



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

CENTRO DE INSTRUMENTAÇÃO CIENTÍFICA
Núcleo de Qualidade Metrologica

Proc. 1104/552/00384

**AVALIAÇÃO DAS MELHORES INCERTEZAS DE MEDIÇÃO
DE CAUDAL ASSOCIADAS AOS CAUDALÍMETROS
ELECTROMAGNÉTICOS TUBULARES UTILIZADOS
COMO PADRÕES DE TRANSFERÊNCIA NO LEHid/LNEC**

Lisboa • Dezembro de 2008

I&D INSTRUMENTAÇÃO CIENTÍFICA

RELATÓRIO 401/2008 – CIC/NQM

Avaliação das Melhores Incertezas de Medição de Caudal Associadas aos Caudalímetros Electromagnéticos Tubulares Utilizados como Padrões de Transferência no LEHid/LNEC

Resumo

O presente relatório resulta da actividade de colaboração entre o Centro de Instrumentação Científica (CIC) e o Departamento de Hidráulica e Ambiente (DHA) do LNEC visando o desenvolvimento de um estudo de avaliação das melhores incertezas de medição de caudal associadas aos quatro caudalímetros electromagnéticos tubulares que são utilizados como padrões de transferência no Banco de Ensaios Hidráulicos do Laboratório de Ensaios Hidráulicos (LEHid) — infra-estrutura do DHA adequada à realização de ensaios de calibração de caudalímetros, cujos padrões primários de caudal são dois caudalímetros mássicos gravimétricos.

Neste relatório constam uma descrição sucinta do Banco de Ensaios Hidráulicos do LEHid, uma descrição genérica de um caudalímetro electromagnético tubular, o procedimento de avaliação de incertezas de medição e a quantificação das melhores incertezas de medição associadas aos referidos caudalímetros electromagnéticos tubulares.

Evaluation of the Best Flow Rate Measurement Uncertainties Associated with the Tubular Electromagnetic Flowmeters Used as Transfer Standards at LEHid/LNEC

Abstract

This report results from the joint activity of the Centro de Instrumentação Científica (CIC) and the Departamento de Hidráulica e Ambiente (DHA) of LNEC aiming at the development of a study to evaluate the best flow rate measurement uncertainties associated with the four tubular electromagnetic flowmeters which are used as transfer standards at the Hydraulic Test Rig included in the Laboratório de Ensaios Hidráulicos (LEHid) — a testing infrastructure of DHA suitable for flowmeter calibration whose flow rate primary standards are two gravimetric mass flowmeters.

A brief description of the Hydraulic Test Rig, a general description of a tubular electromagnetic flowmeter, the procedure for evaluating the measurement uncertainties and the values of the best measurement uncertainties of the electromagnetic flowmeters under question can be found in this report.

ÍNDICE DE MATÉRIAS

1. INTRODUÇÃO	1
2. CONTEÚDO DO RELATÓRIO	3
3. DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DE CAUDAL DO LEHid	4
4. DESCRIÇÃO DE UM CAUDALÍMETRO ELECTROMAGNÉTICO TUBULAR.....	13
5. AVALIAÇÃO DAS MELHORES INCERTEZAS DE MEDIÇÃO..	17
6. CONCLUSÕES	27
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	31

|

ÍNDICE DE FIGURAS

1	Fotografia de parte da instalação laboratorial de ensaios hidráulicos do LNEC	8
2	Diagrama ilustrativo dos elementos que compõem um sistema de calibração de caudalímetros pelo método gravimétrico do LNEC	9
3	Cadeia de rastreabilidade associada à calibração de caudalímetros no LEHid	12
4	Constituição de um caudalímetro electromagnético tubular	13
5	Esquema do primário de um caudalímetro electromagnético tubular: a – perspectiva transparente; b – corte pelo plano dos eléctrodos	14
6	Esquematização do princípio de transdução de um caudalímetro electro- magnético tubular	15
7	Representação de componentes de incerteza num sistema de medição de caudal usando um caudalímetro electromagnético	20

ÍNDICE DE QUADROS

1	Condições de referência para calibração de caudalímetros.....	11
2	Incertezas de medição relativas de caudal mássico (Q_m) e caudal volumétrico (Q), usando o sistema gravimétrico primário	18
3	Fontes de incerteza na medição de caudal usando um caudalímetro electromagnético	19
4	Balanço de incertezas de medição na gama 10 % a 100 %	21
5	Incertezas de medição padrão relativas associadas ao regime dinâmico do escoamento para diferentes valores de caudal e diferentes linhas de ensaio do LEHid	24
6	Incertezas de medição padrão relativas associadas ao regime dinâmico do escoamento para diferentes valores de caudal e diferentes linhas de ensaio obtidas entre 2% e 10% da gama de medição do LEHid	25
7	Incertezas de medição padrão relativas associadas ao regime dinâmico do escoamento adoptadas consoante a sub-gama de medição	25
8	Incertezas de medição padrão relativas associadas ao regime dinâmico do escoamento adoptadas consoante a sub-gama de medição	26

AVALIAÇÃO DAS MELHORES INCERTEZAS DE MEDIÇÃO DE CAUDAL ASSOCIADAS AOS CAUDALÍMETROS ELECTROMAGNÉTICOS TUBULARES UTILIZADOS COMO PADRÕES DE TRANSFERÊNCIA NO LEHid/LNEC

1. INTRODUÇÃO

A medição de caudal pelo método gravimétrico constitui o método primário de realização da grandeza (derivada) caudal mássico aplicável na geração de condições de referência da grandeza caudal para a calibração e ensaio de caudalímetros.

No LNEC foi desenvolvida uma instalação laboratorial (Laboratório de Ensaios Hidráulicos – LEHid) inserida no Departamento de Hidráulica e Ambiente (DHA), da qual faz parte um banco de ensaios (denominado Banco de Ensaios Hidráulicos e adiante designado abreviadamente por “banco de ensaios”) para calibração de caudalímetros e cujo padrão de referência (padrão primário da grandeza caudal mássico) é um sistema de medição baseado no método gravimétrico.

Esta instalação laboratorial encontra-se em fase de acreditação no âmbito do Sistema Português da Qualidade envolvendo, por isso, diversos requisitos, um dos quais é a evidenciação das suas incertezas de medição. Por se tratar de uma instalação primária e por envolver um elevado grau de complexidade, a quantificação das incertezas de medição requer o desenvolvimento de estudos que têm sido realizados em colaboração envolvendo o LEHid (DHA) e o Núcleo de Qualidade Metrológica (NQM) do Centro de Instrumentação Científica, ambos integrados no LNEC, podendo destacar-se, desse conjunto de estudos, os que são dedicados:

- à caracterização metrológica do sistema de medição envolvendo as fontes de incerteza (variáveis) que contribuem para a avaliação da incerteza de medição do caudal;
- à integração destas variáveis num modelo matemático representativo que sustente a avaliação das incertezas de medição;
- ao desenvolvimento de acções de melhoria do sistema de modo a minimizar as influências produzidas pelas fontes de incerteza;
- à caracterização destas variáveis no que concerne à sua natureza estocástica (identificação de distribuições de probabilidade e sua parametrização);

- ao estudo e à análise comparativa de resultados obtidos pela aplicação de diferentes metodologias de avaliação de incerteza, designadamente, o método GUM (Guide for the expression of uncertainty in measurement) [1] e o método MCM (Método de Monte Carlo);
- à selecção fundamentada de uma das metodologias anteriormente apontadas como adequada à avaliação das incertezas de medição;
- à concretização da avaliação das incertezas de medição para o sistema de medição de caudal considerando os seus aspectos específicos (os dois instrumentos de pesagem de referência para medição da massa convencional, as quatro condutas, designadas por “linhas de ensaio”, possuindo diâmetros nominais distintos, o comportamento estatístico observado relativamente a algumas das variáveis, etc.).

No seguimento do relatório intitulado “Avaliação das melhores incertezas de medição de caudal associadas aos padrões de referência do LEHid/LNEC usando o Método de Monte Carlo” [2], onde se descreveu a metodologia de avaliação de incertezas do sistema primário, segue-se o presente estudo visando a avaliação das melhores incertezas de medição associadas à calibração de caudalímetros electromagnéticos tubulares de referência no LEHid. Refira-se que este processo de calibração aplica-se quer aos caudalímetros electromagnéticos do laboratório que são utilizados como padrões de transferência, quer a caudalímetros electromagnéticos de clientes cujos requisitos de exactidão o justifiquem.

O objectivo deste estudo, de efectuar a caracterização metrológica do processo de calibração de caudalímetros electromagnéticos, incluindo a identificação de fontes de incerteza e quantificação das suas contribuições e a avaliação das melhores incertezas de medição, enquadra-se no âmbito do objectivo do conjunto de estudos citado, visando constituir uma contribuição para a caracterização das cadeias de rastreabilidade metrológica envolvidas na actividade do LEHid enquanto parcela que condiciona a classe de exactidão da instrumentação calibrada nesta instalação laboratorial.

2. CONTEÚDO DO RELATÓRIO

No seguimento da elaboração de um relatório dedicado à avaliação de incertezas de medição associadas ao método gravimétrico [2] enquanto método primário para a calibração de caudalímetros, foi elaborado o presente relatório visando a descrição dos elementos considerados mais relevantes do processo de estudo conducente à avaliação das incertezas de medição de caudal associadas à calibração de caudalímetros tubulares electromagnéticos que constituem os padrões de transferência do LEHid.

O conteúdo deste relatório distribui-se por 7 capítulos, efectuando-se, em seguida, um breve resumo do conteúdo dos capítulos 3 a 7.

O capítulo 3 contém uma breve descrição do sistema de medição laboratorial que suporta a medição de caudal pelo método gravimétrico. Neste, inclui-se a descrição do modelo matemático geral e dos elementos que o integram, as condições de referência, as regras adoptadas para minimizar as perturbações da medição e as cadeias de rastreabilidade metrológica estabelecidas.

No capítulo 4 descrevem-se sucintamente a constituição e o princípio de transdução de um caudalímetro electromagnético tubular.

No capítulo 5 encontra-se a descrição do modelo matemático adoptado, aplicável no contexto da avaliação das incertezas de medição, das suas grandezas de entrada, dos elementos para a quantificação das respectivas contribuições e as distribuições de probabilidade seleccionadas como representativas da sua variabilidade.

No capítulo 6 apresentam-se as melhores incertezas de medição obtidas considerando os diversos padrões de transferência que se encontram nas 4 linhas de ensaio para diversas gamas de medição de caudal.

No capítulo 7 encontram-se as conclusões enquadradas na actividade do LEHid, bem como os aspectos a realçar no contexto de auditorias a realizar ao sistema de medição de caudal no âmbito do seu Sistema de Gestão da Qualidade.

3. DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DE CAUDAL DO LEHid

A grandeza caudal mássico é uma grandeza derivada do Sistema Internacional de Unidades (SI) [3, 4], obtida por via indirecta pela medição de duas grandezas de base do SI: a grandeza *massa* e a grandeza *tempo*. A sua medição resulta da utilização do método gravimétrico exposto na norma ISO 4185 [5], sendo aplicável o modelo matemático (3.1) que relaciona as grandezas referidas da seguinte forma:

$$Q_m = \frac{\Delta m}{\Delta t} = \frac{m_f - m_i}{t_f - t_i} = \frac{m_{cf} - m_{ci}}{t_f - t_i} \cdot \frac{\left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_p}\right)}{\left(1 - \frac{\rho_a}{\rho}\right)}, \quad (3.1)$$

expressão em que as grandezas presentes são:

- o caudal mássico Q_m ;
- a massa “verdadeira”¹ m ;
- a massa convencional² de líquido (água) sujeito a pesagem m_c ;
- o tempo t ;
- a massa volúmica do corpo cuja massa serve de referência ρ_p ;
- a massa volúmica do ar ρ_a ;
- a massa volúmica da água ρ ;

Os índices “i” e “f” indicam que o valor da grandeza em causa corresponde a uma medição efectuada no início e no fim do ensaio, respectivamente.

A expressão anterior admite uma simplificação prática (3.2) resultante de duas operações: uma, ao considerar-se que o instante inicial é igual a zero, permitindo igualar o intervalo de tempo ao valor da medição de tempo realizada no final do ensaio: $\Delta t = t_f - t_i = t_f - 0$; e

¹ De acordo com a definição da recomendação EA 10/18 [6].

² De acordo com a definição da recomendação EA 10/18 [6].

outra, da junção dos termos da equação associados ao efeito da impulsão exercida pelo ar sobre a água num coeficiente de impulsão C_{imp} : $C_{imp} = \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_p}\right) \cdot \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho}\right)^{-1}$.

$$Q_m = \frac{\Delta m_c}{t_f} \cdot C_{imp}, \quad (3.2)$$

sendo $\Delta m_c = m_{cf} - m_{ci}$.

O objectivo da realização de determinado caudal mássico no sistema visa estabelecer condições de referência para se dispor de um valor (médio) de referência comparável com os valores medidos pelos caudalímetros em calibração. Estes, contudo, efectuem a medição do caudal volumétrico, Q_v , pelo que se torna necessário utilizar uma outra expressão que permite obter os valores desta grandeza partindo do caudal mássico. Essa expressão é a seguinte:

$$Q_v = Q_m \cdot \rho(T), \quad (3.3)$$

sendo dependente da massa volúmica da água que, por sua vez, depende da temperatura T a que este líquido se encontra.

O modelo matemático exposto contém as variáveis aleatórias que traduzem as grandezas do SI envolvidas. No entanto, cada uma delas resulta de um conjunto de contribuições que, para além de determinar as primeiras, são também responsáveis pela introdução de componentes de incerteza.

É necessário, portanto, identificar e quantificar essas componentes que constituem o modelo matemático específico para a avaliação das incertezas de medição. Esta tarefa é facilitada ao efectuar-se uma descrição prévia da estrutura dos sistemas de medição implantados no banco de ensaios do LEHid. Esta descrição considera três vertentes: os elementos constituintes da instalação; as condições e requisitos de referência; e a rastreabilidade das suas medições.

Relativamente à primeira vertente, o banco de ensaios do LEHid dispõe de dois sistemas de medição de caudal pelo método gravimétrico, contendo uma parte comum constituída pelo reservatório de água, pelas componentes responsáveis pela geração e manutenção de um escoamento de água nas condutas (os grupos electrobomba), por quatro trechos de condutas com diâmetros nominais de DN 100, DN 150, DN 200 e DN 300 (as “linhas de ensaio”), onde

são instalados os caudalímetros a calibrar, e um sistema de medição de tempo; e uma parte diferenciada, que recorre a dois instrumentos de pesagem com alcances de 3 000 kg e de 30 000 kg.

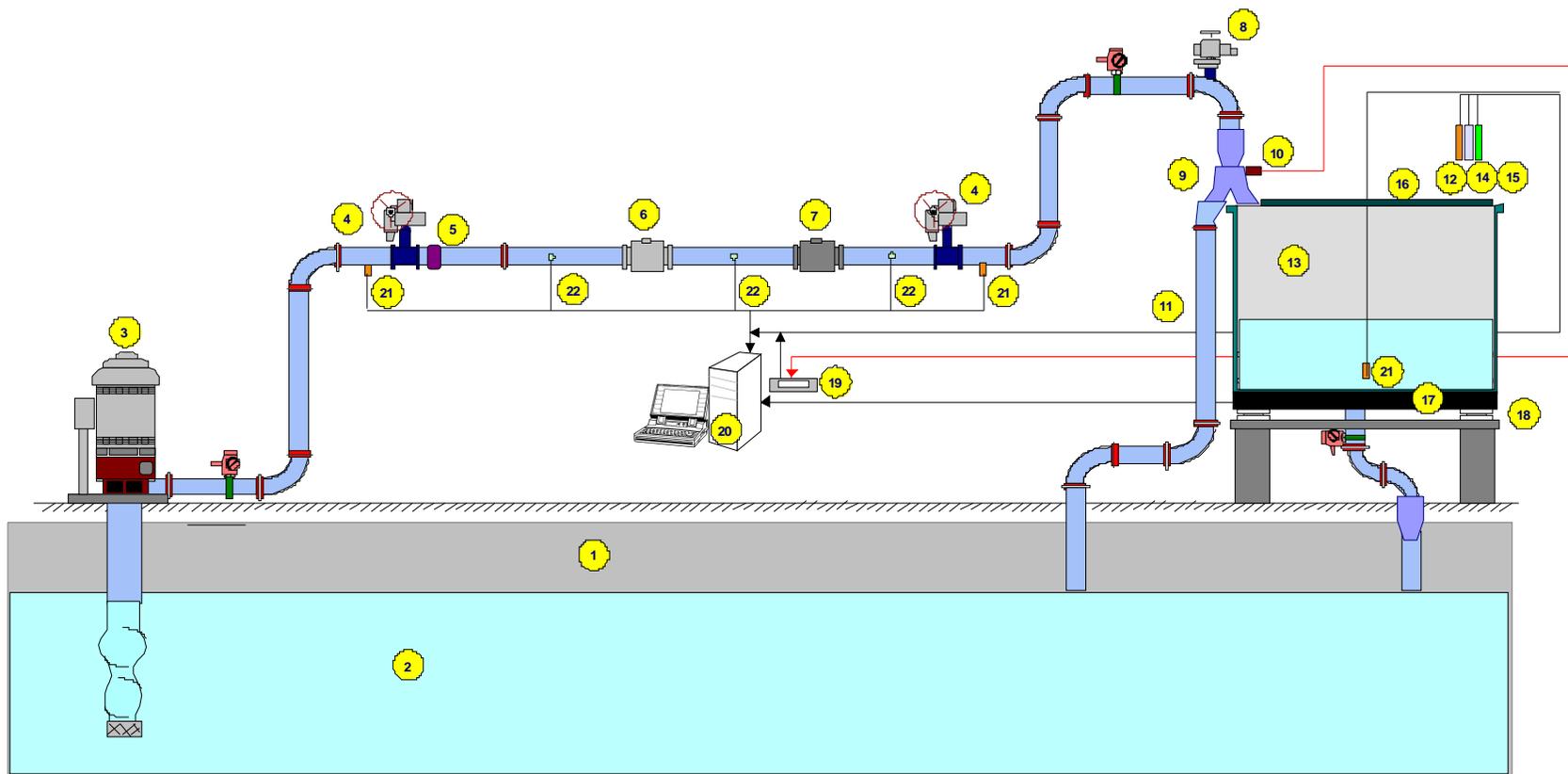
Nesta instalação encontra-se, também, um conjunto significativo de instrumentação dedicada à monitorização das principais grandezas de influência (temperatura ambiente e temperatura da água, pressão atmosférica, humidade relativa atmosférica) e diversos elementos de operação do sistema. Estes elementos são identificados e as suas funções descritas na lista que se segue, complementando-se essa descrição com um diagrama ilustrativo exposto na Figura 1 [7] e uma fotografia que se encontra na Figura 2 [7]:

- *reservatório subterrâneo* – reservatório para manutenção de um volume de água adequado para garantir condições de estabilidade (hidráulica e térmica) e de funcionamento dinâmico do sistema (nomeadamente, de manutenção de um nível da superfície livre da água adequado durante a bombagem pelos grupos electrobomba para as condutas);
- *grupo electrobomba* – em funcionamento isolado ou em paralelo com um outro grupo similar, permite a geração controlada de diferentes caudais em condições de estacionariedade (regime hidráulico permanente) apropriadas a cada uma das quatro linhas de ensaio;
- *válvula de seccionamento* – utilizada na abertura e fechamento de cada linha de ensaio;
- *condicionador de escoamento* – elemento utilizado na extremidade de montante de cada linha de ensaio para estabilização do escoamento apropriada à medição da grandeza;
- *caudalímetro de trabalho* – instrumento de medição a calibrar;
- *caudalímetro electromagnético (padrão de transferência)* – instrumento de medição de caudal utilizado como padrão secundário ou de transferência para calibração de caudalímetros de trabalho;
- *válvula de regulação de caudal e de pressão* – válvula de condicionamento da abertura na conduta onde está instalada visando a regulação do caudal e da pressão da água em escoamento na linha de ensaio em utilização;

- *deflector (de escoamento)* – elemento do sistema que permite a orientação do escoamento da água para a conduta de derivação ou para o tanque de pesagem;
- *sensor de posição associado ao cronómetro padrão* – detector de posição responsável pelo sinal de início e fim da medição do tempo de enchimento do tanque de pesagem instalado sobre o instrumento de pesagem;
- *conduta de derivação* – conduta através da qual a água é dirigida para o reservatório subterrâneo durante o processo prévio de estabilização do caudal e após o final do ensaio;
- *sensores de temperatura, de humidade relativa e de pressão atmosféricas* – sensores utilizados para transdução das grandezas apontadas em circunstâncias onde estas constituem grandezas de influência contabilizáveis na incerteza de medição;
- *instrumento de pesagem* – padrão de referência utilizado na medição da grandeza massa que constitui uma das grandezas de entrada do modelo matemático que determina o caudal;
- *resguardo para recuperação de partículas de água projectadas* – cobertura colocada no topo do tanque de pesagem destinada a recolher partículas de água projectadas no processo de enchimento daquele;
- *niveladores do instrumento de pesagem* – dispositivos de nivelamento do receptor de carga (tanque de pesagem) utilizados para minimização de componentes de incerteza como, por exemplo, associados ao desvio de excentricidade;
- *cronómetro padrão* – padrão de referência utilizado na medição da grandeza tempo, a qual constitui uma das grandezas de entrada do modelo matemático que determina o caudal;
- *sistema informático* – utilizado para parametrização, aquisição, monitorização e controlo do processo de medição de caudal.



Figura 1 – Fotografia de parte da instalação laboratorial de ensaios hidráulicos do LNEC



Legenda

- | | | | | |
|-------------------------------|---|--|--|----------------------------------|
| 1 Reservatório subterrâneo | 6 Caudalímetro de trabalho | 11 Condução de derivação | 16 Resguardo para recuperação de partículas de líquido projectadas | 21 Sensor de temperatura da água |
| 2 Líquido: água | 7 Caudalímetro (padrão de transferência) | 12 Sensor de temperatura atmosférica | 17 Plataforma do instrumento do pesagem | 22 Sensor de pressão da água |
| 3 Grupo electrobomba | 8 Válvula de regulação de caudal e de pressão | 13 Instrumento de pesagem (padrão de referência) | 18 Niveladores do instrumento de pesagem | |
| 4 Válvula de seccionamento | 9 Deflector | 14 Sensor de humidade relativa atmosférica | 19 Cronómetro padrão | |
| 5 Condicionador de escoamento | 10 Sensor de posição associado ao cronómetro | 15 Sensor de pressão atmosférica | 20 Sistema informático de parametrização, aquisição, monitorização e controlo. | |

Figura 2 – Diagrama ilustrativo dos elementos que compõem um sistema de calibração de caudalímetros pelo método gravimétrico do LNEC

No diagrama da Figura 1 identificam-se os elementos de uma única linha de ensaio, não se representando a multiplicidade de alguns dos elementos no sistema de medição. Por isso, deve-se realçar que este sistema possui 3 grupos electrobomba com accionamento de velocidade regulável, dois instrumentos de pesagem (IP) com alcances de 3 000 kg e 30 000 kg; e quatro linhas de ensaio. O sistema que contém o IP de menor alcance designa-se por SP1 e o outro por SP2.

É importante referir que os procedimentos de calibração desenvolvidos no LEHid têm uma metodologia para concretizar cada valor de caudal. Com efeito, a geração de um determinado valor de caudal Q_m resulta de se estabelecer um valor fixo de massa, aproximadamente coincidente, em geral, com o alcance máximo de massa convencional, $m_{c,max}$ (1 700 kg e 17 000 kg, consoante se utilize o sistema SP1 ou SP2) e fazendo depender a duração do ensaio das duas variáveis pré-definidas, de acordo com a expressão:

$$\Delta t = \frac{m_{c,max}}{Q_m} . \quad (3.4)$$

Admitindo que os valores de caudal gerados em SP1 se encontram compreendidos entre 1 kg/s e 50 kg/s, conseqüentemente, a duração dos ensaios encontra-se compreendida entre cerca de 34 s e 1 700 s, e usando o sistema SP2 o caudal mássico encontra-se compreendido entre 5 kg/s e 350 kg/s, a duração dos ensaios encontra-se compreendida entre cerca de 49 s e 3 400 s.

A segunda vertente da descrição da instalação relaciona-se com o cumprimento de um conjunto de condições de referência (exposta no Quadro 1) que a calibração de caudalímetros requer, de acordo com o especificado na norma ISO 9104 [8].

Quadro 1 – Condições de referência para calibração de caudalímetros

Grandeza	Limites / tolerância
Temperatura da água	4 °C a 35 °C
Humidade relativa (atmosférica)	35 % a 75 %
Pressão atmosférica	$8,6 \cdot 10^2$ Pa a $1,060 \cdot 10^3$ Pa
Flutuação da tensão eléctrica (relativa)	± 1 %
Distorção harmónica (ref.)	< 5 % (a.c.)
Factor de tremor (ref.)	< 0,1 % (d.c.)

A medição da grandeza caudal em sistemas desta natureza é sujeito a perturbações provenientes de diversos factores de influência, cuja origem ultrapassa a fase de execução do ensaio. Com efeito, muitas das perturbações conhecidas resultam de procedimentos menos adequados efectuados em fases como a montagem e instalação dos elementos que a compõem. Por isso, é importante referir que a instalação do LEHid foi concretizada adoptando regras e procedimentos estritos para cumprimento de requisitos visando a minimização desses efeitos perturbadores. Sem pretender referir exaustivamente todas as precauções, citam-se algumas das mais relevantes:

- cumprimento de regras de existência de extensões adequadas de escoamento não perturbado a montante e a jusante do caudalímetro padrão de transferência e do caudalímetro de trabalho;
- cumprimento de requisitos dimensionais relativamente à relação entre os diâmetros interiores das linhas de ensaio e dos caudalímetros de transferência;
- nivelamento das linhas de ensaio e dos instrumentos de pesagem;
- equipotencialização eléctrica e ligações à terra de troços das linhas de ensaio e uniões de ligação;
- utilização (quando necessário) de cones de transição apropriados com forma hidrodinâmica.

Uma terceira vertente igualmente importante na descrição da instalação é a rastreabilidade metrológica estabelecida visando a garantia da qualidade das medições. Assim, no que se

refere ao estabelecimento de cadeias de rastreabilidade dos padrões integrados nos sistemas, foram efectuadas calibrações dos diversos padrões de referência do sistema de medição:

- instrumentos de pesagem [9, 10];
- cronómetros padrão [11, 12, 13];
- sistema de medição da temperatura da água;
- sistemas de monitorização das grandezas de influência.

A Figura 3 [7] contém os elementos que descrevem as cadeias de rastreabilidade associadas às grandezas de base de *massa* e de *tempo*.

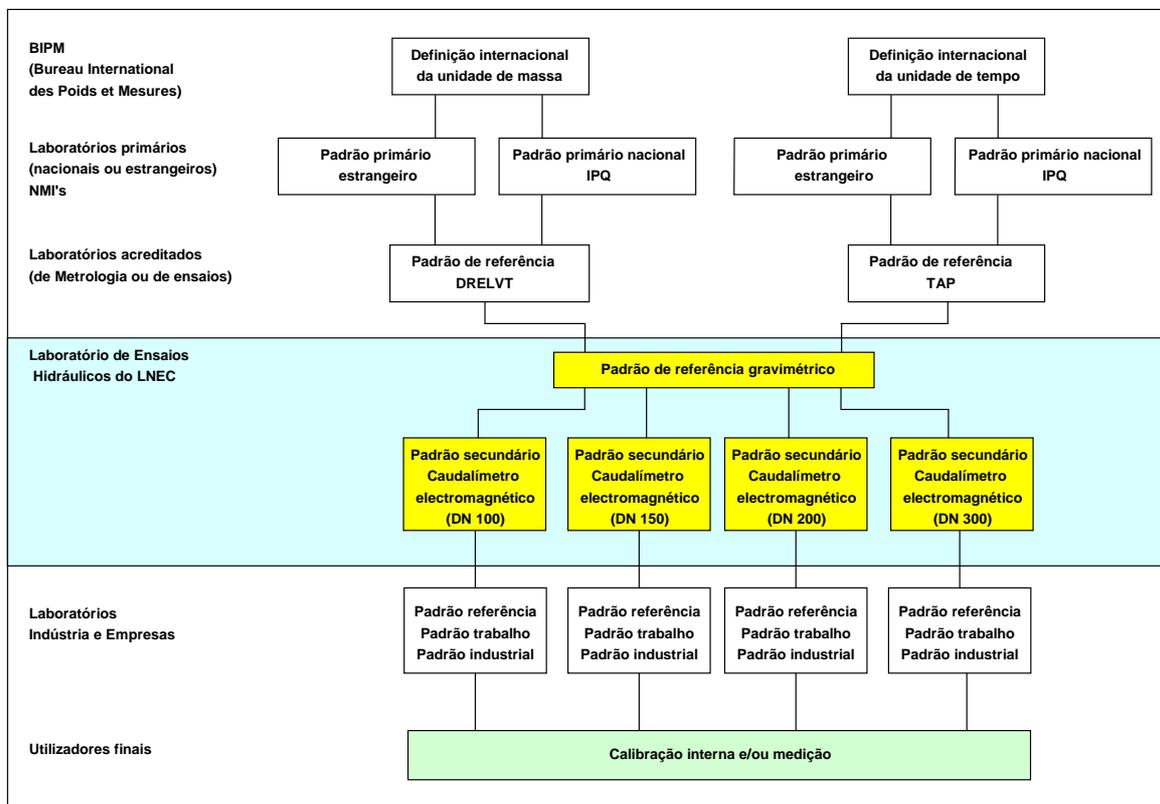


Figura 3 – Cadeia de rastreabilidade associada à calibração de caudalímetros no LEHid

4. DESCRIÇÃO DE UM CAUDALÍMETRO ELECTROMAGNÉTICO TUBULAR

Um caudalímetro electromagnético tubular utilizável num escoamento líquido em pressão é constituído pelos seguintes componentes:

- um *elemento primário* (ou *transdutor de caudal*) tubular, doravante designado apenas por *primário*, que cria um campo magnético através do qual se escoia o líquido, necessariamente condutor eléctrico³, cujo caudal se pretende medir, e que possui eléctrodos (normalmente dois) em contacto com o líquido, entre os quais surge uma diferença de potencial eléctrico (ou força electromotriz) induzida proporcional à velocidade média do escoamento e, por conseguinte, ao caudal;
- um *elemento secundário* (ou *condicionador de sinal*) construído com meios electrónicos, doravante designado apenas por *secundário*, que, para além de controlar a excitação do primário (ou seja, a criação do campo magnético), extrai o sinal de tensão induzido nos eléctrodos, amplificando-o e processando-o por forma a convertê-lo num sinal de saída normalizado proporcional ao caudal.

A Figura 4 ilustra essa constituição.

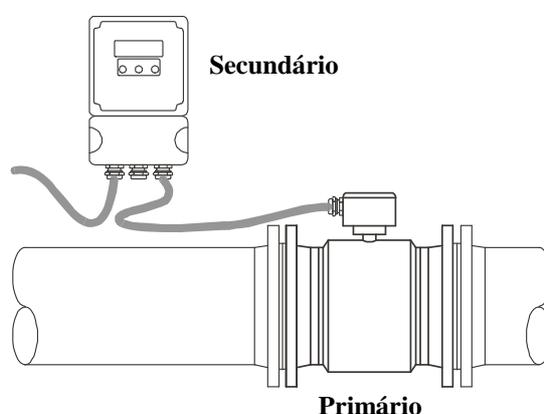


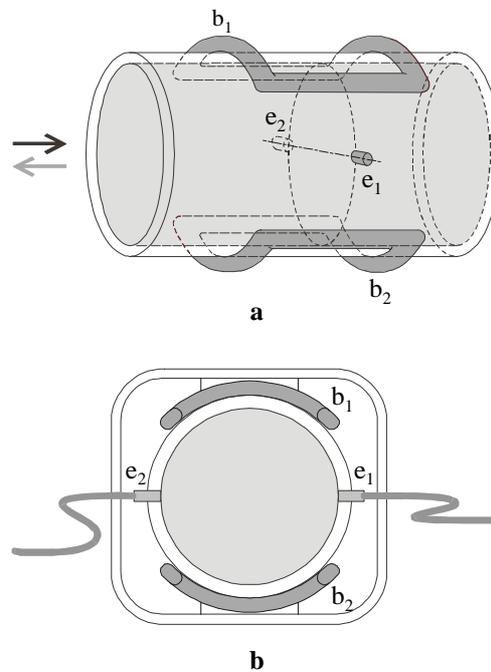
Figura 4 – Constituição de um caudalímetro electromagnético tubular

Como se esquematiza na Figura 5 [14], um primário tubular compreende essencialmente:

³ Actualmente, é vulgar um caudalímetro electromagnético requerer que o valor mínimo da condutividade eléctrica do líquido seja da ordem de $5 \mu\text{S cm}^{-1}$.

- um tubo cilíndrico de material não-magnético (que, se for metálico, terá de ser não-ferromagnético e possuir um revestimento interno electricamente isolador), no qual se escoia o líquido — o *tubo de medição*;
- um *electromagneto*, que gera o referido campo magnético, sendo a direcção deste perpendicular ao eixo do tubo de medição e, portanto, à direcção do escoamento;
- dois *eléctrodos*, que captam a diferença de potencial induzida, montados no tubo de medição em posições diametralmente opostas, aflorando à superfície interna deste⁴ e com o respectivo eixo perpendicular à direcção do campo magnético.

O plano perpendicular à direcção do escoamento que contém o par de eléctrodos designa-se por *plano dos eléctrodos*, sendo um importante plano de referência para a correcta instalação hidráulica do primário.



b_1, b_2 – enrolamentos do electromagneto
 e_1, e_2 – eléctrodos

*Figura 5 – Esquema do primário de um caudalímetro electromagnético tubular:
a – perspectiva transparente; b – corte pelo plano dos eléctrodos*

⁴ No caso de o tubo de medição ser metálico, o seu revestimento interno isolador impede a ocorrência de curto-circuitos entre o material do tubo e os eléctrodos através do líquido.

O princípio de transdução de um caudalímetro electromagnético, que se esquematiza na Figura 6 [14], baseia-se na lei de Faraday da indução electromagnética.

De acordo com a referida lei, entre os dois eléctrodos surge uma força electromotriz \vec{E} induzida pelo escoamento do líquido no campo magnético, cujo módulo E é directamente proporcional à distância entre os eléctrodos e à velocidade média do escoamento U no tubo de medição, o que se pode traduzir pela expressão simplificada

$$E = k B D U \quad (4.1)$$

sendo k uma constante adimensional, B a densidade do fluxo magnético e D o diâmetro interior do tubo de medição (igual à distância entre os eléctrodos).

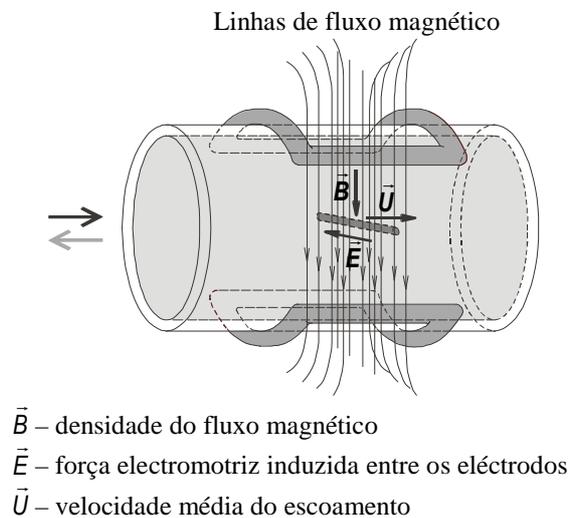


Figura 6 – Esquematização do princípio de transdução de um caudalímetro electromagnético tubular

Combinando a Equação (4.1) com a Equação (4.2), que relaciona U com o caudal Q ,

$$U = \frac{4 Q}{\pi D^2} \quad (4.2)$$

obtém-se a expressão

$$Q = \frac{\pi D E}{4 k B} \quad (4.3)$$

da qual resulta

$$Q = K \left(\frac{E}{B} \right) \quad (4.4)$$

sendo K a *constante do primário*, válida para qualquer líquido condutor e em toda a gama de medição do caudalímetro. O seu valor determina-se por ensaio de calibração com água, em conformidade com as normas ISO 6817 [15] e ISO 9104 [16], sendo sempre fornecido pelo fabricante do caudalímetro.

Para a concretização prática deste princípio de medição não se utiliza simplesmente um campo magnético constante. Com efeito, para um dado sentido de escoamento do líquido, essa situação contribuiria para a polarização dos eléctrodos e não permitiria rejeitar derivas de zero e parcelas de força electromotriz de natureza electroquímica. A solução preferível consiste na aplicação sucessiva de patamares de campo magnético alternados, o que se consegue com o controlo automático da intensidade da corrente de excitação, criando uma evolução temporal alternada aproximadamente trapezoidal [14].

O secundário de um caudalímetro electromagnético tubular desempenha as seguintes funções:

- estabelecimento do campo magnético no primário com a evolução adequada, através de uma regulação muito apurada da intensidade da corrente de excitação, superando diversos efeitos perturbadores, como os devidos a flutuações na alimentação de energia eléctrica e a variações de resistência dos enrolamentos de excitação;
- amplificação e processamento do sinal proveniente dos eléctrodos de modo a produzir um sinal limpo e robusto proporcional ao caudal.

A fim de proporcionar ao caudalímetro, de que faz parte, compatibilidade com outros equipamentos aos quais se pode ligar (para afixação de leituras ou para aquisição de dados, por exemplo), o secundário possui uma ou várias saídas de sinal de tipos comuns, designadamente:

- saída analógica de corrente;
- saída analógica de tensão;
- saída de frequência pulsatória.

O secundário de um caudalímetro electromagnético tubular moderno dispõe geralmente de processamento digital, que lhe confere ainda outras capacidades, tais como afixação de leituras em mostrador digital, meios de parametrização, auto-diagnóstico de estado e interface digital para comunicação de dados.

5. AVALIAÇÃO DAS MELHORES INCERTEZAS DE MEDIÇÃO

A calibração de caudalímetros electromagnéticos tubulares de transferência no LEHid é efectuada mediante a comparação directa entre o caudal médio determinado com o sistema gravimétrico primário (efectuando uma conversão do caudal mássico em caudal volumétrico) e uma sequência de medições (em regra, 30 observações) obtidas usando o caudalímetro a calibrar no intervalo de tempo em que decorre o enchimento do tanque de pesagem.

O modelo matemático descritivo da diferença de caudal observada tem a forma

$$\delta Q = \bar{Q}_c - \bar{Q}_{ref}, \quad (5.1)$$

onde δQ representa o desvio de caudal volumétrico observado em cada patamar de calibração, \bar{Q}_c representa o valor médio de observações de caudal volumétrico obtido com o caudalímetro a calibrar e \bar{Q}_{ref} o valor de caudal volumétrico determinado usando o sistema gravimétrico primário.

Considerando que os valores em causa são afectados por componentes aleatórias e sistemáticas de erro, δQ , o modelo anterior escreve-se como:

$$\delta Q = (\bar{Q}_i + \sum \delta Q_{c,i}) - (\bar{Q}_{ref} + \sum \delta Q_{ref,i}), \quad (5.2)$$

o qual será tomado como base para a avaliação das incertezas de medição.

A avaliação de incertezas de medição envolve um conjunto de etapas, podendo destacar-se nestas: a identificação das fontes de incerteza que influenciam os resultados da medição; a quantificação da sua variabilidade; e a combinação destas componentes visando a obtenção da incerteza-padrão combinada (a concretização desta etapa poderá envolver a necessidade de obtenção de informação adicional consoante a metodologia de avaliação de incertezas adoptada).

Refira-se, a este propósito, que a análise (identificação e quantificação) de fontes de incerteza, a sua quantificação e consequente avaliação das incertezas de medição relativa ao sistema gravimétrico primário se encontra detalhada no relatório LNEC [2] previamente editado. Como tal, admite-se que os valores nele indicados são aplicáveis no presente contexto, sendo transcritos para o Quadro 2. Consequentemente, o presente estudo reporta, apenas, a

parte complementar aplicável à medição de caudal com caudalímetros electromagnéticos tubulares usando a presente instalação e o método referido.

Quadro 2 – Incertezas de medição relativas de caudal mássico (Q_m) e caudal volumétrico (Q), usando o sistema gravimétrico primário [2]

	SP1	SP2
$w(Q_m)$	0,015 %	0,03 %
$W_{95\%}(Q_m)$	0,03 %	0,06 %
$w(Q)$	0,015 %	0,03 %
$W_{95\%}(Q)$	0,03 %	0,06 %

A identificação das fontes de incerteza relativas ao método de calibração e ao caudalímetro a calibrar efectua-se considerando três tipos de condicionalismos: as condições hidráulicas e de instalação do elemento primário; as condições electrotécnicas; e as condições metrológicas.

É com base nestas condições de âmbito geral que se particularizam as fontes de incerteza que, de acordo com os autores, podem influenciar os resultados da medição. No Quadro 3 encontra-se um resumo do conjunto de fontes de incerteza cujas contribuições são consideradas na contabilização da incerteza associada à grandeza de saída (caudal volumétrico) e o seu agrupamento de acordo com os condicionalismos apontados.

Quadro 3 – Fontes de incerteza na medição de caudal usando um caudalímetro electromagnético

Condições hidráulicas e de instalação do elemento primário
Instabilidade associada ao regime dinâmico do escoamento
Posição do eixo dos eléctrodos do elemento primário
Perfil de velocidades do escoamento
Colocação de juntas de desmontagem (afectando o perfil de velocidades)
Desvios de alinhamento (idem)
Colocação inadequada de cones de transição (idem)
Incumprimento de regras de dimensionamento
Inclinação inadequada das condutas
Efeito das condições ambientais (temperatura e pressão)
Geometria das condutas (simetria e irrotacionalidade do escoamento)
Inversão do sentido de escoamento
Presença de ar nas condutas
Condições electrotécnicas
Interferência de campos electromagnéticos (sobre circuitos de sinal e sobre órgãos electrónicos)
Imperfeições na excitação magnética
Interferência de correntes eléctricas na água (por diferença de potencial entre condutas)
Deriva de zero e de sinais de referência
Dispositivos interpostos na cadeia de medição com sinais analógicos (amplificação, isolamento galvânico, condicionamento, aquisição)
Ruído intrínseco
Ligações à terra deficientes
Equipotencialização deficiente
Perturbações com origem nas fontes de alimentação de energia
Efeito da temperatura na instrumentação
Condutividade eléctrica do líquido (efeito, em geral, de menor importância, podendo perturbar a impedância interna do elemento primário)
Condições metrológicas
Variação de caudal durante a aquisição de valores médios
Incerteza de calibração
Desvios residuais de calibração
Resolução associada às grandezas mensuráveis
Resolução associada à conversão A/D
Repetibilidade
Processamento de dados
Operações de totalização e sua resolução
Efeito da parametrização primário-secundário
Processamento computacional da informação
Efeito associado a grandezas de influência (pressão e temperatura)

O diagrama exposto na Figura 7 representa a distribuição das fontes de incerteza distribuídas pelos diversos elementos funcionais que compõem o sistema de medição associado ao caudalímetro electromagnético a calibrar.

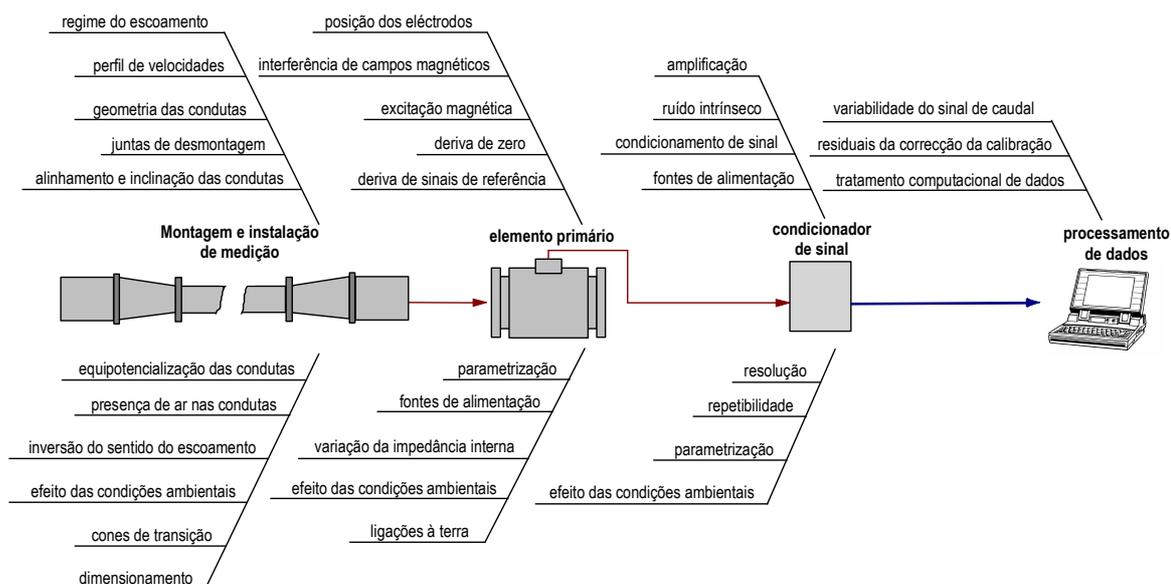


Figura 7: Representação de componentes de incerteza num sistema de medição de caudal usando um caudalímetro electromagnético

No que se refere à quantificação das contribuições para a incerteza de medição provenientes das fontes apontadas, as respectivas estimativas encontram-se expostas no Quadro 4, tendo sido obtidas em resultado de uma análise das condições existentes no sistema de medição de caudal em escoamentos sob pressão do LEHid e de informação complementar baseada em estudos experimentais.

Como se observa nesse Quadro, um número significativo dessas contribuições é considerado desprezável. Tal entendimento decorre da análise das condições de instalação, as quais traduzem a avaliação prévia das melhores soluções e o acompanhamento desenvolvido desde as fases iniciais de projecto até à realização de testes preliminares de início de funcionamento, visando a minimização dos efeitos associados às potenciais fontes de incerteza. O desenvolvimento dos estudos conducentes à avaliação das incertezas de medição permitiu, também, a identificação de potenciais elementos de melhoria do desempenho do sistema de medição.

Quadro 4 – Balanço de incertezas de medição na gama 10 % a 100 %

Componente de incerteza x_i	Fonte de incerteza	Função de probabilidade adoptada *	Valor da incerteza padrão ** $u(x_i)$	Coefficiente $c_i \equiv \frac{\partial f}{\partial x_i}$	$c_i u(x_i)$	Graus de liberdade ν_i
δQ_1	Regime dinâmico do escoamento	N	$\pm(0,1\%)$	1	$5,77 \cdot 10^{-2}\%$	50
δQ_2	Perfil de velocidades	N	$\pm(0,02\%)$	1	$2,0 \cdot 10^{-2}\%$	50
δQ_3	Geometria das condutas	R	$\pm(0,05\%) / \sqrt{3}$	1	$2,89 \cdot 10^{-2}\%$	50
δQ_4	Juntas de desmontagem	N/A	0 %	1	0	–
δQ_5	Alinhamento e inclinação das condutas	N/A	0 %	1	0	–
δQ_6	Equipotencialização das condutas	N/A	0 %	1	0	–
δQ_7	Presença de ar nas condutas	N/A	0 %	1	0	–
δQ_8	Inversão do sentido de escoamento	N/A	0 %	1	0	–
δQ_9	Condições ambientais I (temperatura)	T	$\pm[(5,0\text{ °C})] / \sqrt{6}$	κ_θ	$2,0 \cdot 10^{-2}\%$	50
δQ_{10}	Condições ambientais I (pressão)	T	$\pm[(5,0\text{ bar})] / \sqrt{6}$	κ_p	$2,5 \cdot 10^{-2}\%$	50
δQ_{11}	Cones de transição	N/A	0 %	1	0	–
δQ_{12}	Dimensionamento	N/A	0 %	1	0	–
δQ_{13}	Posicionamento dos eléctrodos	N/A	0 %	1	0	–
δQ_{14}	Interferência de campos electromagnéticos	N/A	0 %	1	0	–
δQ_{15}	Excitação magnética	R	$\pm(0,01\%) / \sqrt{3}$	1	$5,77 \cdot 10^{-3}\%$	50
δQ_{16}	Deriva de zero e de sinais de referência	R	$\pm(0,01\%) / \sqrt{3}$	1	$5,77 \cdot 10^{-3}\%$	50
δQ_{17}	Parametrização	N/A	0 %	1	0	–
δQ_{18}	Fontes de alimentação de energia	N/A	0 %	1	0	–
δQ_{19}	Variação da impedância interna	N/A	0 %	1	0	–
δQ_{20}	Condições ambientais II (temperatura)	T	$\pm(0,01\%) / \sqrt{3}$	1	$5,77 \cdot 10^{-3}\%$	50
δQ_{21}	Condições ambientais II (pressão)	T	$\pm(0,01\%) / \sqrt{3}$	1	$5,77 \cdot 10^{-3}\%$	50
δQ_{22}	Ligações à terra	N/A	0 %	1	0	–
δQ_{23}	Amplificação de sinais	R	$\pm(0,01\%) / \sqrt{3}$	1	$5,77 \cdot 10^{-3}\%$	50
δQ_{24}	Ruído intrínseco	R	$\pm(0,01\%) / \sqrt{3}$	1	$5,77 \cdot 10^{-3}\%$	50
δQ_{25}	Diferenças de potencial entre condutas	N/A	0 %	1	0	–
δQ_{26}	Condicionamento de sinais	R	$\pm(0,1\%) / \sqrt{3}$	1	$5,77 \cdot 10^{-2}\%$	50
δQ_{27}	Efeito da temperatura na instrumentação	T	$\pm[(5,0\text{ °C})] / \sqrt{6}$	κ_θ	$2 \cdot 10^{-3}\%$	50
δQ_{28}	Condutividade eléctrica do líquido	N/A	0 %	1	0	–
δQ_{29}	Variabilidade da mensuranda — caudal	N	$\pm(0,01\%)$	1	$1,0 \cdot 10^{-2}\%$	50
ε	Desvios residuais de calibração	N	$\pm(0,02\%)$	1	$2,0 \cdot 10^{-2}\%$	50
Q_{lido}	Resolução da instrumentação	R	$\pm(0,01\%) / \sqrt{3}$	1	$5,77 \cdot 10^{-3}\%$	50
	Repetibilidade das observações	N	$\pm(0,01\%) / \sqrt{3}$	1	$5,77 \cdot 10^{-3}\%$	29
δQ_{19}	Parametrização primário-secundário	R	$\pm(0\%) / \sqrt{3}$	1	0	50
δQ_{20}	Processamento computacional	R	$\pm(0,05\%) / \sqrt{3}$	1	$2,89 \cdot 10^{-2}\%$	50

* R – rectangular ou uniforme centrada, T – triangular centrada, N – Normal, U – Arcoseno ou de configuração U.

** Os valores de $u(x_i)$ apresentados incorporam o valor relativo associado ao limite de variação ou desvio padrão da grandeza em causa dividido por um termo (raiz quadrada de um número), associado à expressão do desvio padrão relativo à função densidade de probabilidade adoptada. Por exemplo, no caso de uma distribuição rectangular com intervalo $[-a, +a]$ a expressão da variância é igual a $(a^2/3)$ e o desvio padrão respectivo igual a $(a/\sqrt{3})$.

Nota adicional: $\kappa_\theta = \Delta Q / \Delta T$. $\kappa_p = \Delta Q / \Delta p$.

Relativamente à quantificação das contribuições para a avaliação das melhores incertezas de medição, observa-se a existência de um conjunto de grandezas cuja contribuição é nula. Tal significa que a sua influência, embora exista num contexto potencial, no caso específico da instalação laboratorial do LEHid considera-se essa influência desprezável, apontando-se em seguida e caso a caso, a motivação subjacente à tomada de decisão.

- *Juntas de desmontagem* – a instalação dispõe de juntas de desmontagem, as quais são colocadas cumprindo os requisitos normativos no que se refere à distância face ao elemento primário do caudalímetro electromagnético e, como tal, pode-se considerar que não afectam a medição;
- *Alinhamento e inclinação das condutas* – a instalação das condutas cumpriu requisitos relativamente ao alinhamento e à inclinação, assegurando a minimização da influência relativa a estas fontes de incerteza;
- *Equipotencialização das condutas* – todas as condutas e elementos de ligação encontram-se devidamente ligados com cabos que permitem efectuar a equipotencialização evitando, dessa forma, a criação de potenciais gerados pelo escoamento que possam afectar a medição do caudal;
- *Presença de ar nas condutas* – na fase preliminar à realização dos ensaios, o procedimento adoptado impõe a realização de escoamento durante períodos de tempo necessários para se atingir um regime próximo do estacionário, durante o qual a eventual presença de ar nas condutas é removida;
- *Inversão no sentido de escoamento* – este fenómeno é evitado, por um lado, pelo facto do sentido do escoamento resultar de uma bombagem permanente e, por outro lado, por se considerar a inexistência de inclinação significativa das condutas que poderia provocar o aparecimento deste fenómeno;
- *Existência de cones de transição* – no LEHid são utilizados cones de transição de perfil hidrodinâmico evitando a introdução de perturbações (nomeadamente, turbulência) no escoamento que afectariam a medição;
- *Dimensionamento* – o dimensionamento cumpre os requisitos normativos estabelecidos para a instalação do tipo de caudalímetros a calibrar considerando-se, por isso,

que não deve ser incorporada qualquer contribuição para a incerteza proveniente desta componente;

- *Posicionamento dos eléctrodos* – na instalação dos eléctrodos no elemento primário do caudalímetro electromagnético procurou-se assegurar que a sua localização não difere significativamente do recomendado pelo fabricante, permitindo considerar que a sua contribuição para a incerteza de medição é desprezável;
- *Interferência mútua de campos electromagnéticos* – com o objectivo de efectuar uma avaliação desta contribuição, foram efectuados ensaios preliminares que permitiram verificar que a operação simultânea dos caudalímetros electromagnéticos nas diferentes linhas produz uma interferência electromagnética mútua (uma das consequências observadas consiste na ocorrência de uma deriva de curto prazo, cujo efeito a constitui como uma potencial fonte de influência – e incerteza – das observações experimentais). De modo a que este efeito não constitua uma contribuição para a incerteza da medição, o procedimento de calibração impõe o requisito de não funcionamento simultâneo dos caudalímetros de referência permitindo, dessa forma, que se possa considerar que a contribuição devido a esta componente seja desprezável;
- *Parametrização* – considera-se que a contribuição devido a esta componente se encontra indirectamente contabilizada na contribuição relacionada com a repetibilidade experimental;
- *Condutividade eléctrica do líquido* – contribuição considerada desprezável por comparação com outras contribuições mais significativas;
- *Fontes de alimentação de energia* – contribuição desprezável por se considerar a estabilidade adequada das fontes de alimentação dos sistemas;
- *Variações de impedância interna* – considera-se que a componente de incerteza proveniente da impedância interna é desprezável face às condições de estabilização concretizadas no sistema;
- *Ligações à terra* – a montagem e instalação do laboratório incluiu especificações concretizadas relativamente à realização apropriada de terras, bem como a ligação dos diversos elementos constituintes à terra, permitindo considerar que esta componente não afecta significativamente as medições efectuadas;

- *Diferenças de potencial entre condutas* – a realização de ligações de equipotencialização entre condutas combinada com ligações à terra permitem considerar a contribuição associada a esta componente como sendo desprezável;

No que concerne à quantificação associada ao *regime dinâmico do escoamento* e à variabilidade da mensuranda, foram efectuados ensaios em cada uma das linhas de ensaio, para diversos patamares em cada uma das gamas de medição. As gamas de medição dessas linhas são as seguintes:

- Gama de medição aplicável à linha de DN100: 1 L/s a 50 L/s;
- Gama de medição aplicável à linha de DN150: 1,6 L/s a 100 L/s;
- Gama de medição aplicável à linha de DN200: 2 L/s a 200 L/s;
- Gama de medição aplicável à linha de DN300: 5 L/s a 500 L/s.

Os resultados obtidos, com base em ensaios experimentais, encontram-se no Quadro 5, suportados na repetição de 7 ensaios de caudal em cada patamar, contendo cada ensaio 30 observações. A contribuição para a incerteza de medição associada ao regime dinâmico do escoamento corresponde ao valor médio de desvios padrão experimentais da média relativos.

Quadro 5 – Incertezas de medição padrão relativas associadas ao regime dinâmico do escoamento para diferentes valores de caudal e diferentes linhas de ensaio do LEHid

DN100		DN150		DN200		DN300	
1 L/s	± 0,25 %	1 L/s	± 0,09 %	3 L/s	± 0,21 %	4 L/s	± 0,22 %
3 L/s	± 0,12 %	5 L/s	± 0,09 %	14 L/s	± 0,09 %	18 L/s	± 0,13 %
5 L/s	± 0,09 %	10 L/s	± 0,06 %	28 L/s	± 0,06 %	35 L/s	± 0,11 %
13 L/s	± 0,03 %	25 L/s	± 0,03 %	70 L/s	± 0,04 %	84 L/s	± 0,05 %
25 L/s	± 0,02 %	50 L/s	± 0,03 %	140 L/s	± 0,03 %	175 L/s	± 0,03 %
38 L/s	± 0,02 %	75 L/s	± 0,09 %	210 L/s	± 0,03 %	260 L/s	± 0,02 %
50 L/s	± 0,02 %	100 L/s	± 0,10 %	280 L/s	± 0,04 %	350 L/s	± 0,02 %

As diferenças observadas evidenciam valores mais elevados na parte inicial das gamas de medição, pelo que se decidiu proceder a uma avaliação discriminada dos resultados nessas parcelas iniciais. Para tal, foram realizados ensaios entre cerca de 2 % e 10% da gama de medição de cada linha de ensaio. Os resultados obtidos encontram-se no Quadro seguinte.

Quadro 6 – Incertezas de medição padrão relativas associadas ao regime dinâmico do escoamento para diferentes valores de caudal e diferentes linhas de ensaio obtidas entre 2% e 10% da gama de medição do LEHid

Patamar da gama	DN 100	DN 150	DN 200	DN 300
≈ 2%	± 0,4 %	± 0,5 %	± 0,5 %	± 0,3 %
≈ 5 %	± 0,2 %	± 0,2 %	± 0,3 %	± 0,2 %
≈ 8 %	± 0,1 %	± 0,1 %	± 0,2 %	± 0,1 %
≈ 10 %	± 0,1 %	± 0,1 %	± 0,1 %	± 0,1 %

De acordo com estes resultados, propõe-se uma diferenciação por sub-gamas das contribuições associadas ao *regime dinâmico do escoamento* aplicadas na avaliação das incertezas de medição. Estas contribuições devem ser contabilizadas consoante a sub-gama a que se aplicam, na parcela relacionada com a componente de incerteza “*regime dinâmico do escoamento*” presente no Quadro 3 deste documento.

Quadro 7 – Incertezas de medição padrão relativas associadas ao regime dinâmico do escoamento adoptadas consoante a sub-gama de medição

Gamas	Incerteza-padrão
Até 5%	± 0,5 %
de 5 % a 10 %	± 0,15 %
A partir de 10 %	± 0,1 %

Relativamente à componente de incerteza associada ao perfil de velocidades, a sua estimativa foi baseada em informação do fabricante, não havendo estudos conhecidos que permitam conhecer, com rigor, este efeito nas condições de utilização da instalação do LEHid.

No que se refere à repetibilidade, o valor adoptado resulta da realização de um conjunto de observações em condições o mais próximas possível da estacionariedade, permitindo a obtenção de uma estimativa majorada desta componente.

A estimativa da componente associada à resolução tem como suporte a informação do fabricante confirmada com a observação efectiva das características dos caudalímetros electromagnéticos de transferência instalados nas linhas de calibração.

A avaliação das melhores incertezas de medição resulta da concretização dos cálculos associados à tabela de balanço de incertezas apresentada no Quadro 4 considerando as três sub-gamas da escala de medição decorrentes da diferenciação da contribuição relativa ao regime dinâmico de escoamento.

Quadro 8 – Incertezas de medição padrão relativas associadas ao regime dinâmico do escoamento adoptadas consoante a sub-gama de medição

Gamas	Incerteza-padrão	k (ν_{eff})	Incerteza de medição expandida (95%)
Até 5%	$\pm 0,5$ %	2,00 (52)	$\pm 1,0$ %
de 5 % a 10 %	$\pm 0,15$ %	2,00 (85)	$\pm 0,34$ %
A partir de 10 %	$\pm 0,13$ %	2,00 (130)	$\pm 0,26$ %

6. CONCLUSÕES

O presente relatório surge no seguimento do relatório intitulado “Avaliação das melhores incertezas de medição de caudal associadas aos padrões de referência do LEHid/LNEC usando o Método de Monte Carlo” [2], inserindo-se no processo de avaliação das melhores incertezas de medição associadas à calibração de caudalímetros electromagnéticos tubulares de referência no LEHid. Na cadeia de rastreabilidade estabelecida no LEHid, estes caudalímetros desempenham as funções de padrões de transferência da grandeza mensurável para caudalímetros a calibrar.

No contexto da acreditação de um laboratório metrológico como o LEHid, a descrição do procedimento de avaliação de incertezas de medição é um elemento preponderante, permitindo evidenciar as suas melhores capacidades de medição e avaliar a capacidade dos sistemas para responder às exigências de exactidão associadas aos requisitos de calibração inerentes à actividade que se pretende desenvolver.

Do estudo desenvolvido resultaram valores de melhores incertezas aplicáveis em três sub-gamas da gama de medição do sistema de medição de caudal do LEHid, as quais foram apresentadas na Tabela 8, que se reproduz a seguir.

Quadro 8 – Incertezas de medição padrão relativas associadas ao regime dinâmico do escoamento adoptadas consoante a sub-gama de medição

Gamas	Incerteza-padrão	k (v_{eff})	Incerteza de medição expandida (95%)
Até 5%	$\pm 0,5$ %	2,00 (52)	$\pm 1,0$ %
de 5 % a 10 %	$\pm 0,15$ %	2,00 (85)	$\pm 0,34$ %
A partir de 10 %	$\pm 0,13$ %	2,00 (130)	$\pm 0,26$ %

Refira-se que as incertezas de medição indicadas são válidas para as condições actuais de funcionamento dos sistemas de medição e para os resultados de calibração dos padrões de referência do laboratório; qualquer alteração dessas condições, nomeadamente, a realização de novas calibrações (no âmbito do procedimento de manutenção metrológica), requer a revisão do estudo de avaliação das incertezas de medição.

VISTOS

O Director do CIC



Carlos Oliveira Costa

AUTORIA



Álvaro Silva Ribeiro

Lic.º Física Tecnológica, Doutor
Investigador Auxiliar



José Duarte Henriques

Eng.º Civil, Especialista do LNEC

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] GUM – *Guide for the expression of uncertainty in measurement*. Genève (Suíça): ISO – International Organization for Standardization, 1993 (reeditado em 1995).
- [2] Ribeiro, A. S.; Costa, C. O.; Henriques, J. D. – Avaliação das melhores incertezas de medição de caudal associadas aos padrões de referência do LEHid/LNEC usando o Método de Monte Carlo. Lisboa: LNEC, 2007. Relatório LNEC 102/07.
- [3] VIM – *International vocabulary of basic and general terms in Metrology*. Genève (Suíça): ISO – International Organization for Standardization, 1994.
- [4] Almeida, G. – *Sistema Internacional de Unidades SI. Grandezas e unidades físicas: Terminologia, símbolos e recomendações*, 2ª Edição. Lisboa: Plátano Edições técnicas, 1997.
- [5] ISO 4185. 1990. Measurement of liquid flow in closed conduits – Weighing method. Genève (Suíça): ISO – International Organization for Standardization.
- [6] EA-10/18. 2005. Guidelines on the calibration of nonautomatic weighing instruments. Paris (França): EA – European co-operation for Accreditation.
- [7] Silva Ribeiro, A. – Avaliação de incertezas de medição em sistemas complexos lineares e não-lineares. Lisboa: Universidade de Lisboa, 2006. Tese de Doutoramento.
- [8] ISO 9104. 1991. Measurement of fluid flow in closed conduits – Methods of evaluating the performance of electromagnetic flow-meters for liquids. Genève (Suíça): ISO – International Organization for Standardization.
- [9] Certificado de Calibração 201.23.03/93. Lisboa: Direcção Regional de Economia de Lisboa e Vale do Tejo, 2003.
- [10] Certificado de Calibração 201.23.03/94. Lisboa: Direcção Regional de Economia de Lisboa e Vale do Tejo, 2003.
- [11] Certificado de Calibração 1719/04. Lisboa: Laboratório de Metrologia da TAP Portugal, 2004.
- [12] Certificado de Calibração 1726/04. Lisboa: Laboratório de Metrologia da TAP Portugal, 2004.
- [13] Certificado de Calibração 1813/04. Lisboa: Laboratório de Metrologia da TAP Portugal, 2004.
- [14] Henriques, J. D.; Palma, J. C. P.; Ribeiro, A. S. – Medição de caudal em sistemas de abastecimento de água e de saneamento de águas residuais urbanas. Série “Guias Técnicos” do IRAR, n.º 9, Lisboa: Instituto Regulador de Águas e Resíduos e Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 2007.
- [15] ISO 6817. 1992. Measurement of liquid flow in closed conduits – Method using electromagnetic flowmeters. Genève (Suíça): ISO – International Organization for Standardization.
- [16] ISO 9104. 1991. Measurement of liquid flow in closed conduits – Methods of evaluating the performance of electromagnetic flow-meters for liquids. Genève (Suíça): ISO – International Organization for Standardization.

