade do meio	± 0,01 °C	± 0,2 mbar	± 0,7 mbar
Nível de exactidão do padrão de referência	± 0,05 °C	± 1,7 mbar	± 6,9 mbar
Resolução do padrão de referência	± 0,01 °C	± 0,2 mbar	± 0,7 mbar
Incerteza instrumental de medição alvo, $U_{ia}(q)$	± 0,10 °C	± 3,4 mbar	± 13,8 mbar

### 3.2.4 Incerteza de medição das grandezas humidade relativa e temperatura de ponto-de-orvalho

Atendendo à informação de natureza probabilística descrita em 3.2.2, relativa às curvas de calibração dos instrumentos de medição de temperatura e pressão (grandezas de entrada), é necessário proceder à avaliação da incerteza de medição das grandezas de saída higrométricas de interesse no gerador de humidade.

A complexidade e a natureza não-linear dos modelos matemáticos envolvidos na medição indirecta das mensurandas de interesse motivaram a realização de um estudo dedicado [8] intitulado *Avaliação de incertezas do padrão de referência de humidade relativa e temperatura de ponto-de-orvalho do LCAM/LNEC*, o qual descreve a formulação probabilística das grandezas de entrada, os modelos matemáticos envolvidos e o procedimento de cálculo da incerteza de medição baseado no método de Monte Carlo.

A tabela 12 reproduz os resultados obtidos em [8]. Por sua vez, as figuras 5 e 6 constituem diagramas de propagação de incertezas de medição aplicáveis, respectivamente, às medições indirectas das grandezas temperatura de ponto-de-orvalho e humidade relativa.

Tabela 12: Incertezas de medição das estimativas de humidade relativa e temperatura de ponto-de-orvalho.

Condições de referência		Humidade relativa (%)		Temperatura de ponto-de-orvalho (°C)	
Temperatura (°C)	Humidade relativa (%)	Estimativa	Incerteza de medição expandida (95 %)	Estimativa	Incerteza de medição expandida (95 %)
10	30	30,00	± 0,13	*	*
	50	49,94	± 0,18	0,38	± 0,05
	85	84,95	± 0,31	7,95	± 0,05
20	30	29,97	± 0,13	1,92	± 0,06
	50	49,92	± 0,18	9,30	± 0,05
	85	84,94	± 0,30	17,45	± 0,05
	95	94,96	± 0,35	19,24	± 0,05
25	95	94,89	± 0,34	24,08	± 0,05
40	30	29,96	± 0,13	18,89	± 0,06
	50	49,95	± 0,18	27,37	± 0,05
	85	84,92	± 0,30	36,78	± 0,06

\* Ponto não estudado.

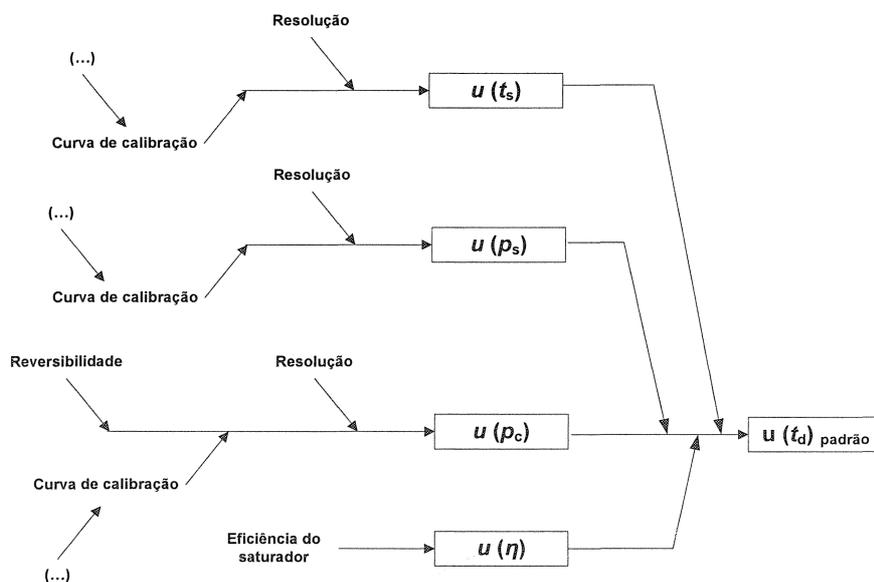


Figura 5: Diagrama de propagação das incertezas de medição associadas à estimativa de temperatura de ponto-de-orvalho.

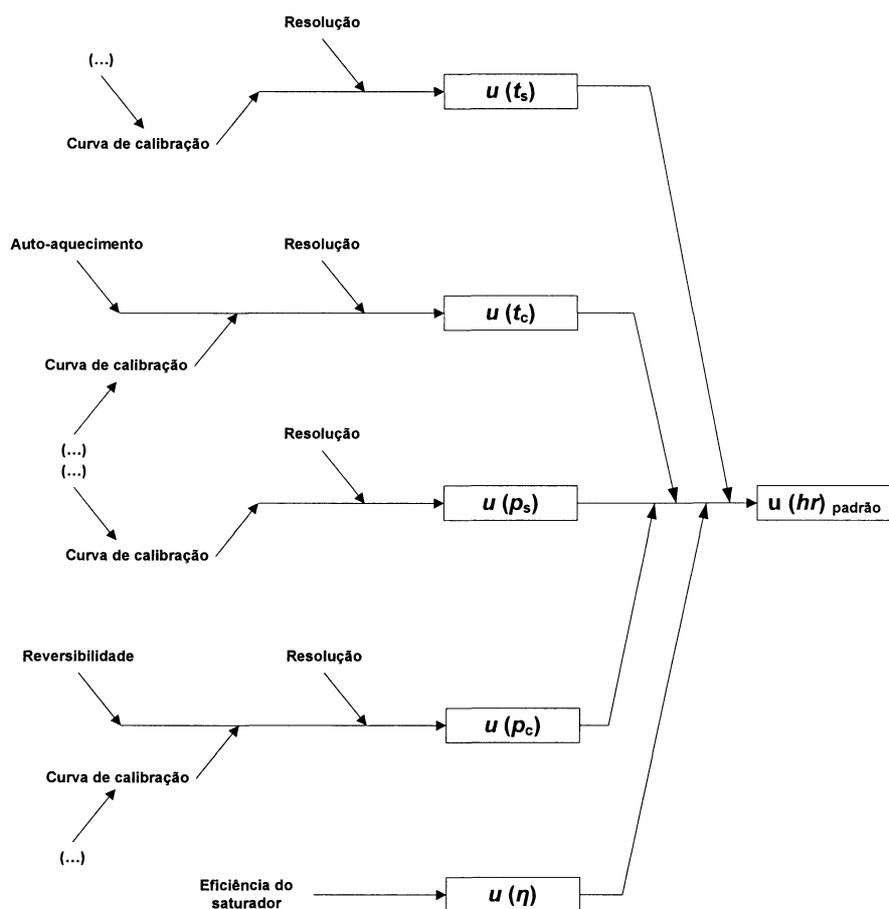


Figura 6: Diagrama de propagação das incertezas de medição associadas à estimativa de humidade relativa.

Face aos resultados obtidos, o LCAM/LNEC adopta como melhores incertezas de medição expandidas associadas ao padrão de referência, os seguintes valores majorados:

- $\pm 0,50 \%$  hr, na escala de humidade relativa;
- $\pm 0,10 \text{ }^\circ\text{C}$ , na escala de temperatura de ponto-de-orvalho.

### 3.2.5 Incerteza de medição associada ao ensaio de calibração de um instrumento de medição termohigrométrico

Na realização de um ensaio de calibração de um instrumento de medição higrométrico com recurso ao gerador de humidade, para além da componente de incerteza associada à calibração deste padrão de referência (cuja avaliação se encontra descrita nas secções anteriores), é possível identificar outras fontes de incerteza com uma influência significativa na qualidade das medições efectuadas nesse ensaio.

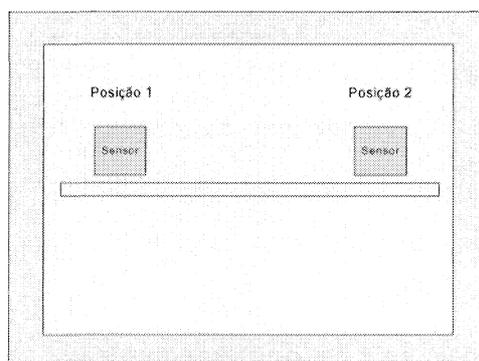
Neste contexto, destaca-se a estabilidade e a uniformidade da câmara de ensaio do gerador, adoptado como meio passivo que importa caracterizar na vertente higrométrica mas, também, na vertente termométrica visto que a calibração da cadeia de medição de temperatura do instrumento de medição a calibrar pode ser efectuada tomando como valores de referência os obtidos usando a cadeia de medição da temperatura incorporada no gerador de humidade. Foram efectuados ensaios experimentais visando quantificar estas componentes de incerteza das grandezas humidade relativa e temperatura.

Ambos os ensaios de estabilidade e uniformidade foram realizados impondo no gerador de humidade um caudal de ar de  $5 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ , sendo estabelecidos patamares de humidade relativa de 30 % hr, 50 % hr e 85 % hr para temperaturas de 10 °C, 20 °C e 40 °C e, ainda, o patamar de 95 % de humidade relativa às temperaturas de 20 °C e 25 °C. Deste modo foram estudadas, na totalidade, 11 condições de referência distintas de humidade relativa e temperatura, consideradas adequadas para promover uma abrangência da gama de medição útil aplicada em ensaios no LCAM/LNEC.

Cada patamar realizado teve uma duração de uma hora visando assegurar as melhores condições de estabilidade e uniformidade após a transição entre patamares consecutivos. No que respeita à aquisição de dados, foi estabelecido um período de amostragem de um minuto.

O ensaio de estabilidade termohigrométrico teve por base os dados experimentais observados provenientes das cadeias de medição do gerador de humidade enquanto que, no caso do ensaio de uniformidade térmica, os dados experimentais resultaram da colocação de quatro termohigrómetros digitais em cada um dos quatro quadrantes do volume da câmara de ensaio. Por sua vez, o ensaio de uniformidade higrométrica foi realizado com recurso a um higrómetro de espelho colocado em duas posições de modo a ser possível determinar a existência de eventuais diferenças nas estimativas de humidade relativa obtidas nos pontos espaciais estudados (*vide* figura 7).

Para efeito de quantificação das componentes de incerteza de interesse foi considerada uma amostragem dos últimos 30 dados experimentais adquiridos num determinado patamar de ensaio, isto é, foram apenas considerados os últimos 30 minutos de cada patamar.



**Figura 7:** Posições do elemento sensorial do higrómetro de espelho no ensaio de uniformidade higrométrica da câmara de ensaio do gerador de humidade.

As componentes de incerteza associadas à estabilidade higrométrica e termométrica possuem uma distribuição de probabilidade que se podem representar por uma função densidade de probabilidade rectangular cujos limites de variação são definidos pelos valores máximo e mínimo registados no período final de 30 minutos do patamar. De forma análoga, as componentes de incerteza associadas à uniformidade higrométrica e termométrica admitem uma representação por uma função de probabilidade rectangular cujo limite de variação é definido pelo valor máximo dos desvios observados nas quatro posições observadas.

As tabelas 13 a 16 enumeram os resultados obtidos mediante a realização dos ensaios experimentais acima descritos.

**Tabela 13:** Componente de incerteza associada à estabilidade higrométrica da câmara de ensaio.

Temperatura	Humidade relativa			
	30 %	50 %	85 %	95 %
10 °C	± 0,01 % hr	± 0,02 % hr	± 0,03 % hr	*
20 °C	± 0,01 % hr	± 0,01 % hr	± 0,02 % hr	± 0,02 % hr
25 °C	*	*	*	± 0,03 % hr
40 °C	± 0,01 % hr	± 0,02 % hr	± 0,03 % hr	*

\* Combinação não observada.

**Tabela 14:** Componente de incerteza associada à estabilidade termométrica da câmara de ensaio.

Temperatura	Humidade relativa			
	30 %	50 %	85 %	95 %
10 °C	± 0,002 °C	± 0,005 °C	± 0,005 °C	*
20 °C	± 0,008 °C	± 0,005 °C	± 0,002 °C	± 0,004 °C
25 °C	*	*	*	± 0,004 °C
40 °C	± 0,003 °C	± 0,008 °C	± 0,003 °C	*

\* Combinação não observada.

**Tabela 15:** Componente de incerteza associada à uniformidade higrométrica da câmara de ensaio.

Temperatura	Humidade relativa			
	30 %	50 %	85 %	95 %
10 °C	± 0,20 % hr	± 0,00 % hr	± 0,20 % hr	*
20 °C	± 0,03 % hr	± 0,03 % hr	*	± 0,03 % hr
25 °C	*	*	*	*
40 °C	± 0,03 % hr	± 0,03 % hr	± 0,20 % hr	*

\* Combinação não observada.

**Tabela 16:** Componente de incerteza associada à uniformidade termométrica da câmara de ensaio.

Temperatura	Humidade relativa			
	30 %	50 %	85 %	95 %
10 °C	± 0,05 °C	± 0,05 °C	± 0,05 °C	*
20 °C	± 0,03 °C	± 0,04 °C	± 0,03 °C	± 0,02 °C
25 °C	*	*	*	± 0,01 °C
40 °C	± 0,06 °C	± 0,07 °C	± 0,04 °C	*

\* Combinação não observada.

O cálculo das melhores incertezas de medição resultou de se admitir que as componentes de incerteza associadas à estabilidade e à uniformidade admitem os seguintes valores de majoração:

- estabilidade associada à medição higrométrica , ± 0,03 % hr;
- estabilidade associada à medição termométrica, ± 0,008 °C;
- uniformidade associada à medição higrométrica, ± 0,20 % hr;
- uniformidade associada à medição termométrica, ± 0,07 °C.

Para além das componentes de incerteza mencionadas é possível identificar outras fontes de incerteza, conforme se encontra ilustrado nos diagramas de propagação de incertezas de medição apresentados nas figuras 8 e 9. A contabilização destas componentes adicionais conduz à estimativa das melhores incertezas de medição relativas ao ensaio de calibração de um instrumento de medição termohigrométrico, respectivamente, na escala de humidade relativa e na escala de temperatura, apresentadas nas tabelas 17 e 18.

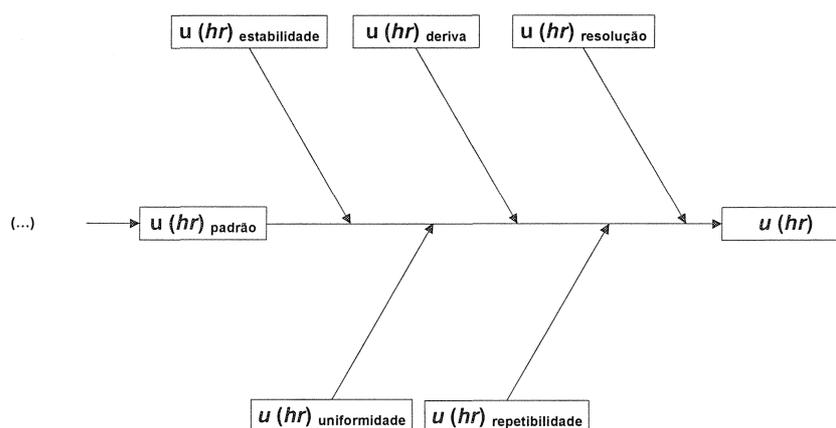


Figura 8: Diagrama de propagação das incertezas de medição associadas à grandeza humidade relativa.

Tabela 17: Melhor incerteza de medição no ensaio de calibração em humidade relativa.

Componente de incerteza	Fonte de incerteza	FdP*	Estimativa da incerteza	Coefficiente de sensibilidade	Contribuição para a incerteza	Graus de liberdade
	$X_i$		$u(x_i)$	$C_i$	$u_i(y)$	$\nu_i$
$\delta hr_{cal}$	Calibração do padrão	N	$\pm 0,25 \% \text{ hr}$	1	$\pm 0,25 \% \text{ hr}$	50
$\delta hr_e$	Estabilidade a longo prazo	T	$\pm 0,20/\sqrt{6} \% \text{ hr}$	1	$\pm 0,08 \% \text{ hr}$	50
$\delta hr_s$	Estabilidade do meio regulado	R	$\pm 0,05/\sqrt{3} \% \text{ hr}$	1	$\pm 0,03 \% \text{ hr}$	50
$\delta hr_u$	Uniformidade do meio regulado	R	$\pm 0,35/\sqrt{3} \% \text{ hr}$	1	$\pm 0,20 \% \text{ hr}$	50
$\delta hr_d$	Deriva	R	$\pm 0,10/\sqrt{3} \% \text{ hr}$	1	$\pm 0,06 \% \text{ hr}$	50
$\delta hr_{res}$	Resolução	R	$\pm 0,05/\sqrt{3} \% \text{ hr}$	1	$\pm 0,03 \% \text{ hr}$	50
$\delta hr_{rep}$	Repetibilidade	R	$\pm 0,03/\sqrt{3} \% \text{ hr}$	1	$\pm 0,02 \% \text{ hr}$	50

\* Siglas relativas a funções densidade de probabilidade: N – Normal; R – Rectangular/Uniforme; T – Triangular; U – Arco-seno; P – Trapezoidal.

$u(hr)$	Incerteza de medição padrão:	$\pm 0,34 \% \text{ hr}$
$\nu_{ef}$	Graus de liberdade efectivos:	118
$k$	Factor de expansão:	2,00
$U_{95\%}(hr)$	Incerteza de medição expandida (95 %):	$\pm 0,68 \% \text{ hr}$

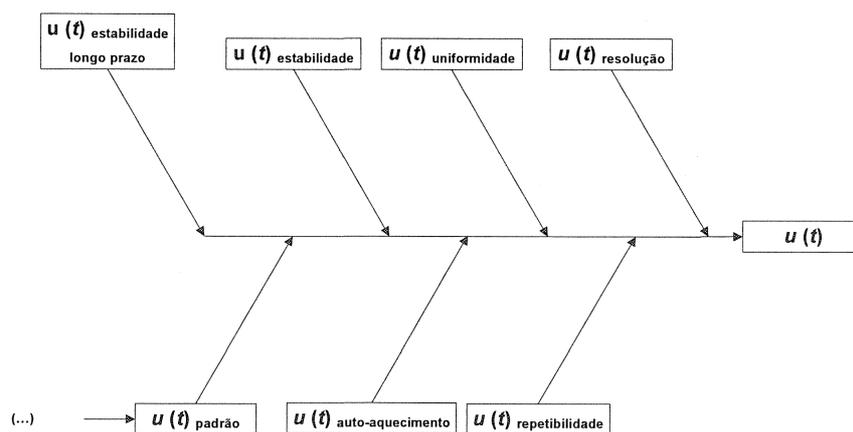


Figura 9: Diagrama de propagação das incertezas de medição associadas à grandeza temperatura.

Tabela 18: Melhor incerteza de medição no ensaio de calibração em temperatura.

Componente de incerteza	Fonte de incerteza	FDP*	Estimativa da incerteza	Coefficiente de sensibilidade	Contribuição para a incerteza	Graus de liberdade
	$X_i$		$u(x_i)$	$C_i$	$u_i(y)$	$\nu_i$
$\delta t_{\text{padrão}}$	Calibração do padrão	N	$\pm 0,025 \text{ °C}$	1	$\pm 0,025 \text{ °C}$	50
$\delta t_{\text{est longo prazo}}$	Estabilidade longo prazo	T	$\pm 0,01/\sqrt{6} \text{ °C}$	1	$\pm 0,004 \text{ °C}$	50
$\delta t_{\text{estabilidade}}$	Estabilidade do meio regulado	R	$\pm 0,014/\sqrt{3} \text{ °C}$	1	$\pm 0,008 \text{ °C}$	50
$\delta t_{\text{uniformidade}}$	Uniformidade do meio regulado	R	$\pm 0,12/\sqrt{3} \text{ °C}$	1	$\pm 0,07 \text{ °C}$	50
$\delta t_{\text{resolução}}$	Resolução	R	$\pm 0,05/\sqrt{3} \text{ °C}$	1	$\pm 0,029 \text{ °C}$	50
$\delta t_{\text{repetibilidade}}$	Repetibilidade	R	$\pm 0,02/\sqrt{3} \text{ °C}$	1	$\pm 0,012 \text{ °C}$	50
$\delta t_{\text{auto-aquecimento}}$	Auto-aquecimento	R	$\pm 0,01/\sqrt{3} \text{ °C}$	1	$\pm 0,006 \text{ °C}$	50

\* Siglas relativas a funções densidade de probabilidade: N – Normal; R – Rectangular/Uniforme; T – Triangular; U – Arco-seno; P – Trapezoidal.

$u(t)$	Incerteza de medição padrão:	$\pm 0,08 \text{ °C}$
$\nu_{\text{ef}}$	Graus de liberdade efectivos:	105
$k$	Factor de expansão:	2,00
$U_{95\%}(t)$	Incerteza de medição expandida (95 %):	$\pm 0,17 \text{ °C}$

No caso específico do ensaio de calibração de higrómetros de espelho [9], o gerador de humidade apenas constitui o padrão de referência higrométrico (a calibração em temperatura recorre a termómetros de referência de platina imersos em banhos com regulação térmica). Considera-se que, nestas condições, a tabela 17 relativa à escala de humidade relativa mantém a sua validade.

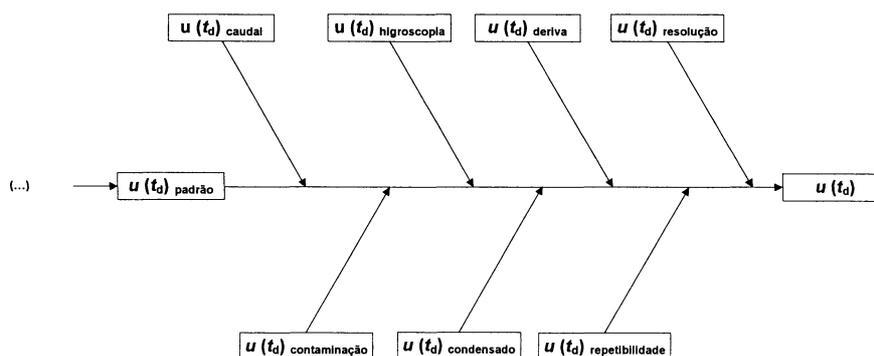
A tabela 19, apresentada em seguida, constitui o balanço das melhores incertezas de medição na escala de temperatura de ponto-de-orvalho. A figura 10 representa o respectivo diagrama de propagação de incertezas de medição associada a este processo.

**Tabela 19:** Melhor incerteza de medição no ensaio de calibração em temperatura de ponto-de-orvalho.

Componente de incerteza	Fonte de incerteza	FdP*	Estimativa da incerteza	Coefficiente de sensibilidade	Contribuição para a incerteza	Graus de liberdade
	$X_i$		$u(x_i)$	$C_i$	$u_i(y)$	$\nu_i$
$\delta t_{d, \text{padrão}}$	Calibração do padrão	N	$\pm 0,05 \text{ }^\circ\text{C}$	1	$\pm 0,05 \text{ }^\circ\text{C}$	50
$\delta t_{d, \text{higro}}$	Materiais higroscópicos	R	$\pm 0,20/\sqrt{3} \text{ }^\circ\text{C}$	1	$\pm 0,12 \text{ }^\circ\text{C}$	50
$\delta t_{d, \text{caudal}}$	Caudal volumétrico do escoamento de ar	R	$\pm 0,10/\sqrt{3} \text{ }^\circ\text{C}$	1	$\pm 0,06 \text{ }^\circ\text{C}$	50
$\delta t_{d, \text{cont}}$	Contaminação	R	$\pm 0,10/\sqrt{3} \text{ }^\circ\text{C}$	1	$\pm 0,06 \text{ }^\circ\text{C}$	50
$\delta t_{d, \text{cond}}$	Natureza do condensado	R	$\pm 0,05/\sqrt{3} \text{ }^\circ\text{C}$	1	$\pm 0,03 \text{ }^\circ\text{C}$	50
$\delta t_{d, \text{der}}$	Deriva	T	$\pm 0,10/\sqrt{6} \text{ }^\circ\text{C}$	1	$\pm 0,04 \text{ }^\circ\text{C}$	50
$\delta t_{d, \text{rep}}$	Repetibilidade	N	$\pm 0,01 \text{ }^\circ\text{C}$	1	$\pm 0,01 \text{ }^\circ\text{C}$	50
$\delta t_{d, \text{res}}$	Resolução	R	$\pm 0,05/\sqrt{3} \text{ }^\circ\text{C}$	1	$\pm 0,03 \text{ }^\circ\text{C}$	50

\* Siglas relativas a funções densidade de probabilidade: N – Normal; R – Rectangular/Uniforme; T – Triangular; U – Arco-seno; P – Trapezoidal.

$u(t_d)$	Incerteza de medição padrão:	$\pm 0,16 \text{ }^\circ\text{C}$
$\nu_{\text{ef}}$	Graus de liberdade efectivos:	159
$k$	Factor de expansão:	2,00
$U_{95\%}(t_d)$	<b>Incerteza de medição expandida (95 %):</b>	<b><math>\pm 0,32 \text{ }^\circ\text{C}</math></b>



**Figura 10:** Diagrama de propagação das incertezas de medição associadas a um ensaio de calibração na escala de temperatura de ponto-de-orvalho.

### 3.3 Padrão de transferência

A transferência directa de rastreabilidade do padrão primário (gerador de humidade) para instrumentação dedicada à medição de humidade relativa encontra, nalguns casos, dificuldades devido a limitações operacionais do gerador de humidade, designadamente, no que respeita à sua inadequação para a realização de ensaios metrológicos de câmaras climatizadas *in situ* e à dimensão da sua câmara de ensaio, cujo volume disponível é insuficiente para efectuar a calibração de instrumentos de medição com maior dimensão, como é o caso dos termohigrógrafos de tambor analógicos de base mecânica.

Nestes casos, o higrómetro de espelho desempenha a função de padrão de transferência, quer pelo nível de exactidão que pode atingir, quer pela sua portabilidade, podendo ser calibrado por comparação directa com o padrão primário da grandeza [9]. Deste modo, o higrómetro de espelho permite assegurar a rastreabilidade dos padrões de trabalho acima referidos ao padrão de referência do LCAM/LNEC.

A tabela 20 descreve o balanço da melhor incerteza de medição na escala higrométrica associada a um ensaio metrológico de uma câmara climatizada, com recurso ao padrão de transferência do LCAM/LNEC. Por sua vez a tabela 21 é aplicável ao caso de um ensaio de calibração de um termohigrógrafo de tambor.

Salienta-se que, o ensaio de calibração de termohigrógrafos de tambor em câmaras climatizadas apresenta componentes de incerteza de estabilidade e uniformidade higrométricas superiores às descritas anteriormente para o gerador de humidade (*vide* secção 3.2.5) que resultam da aplicação de controlo proporcional-integrativo-derivativo da temperatura e da humidade de menor rigor e da maior volumetria de ensaio.

**Tabela 20:** Melhor incerteza de medição no ensaio metrológico de uma câmara climatizada (escala de humidade relativa).

Componente de incerteza	Fonte de incerteza	FdP*	Estimativa da incerteza	Coefficiente de sensibilidade	Contribuição para a incerteza	Graus de liberdade
	$X_i$		$u(x_i)$	$C_i$	$u_i(y)$	$\nu_i$
$\delta hr_{cal}$	Calibração do padrão	N	$\pm 0,34 \% \text{ hr}$	1	$\pm 0,34 \% \text{ hr}$	50
$\delta hr_{rep}$	Repetibilidade	N	$\pm 0,20 \% \text{ hr}$	1	$\pm 0,20 \% \text{ hr}$	50
$\delta hr_{res}$	Resolução do equipamento	R	$\pm 0,5/\sqrt{3} \% \text{ hr}$	1	$\pm 0,29 \% \text{ hr}$	50
$\delta hr_d$	Deriva	R	$\pm 1,0/\sqrt{3} \% \text{ hr}$	1	$\pm 0,58 \% \text{ hr}$	50

\* Siglas relativas a funções densidade de probabilidade: N – Normal; R – Rectangular/Uniforme; T – Triangular; U – Arco-seno; P – Trapezoidal.

$u(hr)$	Incerteza de medição padrão:	$\pm 0,76 \% \text{ hr}$
$\nu_{ef}$	Graus de liberdade efectivos:	123
$k$	Factor de expansão:	2,00
$U_{95\%}(hr)$	<b>Incerteza de medição expandida (95 %):</b>	<b><math>\pm 1,5 \% \text{ hr}</math></b>

**Tabela 21:** Melhor incerteza de medição no ensaio de calibração de um termohigrógrafo de tambor (escala de humidade relativa).

Componente de incerteza	Fonte de incerteza	FdP*	Estimativa da incerteza	Coefficiente de sensibilidade	Contribuição para a incerteza	Graus de liberdade
	$X_i$		$u(x_i)$	$C_i$	$u_i(y)$	$\nu_i$
$\delta hr_{cal}$	Calibração do padrão	N	$\pm 0,34 \% \text{ hr}$	1	$\pm 0,34 \% \text{ hr}$	50
$\delta hr_{est\ ip}$	Estabilidade longo prazo	T	$\pm 1,0/\sqrt{6} \% \text{ hr}$	1	$\pm 0,41 \% \text{ hr}$	50
$\delta hr_{estabilidade}$	Estabilidade do meio regulado	R	$\pm 1,0/\sqrt{3} \% \text{ hr}$	1	$\pm 0,58 \% \text{ hr}$	50
$\delta hr_{uniformidade}$	Uniformidade do meio regulado	R	$\pm 1,0/\sqrt{3} \% \text{ hr}$	1	$\pm 0,58 \% \text{ hr}$	50
$\delta hr_{mont}$	Montagem	R	$\pm 0,2/\sqrt{3} \% \text{ hr}$	1	$\pm 0,12 \% \text{ hr}$	50
$\delta hr_{res}$	Resolução	R	$\pm 0,5/\sqrt{3} \% \text{ hr}$	1	$\pm 0,29 \% \text{ hr}$	50
$\delta hr_{rep}$	Repetibilidade	R	$\pm 0,2/\sqrt{3} \% \text{ hr}$	1	$\pm 0,12 \% \text{ hr}$	50

\* Siglas relativas a funções densidade de probabilidade: N – Normal; R – Rectangular/Uniforme; T – Triangular; U – Arco-seno; P – Trapezoidal.

$u(hr)$	Incerteza de medição padrão:	$\pm 1,0 \% \text{ hr}$
$\nu_{ef}$	Graus de liberdade efectivos:	208
$k$	Factor de expansão:	2,00
$U_{95\%}(hr)$	<b>Incerteza de medição expandida (95 %):</b>	<b><math>\pm 2,0 \% \text{ hr}</math></b>

### 3.4 Padrões de trabalho

Actualmente, a actividade laboratorial higrométrica do LCAM/LNEC está acreditada no âmbito do Sistema Português da Qualidade, abrangendo a calibração e o ensaio metrológico de diversos tipos padrões de trabalho, prestando serviços quer a nível interno, quer a nível externo. Esse âmbito de acreditação inclui:

- higrómetros de espelho, na escala de humidade relativa (para a gama de medição compreendida entre 20 % hr e 95 % hr e resolução de 0,1 % hr) e na escala de temperatura de ponto-de-orvalho (para a gama de medição compreendida entre -15 °C e 50 °C e resolução 0,1 °C);
- termohigrógrafos e termohigrómetros com indicação digital, na escala de humidade relativa na gama de medição compreendida entre 20 % hr e 95 % hr e resolução de 0,1 % hr;
- termohigrógrafos de tambor, na escala de humidade relativa (para a gama de medição compreendida entre 20 % hr e 95 % hr e resolução de 0,5 % hr);
- câmaras climatizadas, dispondo da escala de humidade relativa na gama de medição de 35 % hr a 80 % hr.



## 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A estruturação de uma cadeia de rastreabilidade constitui um processo central da organização de um laboratório metrológico, directamente associado à actividade de calibração e ensaio metrológico desenvolvida.

Esta estruturação envolve a identificação e qualificação dos instrumentos de medição e equipamentos enquanto elementos dessa cadeia hierárquica e a avaliação das melhores incertezas de medição que se encontram associadas a esses padrões, promovendo adequadamente a transferência de incerteza dos padrões de referência para os padrões de transferência e destes para os padrões de trabalho.

No âmbito dos Sistemas de Gestão da Qualidade constitui um requisito normativo para os laboratórios acreditados a evidência objectiva de que o processo de rastreabilidade é cumprido.

Das áreas de actuação em que o LCAM/LNEC é interveniente encontra-se a medição de grandezas higrométricas, cuja aplicação no contexto da Engenharia Civil é particularmente diversificada. Para dotar a instrumentação científica do LNEC da necessária rastreabilidade, o LCAM/LNEC estruturou uma cadeia de rastreabilidade que dispõe, no presente, dos padrões que ocupam os diversos níveis dessa cadeia, encontrando-se no topo um padrão primário com o mais elevado rigor disponível.

No presente relatório são apresentados os diversos padrões que incorporam a cadeia de rastreabilidade higrométrica do LNEC, as fontes de incerteza de medição que influenciam cada tipo de padrões dessa cadeia e são apresentadas as tabelas de balanço de melhores incertezas de medição obtidas para cada um destes.

Este relatório pretende, complementarmente, constituir um elemento de evidência do processo de estruturação da cadeia de rastreabilidade higrométrica do LNEC e da quantificação das melhores incertezas de medição nesta área, dando cumprimento aos requisitos normativos determinados pela sua acreditação.

LNEC, Lisboa, Março de 2009

**VISTOS**

O Director do CIC,



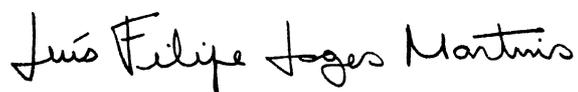
Carlos Oliveira Costa

**AUTORIA**



Álvaro Silva Ribeiro

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



Luís Filipe Lages Martins

Eng.º Mecânico  
Bolsheiro de Iniciação à Investigação Científica

## 5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] NP EN ISO/IEC 17025:2005 – *Requisitos gerais de competência para laboratórios de ensaio e calibração*, Caparica (Portugal): Instituto Português da Qualidade (IPQ), Dezembro de 2005.
- [2] *International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM)*, 3<sup>rd</sup> edition, Joint Committee for Guides in Metrology (BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP and OIML), 2008.
- [3] *Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM)*, Genève (Suíça): International Organization for Standardization (ISO), 1995.
- [4] Silva Ribeiro, A. e Lages Martins, L., *Caracterização metrológica do padrão de referência de humidade do LCAM/LNEC (gerador de humidade TSC 2500)*, Relatório 58/07 – CIC, Lisboa (Portugal): Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Fevereiro de 2007.
- [5] *Series 2500 BenchtopTwo-Pressure Humidity Generator – Operation and Maintenance Manual*, 4<sup>th</sup> edition, Albuquerque (EUA): Thunder Scientific Corporation, 2003.
- [6] Procedimento LCAM/LNEC E2415 – Versão 03 (2008/10/15) – Gerador de humidade (documento interno do LCAM/LNEC em suporte electrónico não sujeito a publicação).
- [7] *Evaluation of measurement data – Supplement 1 to the “Guide to the expression of uncertainty in measurement” – Propagation of distributions using a Monte Carlo method*, 1<sup>st</sup> edition, Joint Committee for Guides in Metrology (BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP and OIML), 2008.
- [8] Silva Ribeiro, A. e Lages Martins, L., *Avaliação de incertezas do padrão de referência de humidade relativa e temperatura de ponto-de-orvalho do LCAM/LNEC*, Relatório 334/2008 – NQM, Lisboa (Portugal): Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Setembro de 2008.
- [9] Procedimento LCAM/LNEC E2215 – Versão 02 (2008/12/17) – Higrómetros de espelho (documento interno do LCAM/LNEC em suporte electrónico não sujeito a publicação).

