



Coordenação-Geral de Acreditação

**ORIENTAÇÕES PARA A ESTIMATIVA DA INCERTEZA
DE MEDIÇÃO E EXPRESSÃO DA CAPACIDADE DE
MEDIÇÃO E CALIBRAÇÃO NA ÁREA DE VAZÃO E
VELOCIDADE DE FLUIDOS E EM ENSAIOS EM
HIDRÔMETROS**

Documento de caráter orientativo

DOQ-CGCRE-090

(Revisão 01 – JAN/2025)



SUMÁRIO

- 1 Objetivo
- 2 Campo de aplicação
- 3 Responsabilidade
- 4 Histórico da revisão
- 5 Documentos de referência
- 6 Documentos complementares
- 7 Siglas
- 8 Terminologia
- 9 Condições gerais
- 10 Exemplos de fontes de incerteza de medição na calibração de medidores na área de vazão e velocidade de fluidos e em ensaios de hidrômetros

1 OBJETIVO

O presente documento fornece orientações para a estimativa da incerteza de medição associada a resultados de calibração de instrumentos medidores de vazão e de velocidade de fluidos e em ensaios de hidrômetros, bem como trata da expressão da capacidade de medição e calibração (CMC) para a definição do escopo de acreditação de laboratórios que atuam nesta área.

Este documento foi elaborado de acordo com as normativas nacionais e internacionais e contém aplicações sobre os requisitos da acreditação. Caso o laboratório siga estas orientações, o laboratório atenderá aos respectivos requisitos; caso contrário, o laboratório deve demonstrar como é assegurado o seu atendimento. As não conformidades constatadas em uma avaliação são registradas em relação ao requisito da acreditação e não em relação a este documento orientativo, porém, as diretrizes deste documento serão consideradas pelos avaliadores e especialistas.

2 CAMPO DE APLICAÇÃO

Este documento aplica-se à Dicla, aos laboratórios de calibração acreditados e postulantes à acreditação no grupo de Vazão e Velocidade de Fluidos da NIT-Dicla-012, aos laboratórios que realizam ensaios em hidrômetros e aos avaliadores da Cgcre e especialistas destas áreas.

3 RESPONSABILIDADE

A responsabilidade pela aprovação de qualquer revisão deste documento é da Dicla/Cgcre.

4 HISTÓRICO DA REVISÃO

Revisão	Data	Itens revisados
1	Jan/2025	▪ Atualizado o cabeçalho e a formatação da Norma para seguir a formatação atual.



5 DOCUMENTOS DE REFERÊNCIA

Para referências, devem ser utilizadas as últimas edições dos documentos a seguir, incluindo eventuais emendas:

GUM	Avaliação de dados de medição: Guia para a expressão de incerteza de medição – GUM 2008.
SI	Sistema Internacional de Unidades, 1ª Edição Brasileira da 8ª Edição do BIPM, INMETRO, Rio de Janeiro, 2012.

6 DOCUMENTOS COMPLEMENTARES

Para referências, devem ser utilizadas as últimas edições dos documentos a seguir, incluindo eventuais emendas:

ABNT NBR ISO 4185	Medição de vazão de líquidos em dutos fechados – Método gravimétrico
ABNT NBR ISO/IEC 17025	Requisitos gerais para a competência de laboratórios de ensaio e calibração
DOQ-Cgcre-020	Definições de termos utilizados nos documentos relacionados à acreditação de laboratórios, produtores de materiais de referência e provedores de ensaios de proficiência
DOQ-Cgcre-057	Orientações para a apresentação e expressão de resultados de calibração de medidores de vazão e totalizadores de fluidos
EA-4/02 M:2013	Evaluation of the Uncertainty of Measurement in Calibration
ISO 4267-2	Petroleum and Liquid Petroleum Products – Calculation of Oil Quantities – Part 2: Dynamic Measurement
NIE-Dimel-043	Cálculo da incerteza de medição na calibração de medidas materializadas de volume pelo método gravimétrico
NIE-Dimel-045	Calibração de medidas materializadas de volume pelo método gravimétrico
NIT-Dicla-012	Relação padronizada de serviços acreditados para laboratórios de calibração
NIT-Dicla-021	Expressão da incerteza de medição por laboratórios de calibração
OIML R120:2010	Regulamento Técnico Metrológico a que se refere a Portaria Inmetro Nº 246, de 17 de outubro de 2000.
Portaria Inmetro nº 246 de 17 de outubro de 2000	Aprova o Regulamento Técnico Metrológico, estabelecendo as condições a que devem satisfazer os hidrômetros para água fria, de vazão nominal até quinze metros cúbicos por hora
VIM	Vocabulário Internacional de Metrologia – Conceitos fundamentais e gerais e termos associados (VIM:2012), 1ª edição Luso Brasileira (VIM:2012); versão luso brasileira do documento JCGM 200:2012, International vocabulary of metrology — basic and general concepts and associated terms (VIM), 3rd edition issued by BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP and OIML



7 SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
API	<i>American Petroleum Institute (Instituto Americano de Petróleo)</i>
Cgcre	Coordenação-Geral de Acreditação
CMC	Capacidade de medição e calibração
CT-13	Comissão Técnica de Assessoramento às Atividades de Acreditação da Cgcre na Área de Vazão e Velocidade de Fluidos
Dicla	Divisão de Acreditação de Laboratórios
IEC	<i>International Electrotechnical Commission (Comissão Eletrotécnica Internacional)</i>
Inmetro	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
ISO	<i>International Organization for Standardization (Organização Internacional de Normalização)</i>
MMV	Medida Materializada de Volume
NBR	Norma Brasileira
SI	Sistema Internacional de Unidades
VIM	Vocabulário Internacional de Metrologia

8 TERMINOLOGIA

A este documento são aplicáveis as definições do Vocabulário Internacional de Metrologia: conceitos fundamentais e gerais e termos associados (VIM 2012), do Sistema Internacional de Unidades (SI), da norma NIT-Dicla-012, do DOQ-Cgcre-020 e do DOQ-Cgcre-057.

9 CONDIÇÕES GERAIS

Os requisitos gerais para a incerteza de medição estão estabelecidos nas seções 7.2.2.1, 7.6 e 7.8 da norma ABNT NBR ISO/IEC 17025. A Cgcre também estabelece requisitos gerais a respeito da incerteza de medição e da capacidade de medição e calibração na norma NIT-Dicla-021 aplicável a laboratórios de calibração.

É importante ressaltar que, conforme estabelecido na NIT-Dicla-021, a incerteza de medição deve ser sempre expressa na unidade de medida do mensurando ou como um termo relativo ao valor declarado do mensurando. Por exemplo:

a) Na calibração de um medidor de vazão volumétrica de água, espera-se que a expressão tanto da indicação do instrumento a ser calibrado quanto do valor de referência seja em vazão volumétrica (por ex.: 480,0 m³/h) e, assim, a incerteza de medição seja expressa também na unidade de vazão volumétrica (por ex.: 1,2 m³/h) ou como uma porcentagem do valor da vazão volumétrica de referência (por ex.: 0,25 % do valor da vazão volumétrica de referência).

b) Na calibração de um totalizador de volume de hidrocarboneto líquido, espera-se que a expressão tanto da indicação do medidor a ser calibrado quanto do valor de referência seja em volume (por ex.: 250,32 m³) (ou em pulsos que possam ser convertidos em volume por meio de um fator de conversão) e, assim, a incerteza de medição seja expressa também na unidade de medida de volume (por ex.: 0,38 m³) ou como uma porcentagem do valor do volume totalizado de referência (por ex.: 0,15 % do valor do volume totalizado de referência).



c) Na calibração de um medidor de velocidade de ar, espera-se que a expressão tanto da indicação do anemômetro a ser calibrado quanto do valor de referência seja em velocidade (por ex.: 10,55 m/s) (ou em pulsos, corrente elétrica ou frequência, que possam ser convertidos em velocidade) e, assim, a incerteza de medição seja expressa também na unidade de medida de velocidade (por ex.: 0,05 m/s) ou como uma porcentagem do valor da velocidade de referência (por ex.: 0,47 % do valor da velocidade de referência).

A NIT-Dicla-012 estabelece diferenciação entre os serviços de calibração de medidores de vazão volumétrica ou mássica de fluidos e os de calibração de totalizadores de massa ou de volume de fluidos. É importante destacar que o cliente deve definir qual é o serviço acreditado a ser utilizado para uma determinada calibração, bem como a necessidade dos resultados serem apresentados em vazão volumétrica ou mássica ou totalização de volume ou de massa de fluidos. Portanto, recomenda-se que o laboratório, ao definir os serviços que irão compor o seu escopo de acreditação, considere estas especificidades e selecione aqueles que atendam às necessidades de seus clientes.

Este documento é resultado do trabalho da Comissão Técnica de Assessoramento às Atividades de Acreditação da Cgcre na Área de Vazão e Velocidade de Fluidos (CT-13).

10 EXEMPLOS DE FONTES DE INCERTEZA DE MEDIÇÃO NA CALIBRAÇÃO DE MEDIDORES NA ÁREA DE VAZÃO E VELOCIDADE DE FLUIDOS E EM ENSAIOS DE HIDRÔMETROS

Com a finalidade de orientar o procedimento de avaliação das incertezas associadas a resultados de calibração de instrumentos utilizados na área de vazão e velocidade de fluidos, são apresentados a seguir exemplos nos quais são descritos brevemente os fundamentos básicos da calibração ou ensaio e as possíveis fontes de incerteza a serem consideradas no processo.

Como os exemplos apresentados não contemplam todos os tipos de serviços realizados pelos laboratórios, as particularidades inerentes ao tipo de medidor (medidor de vazão volumétrica, de vazão mássica ou totalizador de volume ou de massa de fluidos) e as especificidades do método de calibração ou ensaio utilizado deveriam ser consideradas na análise das incertezas, caso a caso.

10.1 Calibração de totalizador de volume de água por meio do método volumétrico

10.1.1 Aplicação

Conforme a NIT-Dicla-012, o exemplo a seguir se aplica ao serviço de calibração de código: 2436 *Totalizador de Volume de Água ou de Outros Líquidos, Exceto Hidrocarbonetos*. O método de calibração utilizado neste exemplo é o método volumétrico por meio do uso de um vaso padrão.

10.1.2 Breve descrição do método

A calibração de um totalizador de volume de água mecânico ou eletrônico por meio do método volumétrico objetiva a determinação dos valores dos volumes de referência de água (mensurando) em função da vazão ao longo da faixa de operação aplicável ao instrumento. Neste método de calibração, a água em escoamento na linha, sob uma determinada vazão, é coletada em um vaso padrão calibrado, também denominado como medida materializada de volume, o que permite a determinação do volume de referência de água na medição e que será comparado com o volume totalizado indicado pelo instrumento em calibração.



10.1.3 Modelo matemático

O volume de água coletado no vaso padrão durante a medição é igual ao seu volume de base, corrigido pelo efeito de expansão ou contração térmica do vaso se a sua temperatura for diferente da temperatura de base ou de referência. Como o recipiente constitui um volume, esta correção é equivalente à expansão ou contração cúbica do material utilizado, sendo que, para esse caso, assume-se que seja igual a três vezes a expansão térmica linear do material. Dessa forma, a correção pode ser dada pela seguinte expressão:

$$V_p = V_b \cdot [1 + 3 \gamma_p (T_p - T_b)]$$

onde V_p é o volume de água contido no vaso padrão, V_b é o volume do vaso padrão referido à temperatura de base (normalmente adotada como 20 °C), γ_p é o coeficiente de dilatação linear do material de construção do vaso padrão, T_p é a temperatura do vaso padrão e T_b é a temperatura de base.

Para se determinar o valor do volume de referência de água que passou através do totalizador em calibração antes de fluir para o vaso padrão, é necessário corrigir o volume de água contido no vaso levando-se em conta a expansão ou contração volumétrica do líquido devido à diferença de temperaturas. Assim:

$$V_{ref} = V_p \cdot [1 + \gamma_a (T_m - T_{ap})]$$

onde V_{ref} é o volume de referência da água que passou pelo medidor, referido à sua temperatura no medidor, γ_a é o coeficiente de dilatação volumétrica da água, T_m é a temperatura da água no medidor e T_{ap} é a temperatura da água no vaso padrão.

Com a determinação do valor do volume de água de referência que fluiu através do medidor sob calibração, é possível determinar o seu erro relativo percentual de medida para a vazão de operação específica. Ou seja:

$$\varepsilon = 100 \cdot \frac{V_{ind} - V_{ref}}{V_{ref}} \quad [\%]$$

onde ε é o erro relativo da medida obtida com o medidor sob calibração na vazão específica de operação, expresso em termos percentuais, e V_{ind} é o volume de água medido e indicado pelo medidor sob calibração.

10.1.4 Fontes de incerteza

No processo de calibração de um totalizador de volume de água mecânico ou eletrônico por meio do método volumétrico, devem ser consideradas as influências dos seguintes fatores: o medidor padrão e os instrumentos de medição auxiliares, o próprio instrumento de medição submetido à calibração, o fluido utilizado na calibração, aspectos relacionados à operação da instalação utilizada e ao tratamento de dados realizado na calibração.

As principais fontes de incerteza que afetam a confiabilidade dos resultados neste método volumétrico de calibração são apresentadas a seguir:

**10.1.4.1 Fontes de incerteza associadas ao medidor padrão e aos instrumentos de medição auxiliares:**

- a) incerteza associada aos resultados da calibração do padrão (medida materializada de volume) utilizado, obtida do seu certificado de calibração e normalmente expressa na forma de uma incerteza expandida, com distribuição normal e fator de abrangência $k = 2$ para um nível da confiança de aproximadamente 95 %;
- b) incerteza decorrente da dispersão dos valores medidos com o uso do padrão em cada vazão de operação calibrada do totalizador e que pode ser avaliada por meio do desvio padrão das medidas ou do desvio padrão da média;
- c) incerteza associada à eventual influência dos parâmetros ambientais (temperatura, insolação, vento, vibração mecânica etc.) sobre o desempenho do padrão e instrumentos de medição auxiliares. Pode ser estimada a partir de informações contidas no manual do fabricante ou a partir da experiência que o usuário do instrumento possui sobre o mesmo;
- d) incerteza decorrente da limitação de resolução do dispositivo mostrador do padrão. Pode ser obtida diretamente da escala do dispositivo mostrador do padrão;
- e) incerteza associada à eventual deriva instrumental apresentada pelo padrão. Pode ser avaliada a partir dos dados do histórico de calibrações do padrão;
- f) incerteza associada ao valor do coeficiente de dilatação volumétrica do material de construção do vaso padrão ($\gamma \square p$). Pode ser obtida no manual do fabricante do padrão ou de tabelas de propriedades de materiais;
- g) incerteza decorrente da utilização do padrão sob condições de uso diferentes das de sua calibração. Pode ser importante considerar os efeitos decorrentes de mudanças no tipo de fluido, da sua viscosidade, mudanças de instalação e de operador etc.; e
- h) incerteza oriunda dos equipamentos ou acessórios auxiliares utilizados no sistema de medição.

10.1.4.2 Fontes de incerteza associadas ao instrumento de medição submetido à calibração:

- a) incerteza decorrente da dispersão dos valores indicados pelo medidor em calibração em cada vazão de operação e que pode ser avaliada por meio do desvio padrão das medidas;
- b) incerteza associada à eventual influência dos parâmetros ambientais (temperatura, insolação, vento, vibração mecânica, campo eletromagnético etc.) sobre o desempenho do medidor em calibração. Pode ser estimada a partir de informações contidas no manual do fabricante ou a partir da experiência que o usuário do instrumento possui sobre o mesmo;
- c) incerteza devido à limitação de resolução do dispositivo mostrador do medidor em calibração. Pode ser obtida diretamente do dispositivo mostrador do instrumento ou do manual do fabricante. Normalmente, esta incerteza deveria ser considerada duas vezes no cálculo, dado que, na calibração do medidor, a referida incerteza afeta as leituras dos volumes inicial e final;
- d) incerteza referente à possibilidade de perda de pulsos pelo medidor em calibração, estimada a partir da suposição do número de pulsos que podem ser perdidos durante a medição. Deve ser considerada apenas para instrumentos com saída de sinal pulsada;
- e) incerteza associada ao valor do coeficiente de dilatação térmica do material de fabricação do medidor em calibração. Pode ser obtida no manual do fabricante do medidor ou de tabelas de propriedades de materiais; e
- f) incerteza associada à eventual presença de efeitos de histerese no medidor em calibração. Caso a histerese exista e não seja corrigida, deve ser considerada como fonte de incerteza na medida.



10.1.4.3 Fontes de incerteza associadas ao fluido utilizado na calibração:

- a) incertezas associadas aos valores da massa específica do fluido de calibração presentes, respectivamente, no padrão e no medidor em calibração. No caso da massa específica ser medida, considerar as componentes relativas ao instrumento de medição como calibração, resolução, variação durante a prova. No caso de se utilizar uma equação de alguma fonte (norma, tabela), como, por exemplo, a norma API, buscar na referência qual é a incerteza indicada;
- b) incertezas associadas à determinação dos valores das temperaturas do fluido presentes, respectivamente, no padrão e no medidor em calibração. Para a determinação dessa incerteza, todas as possíveis fontes de incerteza associadas à medição deveriam ser consideradas; e
- c) incerteza associada a uma possível variação dos parâmetros de calibração (principalmente temperatura) entre o início e o final da medição e que acaba influenciando na massa específica do fluido presente na linha de conexão entre o medidor em calibração e o padrão, resultando no conhecido *efeito de armazenamento de massa*. Pode ser obtida a partir da estimativa da taxa de variação do volume entre os dois medidores em função da variação da temperatura ocorrida durante a medição.

10.1.4.4 Fontes de incerteza associadas à operação da instalação utilizada na calibração:

- a) incertezas associadas às grandezas de influência que podem afetar as medidas no processo de calibração (exemplos: erro de paralaxe na leitura de uma indicação por meio de ponteiro, eventual presença de bolhas de ar ou vapor d'água na linha, gradientes de temperatura no medidor e na água etc.);
- b) incerteza devido à não estabilidade da vazão na linha de calibração durante o intervalo de medição. Pode ser avaliada com base nos dados obtidos da calibração; e
- c) incerteza decorrente do método de calibração utilizado. Exemplo: o uso de método de calibração de um totalizador de volume de líquido por meio da técnica *start-stop* e a influência decorrente do processo de estabilização da vazão no início e no final da medição. Pode ser avaliada de acordo com dados históricos da bancada, pode ser determinada durante a calibração ou com base na experiência do metrologista.

10.1.4.5 Fontes de incerteza associadas ao tratamento de dados realizado na calibração:

- a) incerteza decorrente da incapacidade do modelo matemático utilizado representar com perfeição o modelo físico da medição. Ou seja, a fórmula de correção utilizada para calcular o valor do volume de água totalizado na condição de referência pode não traduzir com exatidão a realização do modelo físico de medição da grandeza;
- b) incerteza associada à equação empírica utilizada no cálculo da massa específica da água. Pode ser avaliada a partir de informações contidas em referência técnicas ou normas internacionais; e
- c) incerteza associada à correlação entre as grandezas de entrada ou grandezas de influência envolvidas na calibração. Pode ser estimada a partir da avaliação de influências entre as variáveis por meio de cálculos estatísticos.

10.1.5 Expressão da CMC

A seguir, é apresentado um exemplo de expressão da CMC para o referido serviço de calibração:

Descrição do Serviço	Faixa	CMC
Totalizador de Volume de Água ou de Outros Líquidos, Exceto Hidrocarbonetos	0,6 m ³ /h até 60 m ³ /h	0,25 % do volume totalizado de referência



10.2 Calibração de totalizador de volume de água por meio do método gravimétrico

10.2.1 Aplicação

De acordo com a NIT-Dicla-012, o exemplo a seguir aplica-se ao serviço de código 2436 *Totalizador de Volume de Água ou de Outros Líquidos, Exceto Hidrocarbonetos*.

10.2.2 Breve descrição do método

A calibração de um totalizador de volume de água mecânico ou eletrônico por meio do método gravimétrico objetiva a determinação dos erros de medição em função da vazão para a faixa de operação aplicável ao instrumento. Neste método de calibração, a água em escoamento é coletada em um reservatório instalado sobre uma balança ou um sistema de pesagem calibrado. A quantidade de água coletada é pesada e, com o uso do valor da sua massa específica, é possível se determinar o volume de referência de água na medição e cujo valor será comparado com o volume de água totalizado pelo instrumento em calibração.

10.2.3 Modelo matemático

A massa de referência (m_{ref}) de água medida na balança ou no sistema de pesagem durante o intervalo de tempo de coleta é dada pela seguinte expressão (ABNT NBR ISO 4185):

$$m_{ref} = (m_f - m_i) \cdot \left(1 - \frac{\rho_{ar}}{\rho_{peso}}\right) / \left(1 - \frac{\rho_{ar}}{\rho_{H_2O}}\right)$$

onde m_i é a massa de água medida ao início da coleta, m_f é a massa de água medida ao final da coleta, ρ_{ar} é a massa específica do ar ambiente durante a pesagem da água, ρ_{peso} é a massa específica do material de fabricação dos pesos padrão utilizados na calibração da balança e ρ_{H_2O} é a massa específica da água na condição de pesagem.

O volume de referência (V_{ref}) de água que passou através do totalizador pode, então, ser determinado por meio da seguinte expressão:

$$V_{ref} = \frac{m_{ref}}{\rho_{H_2O_totalizador}}$$

onde $\rho_{H_2O_totalizador}$ é a massa específica da água na temperatura em que se encontrava no totalizador.

Com a determinação do valor do volume de água de referência que fluiu através do medidor sob calibração, é possível determinar o seu erro relativo porcentual de medição para a vazão de operação específica. Ou seja:

$$\varepsilon = 100 \cdot \frac{V_{ind} - V_{ref}}{V_{ref}} \quad [\%]$$

onde ε é o erro relativo da medida obtida com o medidor sob calibração na vazão específica de operação, expresso em termos porcentuais, e V_{ind} é o volume de água medido e indicado pelo medidor sob calibração.



10.2.4 Fontes de incerteza

As principais fontes de incerteza que afetam a confiabilidade dos resultados neste método gravimétrico de calibração são apresentadas a seguir:

10.2.4.1 Fontes de incerteza associadas ao **medidor padrão e aos instrumentos de medição auxiliares:**

- a) incerteza associada aos resultados da calibração do padrão (balança) utilizado, obtida do seu certificado de calibração e normalmente expressa na forma de uma incerteza expandida, com distribuição normal e fator de abrangência $k = 2$ para um nível da confiança de 95 %;
- b) incerteza decorrente da dispersão dos valores medidos com o uso do padrão em cada vazão de operação calibrada do totalizador e que pode ser avaliada por meio do desvio padrão das medidas ou do desvio padrão da média;
- c) incerteza associada à eventual influência dos parâmetros ambientais (temperatura, insolação, vento, vibração mecânica etc.) sobre o desempenho do padrão e instrumentos de medição auxiliares. Pode ser estimada a partir de informações contidas no manual do fabricante ou a partir da experiência que o usuário do instrumento possui sobre o mesmo;
- d) incerteza decorrente da limitação de resolução do dispositivo mostrador do padrão. Pode ser obtida diretamente do dispositivo mostrador do padrão ou no manual do fabricante. No caso, esta incerteza deveria ser considerada duas vezes no cálculo uma vez que, na calibração do medidor, a referida incerteza afeta as leituras das massas inicial e final;
- e) incerteza referente à correção imperfeita do valor medido pelo padrão e feita, por exemplo, com o uso da equação da linha de tendência determinada a partir do tratamento estatístico dos resultados da calibração da balança;
- f) incerteza associada à eventual deriva instrumental apresentada pelo padrão. Pode ser avaliada a partir dos dados do histórico de calibrações da balança;
- g) incerteza associada à eventual presença de efeitos de histerese no padrão. Caso a histerese exista e não seja corrigida, deve ser considerada como fonte de incerteza na medida; e
- h) incerteza decorrente da utilização do padrão sob condições de uso diferentes das de sua calibração. Pode ser importante considerar os efeitos decorrentes de mudanças na temperatura ambiente de operação em relação à de calibração, mudanças de instalação e de operador etc.

10.2.4.2 Fontes de incerteza associadas ao **instrumento de medição submetido à calibração:**

- a) incerteza decorrente da dispersão dos valores indicados pelo medidor em calibração em cada vazão de operação e que pode ser avaliada por meio do desvio padrão das medidas;
- b) incerteza associada à eventual influência dos parâmetros ambientais (temperatura, insolação, vento, vibração mecânica, campo eletromagnético etc.) sobre o desempenho do medidor em calibração. Pode ser estimada a partir de informações contidas no manual do fabricante ou a partir da experiência que o usuário do instrumento possui sobre o mesmo;
- c) incerteza devido à limitação de resolução do dispositivo mostrador do medidor em calibração. Pode ser obtida diretamente do dispositivo mostrador do instrumento ou do manual do fabricante. Normalmente, esta incerteza deveria ser considerada duas vezes no cálculo, dado que, na calibração do medidor, a referida incerteza afeta as leituras dos volumes inicial e final;
- d) incerteza referente à possibilidade de perda de pulsos pelo medidor em calibração, estimada a partir da suposição do número de pulsos que podem ser perdidos durante a medição. Deve ser considerada apenas para instrumentos com saída de sinal pulsada;
- e) incerteza associada ao valor do coeficiente de dilatação térmica do material de fabricação do medidor em calibração. Pode ser obtida no manual do fabricante do medidor ou de tabelas de propriedades de materiais; e
- f) incerteza associada à eventual presença de efeitos de histerese no medidor em calibração. Caso a histerese exista e não seja corrigida, deve ser considerada como fonte de incerteza na medida.



10.2.4.3 Fontes de incerteza associadas ao **fluido utilizado na calibração**:

- a) incertezas associadas aos valores da massa específica do fluido de calibração presentes, respectivamente, no padrão e no medidor em calibração. No caso da massa específica ser medida, considerar as componentes relativas ao instrumento de medição como calibração, resolução, variação durante a prova. No caso de se utilizar uma equação de alguma fonte (norma, tabela), como, por exemplo, a norma API, buscar na referência qual é a incerteza indicada;
- b) incertezas associadas à determinação dos valores das temperaturas do fluido presentes, respectivamente, no padrão e no medidor em calibração. Para a determinação dessa incerteza, todas as possíveis fontes de incerteza associadas à medição deveriam ser consideradas; e
- c) incerteza associada a uma possível variação dos parâmetros de calibração (principalmente temperatura) entre o início e o final da medição e que acaba influenciando na massa específica do fluido presente na linha de conexão entre o medidor em calibração e o padrão, resultando no conhecido *efeito de incremento ou decremento de massa*. Pode ser obtida a partir da estimativa da taxa de variação do volume entre os dois medidores em função da variação da temperatura ocorrida durante a medição.

10.2.4.4 Fontes de incerteza associadas à **operação da instalação utilizada na calibração**:

- a) incertezas associadas a grandezas de influência que podem afetar as medidas no processo de calibração (exemplos: erro de paralaxe na leitura de um nível de água ou de uma indicação por meio de ponteiro, esgotamento imperfeito da água em uma medida materializada de volume entre medições, desnivelamento de medidores e equipamentos, eventual presença de bolhas de ar ou vapor d'água na linha, gradientes de temperatura no medidor e na água etc.);
- b) incerteza devido à não estabilidade da vazão na linha de calibração durante o intervalo de medição. Pode ser avaliada com base nos dados obtidos da calibração; e
- c) incerteza decorrente do método de calibração utilizado. Exemplo: o uso de método de calibração de um totalizador de volume de líquido por meio da técnica *start-stop* e a influência decorrente do processo de estabilização da vazão no início e no final da medição. Pode ser avaliada de acordo com dados históricos da bancada, pode ser determinada durante a calibração ou com base na experiência do metrologista.

10.2.4.5 Fontes de incerteza associadas ao **tratamento de dados realizado na calibração**:

- a) incerteza decorrente da incapacidade do modelo matemático utilizado representar com perfeição o modelo físico da medição. Ou seja, a fórmula de correção utilizada para calcular o valor do volume de água totalizado na condição de referência pode não traduzir com exatidão a realização do modelo físico de medição da grandeza;
- b) incerteza associada à equação empírica utilizada no cálculo da massa específica da água. Pode ser avaliada a partir de informações contidas em referências técnicas ou normas internacionais; e
- c) incerteza associada à correlação entre as grandezas de entrada ou grandezas de influência envolvidas na calibração. Pode ser estimada a partir da avaliação de influências entre as variáveis por meio de cálculos estatísticos.

Nota - Para informações adicionais sobre o cálculo do volume a partir da massa de água medida, consultar o item 9 da NIE-Dimel-045. Para informações referentes ao procedimento para o cálculo da incerteza de medição, consultar a NIE-Dimel-043.



10.2.5 Expressão da CMC

A seguir, é apresentado um exemplo de expressão da CMC para o referido serviço de calibração:

Descrição do Serviço	Faixa	CMC
Totalizador de Volume de Água ou de Outros Líquidos, Exceto Hidrocarbonetos	1 m ³ /h até 100 m ³ /h	0,22 % do volume totalizado

10.3 Calibração de medidor de vazão volumétrica de água por meio do método gravimétrico

10.3.1 Aplicação

Conforme a NIT-Dicla-012, o exemplo a seguir se aplica ao serviço de calibração de código 2428 – *Medidor de Vazão Volumétrica de Água ou de Outros Líquidos, Exceto Hidrocarbonetos*.

10.3.2 Breve descrição do método

A calibração de um medidor de vazão volumétrica de água em bancada gravimétrica objetiva a determinação do erro relativo de medição na faixa de vazão operacional aplicável ao medidor. Nessa calibração, a vazão volumétrica de referência é determinada por meio da medição da massa de água coletada em um reservatório instalado sobre uma balança ou um sistema de pesagem calibrado, ao longo de um intervalo de tempo medido por meio de um cronômetro, e do valor da massa específica da água calculado para a temperatura da água no medidor em calibração.

Considerando que a vazão de água de referência é determinada a partir da totalização de uma massa de água ao longo de um intervalo de tempo, é fundamental que a vazão do líquido no sistema de calibração durante o intervalo de amostragem permaneça estável, ou seja, a vazão deve ser mantida o mais constante possível no valor ajustado para o ponto de calibração do medidor.

Os instrumentos de medição utilizados nessa calibração são balança ou sistema de pesagem, termômetro, densímetro, cronômetro e um conjunto composto de termômetro/barômetro/higrômetro para a medição dos parâmetros ambientais.

Por permitir uma alta exatidão de medição, este método é frequentemente utilizado como método primário de calibração de medidores utilizados como padrão em outros métodos ou dispositivos de medição de vazão mássica ou volumétrica, contanto que a vazão durante a calibração possa ser mantida estável e a massa específica do líquido seja determinada com exatidão.

De acordo com a norma ABNT NBR ISO 4185, a princípio, este método pode ser aplicado a qualquer tipo de líquido, desde que a sua viscosidade seja baixa e a pressão de vapor seja tal que qualquer escape de líquido do tanque de pesagem por vaporização não seja significativo a ponto de afetar a exatidão requerida da medida. Porém, neste documento orientativo, o tratamento será feito utilizando-se água como fluido de calibração.



10.3.3 Modelo matemático

A fórmula geral para o cálculo da vazão volumétrica de água por meio do método gravimétrico é dada por:

$$q = \frac{V_{20n}}{t} = m_n \left(\frac{1}{\rho_{a_n} - \rho_{ar_n}} \right) \left(1 - \frac{\rho_{ar_n}}{\rho_{a_n}} \right) [1 - \gamma (T_n - 20)]$$

onde:

- q : vazão volumétrica de água calculada
- V_{20n} : volume de água coletada referida à temperatura de 20 °C
- m_n : massa de água coletada na balança
- ρ_{a_n} : massa específica da água
- ρ_{ar_n} : massa específica do ar
- γ : coeficiente de expansão volumétrica do material da medida
- T_n : temperatura da água

10.3.4 Fontes de incerteza

Na estimativa da incerteza de medição associada aos resultados de uma calibração de um medidor de vazão de líquido, convém que sejam consideradas, no mínimo, as fontes de incerteza conforme o documento orientativo DOQ-Cgcre-057, ou seja:

- a) incerteza herdada da calibração da balança utilizada, obtida do seu certificado de calibração;
- b) incerteza decorrente da dispersão dos valores medidos em cada vazão de operação calibrada do medidor (repetibilidade das medidas);
- c) incerteza devido à não reprodutibilidade das medidas;
- d) incerteza associada à deriva da balança, obtida do seu histórico de calibrações;
- e) incerteza devida à limitação de resolução do dispositivo mostrador da balança utilizada na calibração;
- f) incerteza decorrente da utilização da balança sob condições diferentes das de sua calibração;
- g) incerteza devida à limitação de resolução do dispositivo mostrador do medidor sob calibração;
- h) incertezas oriundas do método de calibração utilizado (ex.: o uso de método gravimétrico de pesagem estática para a calibração de um medidor de vazão de líquidos; a calibração de um medidor de vazão de líquido por meio da técnica *start-stop* e a influência decorrente do processo de estabilização da vazão no início e no final da medição; ou por meio do uso de uma válvula desviadora e o impacto devido ao tempo necessário para a ativação/inativação da mesma);
- i) a incerteza decorrente da incapacidade do modelo matemático utilizado representar com perfeição o modelo físico da medição;
- j) incerteza associada a medidas realizadas por meio dos equipamentos e acessórios auxiliares utilizados no sistema de medição;
- k) incerteza devida à determinação da temperatura e da pressão da água e sua influência no valor do mensurando ou no próprio desempenho metrológico do medidor;
- l) incerteza decorrente dos efeitos das condições ambientais eventualmente presentes durante a calibração (ex.: efeitos devido a calor/frio excessivo, insolação direta sobre elementos do sistema de calibração, vento, vibrações, campos eletromagnéticos, impurezas presentes na água etc.);
- m) incerteza decorrente das correlações entre as diferentes fontes de incerteza; e
- n) incerteza proveniente da variação de outras grandezas que influenciam no processo de calibração.



10.3.5 Expressão da CMC

A seguir, é apresentado um exemplo de expressão da CMC para o referido serviço de calibração:

Descrição do Serviço	Faixa	CMC
Medidor de Vazão Volumétrica de Água ou de Outros Líquidos, Exceto Hidrocarbonetos	1 m ³ /h até 100 m ³ /h	0,22 % da vazão volumétrica

10.4 Calibração de anemômetro de pás rotativas

10.4.1 Aplicação

Conforme a NIT-Dicla-012, o exemplo a seguir aplica-se aos serviços de códigos 2496 (Anemômetro de copos) e 2497 (Anemômetro de pás rotativas).

10.4.2 Método

A calibração de um anemômetro mecânico ou eletrônico objetiva, sob condições especificadas, em uma primeira etapa, determinar uma relação entre os valores e as incertezas de medição fornecidas por padrões e as indicações correspondentes com as incertezas associadas; em uma segunda etapa, utiliza esta informação para estabelecer uma relação visando a obtenção de um resultado de medição a partir de uma indicação.

O método de calibração mais comum é o da comparação em um túnel de vento por meio do qual a velocidade do ar medida pelo anemômetro é comparada com a velocidade de referência. A velocidade de referência pode ser determinada por meio de um instrumento medidor de velocidade de ar previamente calibrado, de desempenho metrológico adequado e que pode ser, entre outros, um anemômetro por princípio térmico, ultrassônico, a laser Doppler, de pás ou por pressão diferencial, como o tubo de Pitot.

10.4.3 Modelo matemático

Para cada velocidade de calibração, a correção de calibração é calculada como a diferença entre a velocidade de referência e a velocidade indicada pelo anemômetro em calibração:

$$C = V_{ref} - V_{ind}$$

Onde:

C : correção de calibração

V_{ref} : média das velocidades de referência

V_{ind} : média das velocidades indicadas pelo anemômetro em calibração



Considerando-se a repetibilidade de medição, a histerese e o desvio padrão das medidas fornecidas pelo anemômetro:

$$C = V_{ref} - (V_{ind} + \delta V_{ind}) + \delta H + \delta C$$

Onde:

δV_{ind} : repetibilidade de medição (desvio da velocidade indicada pelo anemômetro em calibração)

δH : histerese

δC : desvio padrão das medidas

A velocidade de referência deve ser obtida a partir da velocidade medida pelo padrão, com as devidas correções pertinentes:

$$V_{ref} = V_{P_C} \cdot K_b \cdot K_t + \delta V_{P_C} + \delta V_P$$

Onde:

K_b : fator de correção de bloqueio

K_t : fator de correção do túnel de vento

V_{P_C} : velocidade média indicada pelo padrão de velocidade, já com as devidas correções

δV_{P_C} : desvio padrão da média do padrão de velocidade, já com as devidas correções, devido tanto à turbulência quanto à variação aleatória

δV_P : não-homogeneidade do perfil de velocidades na seção de testes obtido durante a caracterização do túnel de vento

Para anemômetros ultrassônicos, que medem mais de uma componente, a velocidade da componente em calibração pode ser comparada diretamente com a referência. Para anemômetros mecânicos, há casos em que o instrumento em calibração mede a resultante de duas componentes (axial e horizontal), sendo necessário calcular a velocidade composta:

$$V_{ref} = \sqrt{V_{ref(x)}^2 + V_{ref(y)}^2}$$

Nota - As medições do instrumento em calibração e da referência devem corresponder ao mesmo período de tempo.



Para pequenos ângulos de desalinhamento, a velocidade pode ser corrigida aplicando-se as matrizes de rotação à velocidade de referência, considerando o ângulo formado pelos eixos dos dois anemômetros:

$$R_{\theta_z} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_z) & -\sin(\theta_z) & 0 & 0 \\ \sin(\theta_z) & \cos(\theta_z) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$R_{\theta_x} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta_x) & -\sin(\theta_x) & 0 \\ 0 & \sin(\theta_x) & \cos(\theta_x) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$R_{\theta_y} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_y) & 0 & \sin(\theta_y) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(\theta_y) & 0 & \cos(\theta_y) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

As velocidades corrigidas ficam:

$$V_{P_C} = \begin{bmatrix} V_{P_C(x)} \\ V_{P_C(y)} \\ V_{P_C(z)} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{P(x)} \\ V_{P(y)} \\ V_{P(z)} \\ 1 \end{bmatrix} R_{\theta_x} R_{\theta_y} R_{\theta_z}$$

Onde:

R_{θ_x} : matriz de rotação no eixo x

R_{θ_y} : matriz de rotação no eixo y

R_{θ_z} : matriz de rotação no eixo z

θ_x : ângulo de desalinhamento no eixo x

θ_y : ângulo de desalinhamento no eixo y

θ_z : ângulo de desalinhamento no eixo z

V_{P_C} : velocidade média indicada pelo padrão de velocidade, já com as devidas correções

$V_{P_C(x)}$: velocidade média da componente x indicada pelo padrão de velocidade, já com as devidas correções

$V_{P_C(y)}$: velocidade média da componente y indicada pelo padrão de velocidade, já com as devidas correções

$V_{P_C(z)}$: velocidade média da componente z indicada pelo padrão de velocidade, já com as devidas correções

$V_{P(x)}$: velocidade média da componente x indicada pelo padrão de velocidade, sem as devidas correções

$V_{P(y)}$: velocidade média da componente y indicada pelo padrão de velocidade, sem as devidas correções

$V_{P(z)}$: velocidade média da componente z indicada pelo padrão de velocidade, sem as devidas correções

Nota - As velocidades do padrão devem ser consideradas com as devidas correções apresentadas no certificado de calibração. Caso haja interpolação, a incerteza do polinômio deve ser considerada.



Com a determinação da velocidade de referência do ar (V_{ref}), é possível se calcular o erro porcentual de medição do anemômetro sob calibração. Ou seja:

$$\varepsilon = \frac{V_{ind} - V_{ref}}{V_{ref}} \cdot 100 \%$$

Onde:

ε é o erro relativo da medida obtida com o anemômetro em calibração na velocidade específica de operação, expresso em termos percentuais, e V_{ind} é a velocidade medida e indicada pelo anemômetro em calibração.

10.4.4 Fontes de incerteza

As principais fontes de incerteza consideradas neste método de calibração são apresentadas a seguir:

- a) incerteza herdada da calibração do medidor de velocidade de referência, obtida do seu certificado de calibração e normalmente expressa na forma de uma incerteza expandida, com distribuição normal e fator de abrangência $k = 2$ para um nível da confiança de 95 %;
- b) incerteza decorrente da dispersão dos valores medidos em cada velocidade de operação calibrada do anemômetro e que pode ser estimada pelo desvio-padrão das medidas ou do desvio-padrão da média;
- c) incerteza devido à limitação de resolução do dispositivo mostrador do anemômetro em calibração;
- d) incerteza devido à diferença de tempo (sincronização) entre as medições com o padrão e as medições com o anemômetro em calibração. Medições mais longas e sincronização automática podem diminuir este efeito;
- e) incerteza devido à operação em condição transiente do anemômetro em calibração. Em outras palavras, um anemômetro mecânico pode demorar um tempo até operar de forma constante devido à sua inércia e efeitos de temperatura em rolamentos. O mesmo deve funcionar por cerca de 5 minutos antes do procedimento de calibração começar, a fim de evitar o efeito que grandes variações de temperatura podem ter sobre o atrito mecânico dos mancais do anemômetro. Essa componente é considerada apenas para anemômetros mecânicos;
- f) incerteza decorrente da deriva estimada do medidor de velocidade de referência, obtida a partir do seu histórico de calibrações;
- g) incertezas decorrentes dos efeitos de instalação dos instrumentos nas medidas como a imperfeição no alinhamento de sondas e instrumentos em relação à direção axial do vento;
- h) incerteza decorrente da influência da presença do anemômetro (bloqueio) no campo de velocidades no túnel de vento. Durante as medições, o desempenho do anemômetro será, em certa medida, influenciado pelo bloqueio do escoamento no túnel de vento ou por efeitos de fronteira. Devem-se realizar correções para o fator de bloqueio ou realizar estudos para demonstrar que a velocidade de referência não é alterada pela presença do instrumento;
- i) incertezas devido à influência do anemômetro em calibração nas leituras realizadas pelo padrão. Devem-se realizar correções neste valor ou realizar estudos que comprovem que a velocidade do padrão não é influenciada pela presença do instrumento a ser calibrado;
- j) incerteza devido à não-homogeneidade e não-estabilidade do escoamento na seção de calibração, obtida por meio da caracterização do perfil de velocidades na seção de testes do túnel de vento. A estabilidade pode ser assumida se duas medidas sucessivas de 30 segundos não diferirem mais que 0,05 m/s uma da outra;
- k) incerteza associada às componentes não axiais de velocidade na seção de calibração;
- l) incerteza devido à histerese do anemômetro em calibração. A histerese pode ser considerada realizando-se medições em velocidade crescente e decrescente do vento, na faixa determinada para calibração. Fazendo-se leituras para etapas crescentes e para etapas decrescentes, é possível identificar se os efeitos de histerese estão presentes no instrumento de medição;



- m) incertezas herdadas das calibrações dos instrumentos auxiliares, como medidores de temperatura, pressão, umidade, tempo, além de sistemas de aquisição e condicionamento de sinais; e
- n) incertezas associadas à utilização de polinômios, regressões lineares e ajustes numéricos nos valores das grandezas de entrada medidas por intermédio da instrumentação auxiliar.

10.4.5 Expressão da CMC

Exemplo:

Descrição do Serviço	Faixa	CMC
Anemômetro de pás rotativas	2 m/s até 16 m/s	1 % da velocidade de referência ou 0,1 m/s, o que for maior

10.5 Calibração de provador de líquido do tipo pistão ou compacto pelo método volumétrico

10.5.1 Aplicação

Conforme a NIT-Dicla-012, o exemplo a seguir aplica-se ao serviço de calibração de código 2581 *Provador de pistão ou compacto*.

10.5.2 Breve descrição do método

A calibração de um provador de líquido do tipo pistão ou compacto objetiva a determinação do seu volume nominal a uma temperatura de referência, normalmente de 20 °C. O método volumétrico consiste em comparar o volume de água deslocado pelo pistão interno do provador durante o seu movimento entre duas chaves de posição com um volume de referência determinado por meio de um vaso padrão, também conhecido como medida materializada de volume (MMV), previamente calibrado. Esse método conhecido como *water draw* utiliza os seguintes instrumentos:

- um vaso padrão (MMV) com volume compatível ao do provador a ser calibrado;
- um manômetro; e
- três termômetros.

10.5.3 Modelo matemático

O modelo matemático do volume de montante do provador é baseado na norma ISO 4267-2. A equação que representa este modelo é dada por:

$$V_p = \frac{V_t \cdot \left(\frac{\rho_L[T_{Lt}] + \Delta\rho_w[T_{Lt}]}{\rho_L[T_{Lp}] + \Delta\rho_w[T_{Lp}]} \cdot (1 + \alpha_T \cdot (T_q - T_{rt})) \right)}{\left((1 + \gamma_p \cdot (T_b - T_{rp})) \cdot (1 + \alpha_p \cdot (T_p - T_{rp})) \cdot \left(1 + \frac{P \cdot D}{E \cdot e} \right) \cdot \left(\frac{1}{1 - P \cdot F[T_{Lp}]} \right) \right)} + \delta V_p + \delta V_v + \delta V_e$$

Onde:

- V_p : volume de montante do provador calculado na temperatura e pressão de referência (dm³)
- V_t : volume indicado da MMV e corrigido pelo resultado de seu certificado de calibração (dm³)
- $\rho_L[T_{Lt}]$: massa específica da água à temperatura T_{Lt} (kg/dm³)
- $\rho_L[T_{Lp}]$: massa específica da água à temperatura T_{Lp} (kg/dm³)



T_{Lt}	: temperatura da água na MMV no momento da leitura do menisco (°C)
T_{Lp}	: temperatura da água no provador (°C)
$\Delta\rho_w[T_{Lt}]$: variação da massa específica da água devido às impurezas na temperatura T_{Lt} (kg/m ³)
$\Delta\rho_w[T_{Lp}]$: variação da massa específica da água devido às impurezas na temperatura T_{Lp} (kg/m ³)
α_T	: coeficiente de expansão térmica volumétrica da MMV (°C ⁻¹)
T_q	: temperatura da MMV no momento da leitura do menisco (°C)
T_{rt}	: temperatura de referência da MMV (°C)
γ_p	: coeficiente de expansão linear da haste de chave óptica (°C ⁻¹)
T_b	: temperatura da haste de chave óptica (°C)
T_{rp}	: temperatura de referência do provador (°C)
α_p	: coeficiente de expansão térmica volumétrica do cilindro do provador (°C ⁻¹)
T_p	: temperatura do cilindro do provador (°C)
P	: pressão da água no interior do cilindro do provador (kPa)
D	: diâmetro interno do cilindro do provador (mm)
E	: módulo de elasticidade do material do cilindro do provador (kPa)
e	: espessura da parede do cilindro do provador (mm)
$F[T_{Lp}]$: fator de compressibilidade da água em função da sua temperatura T_{Lp} (kPa ⁻¹)
δV_p	: erro aleatório devido à repetibilidade do volume calculado do provador (dm ³)
δV_v	: erro no volume devido à exatidão de posicionamento do pistão (dm ³)
δV_e	: erro devido à variação do volume de água estacionário na seção de circuito entre a flange cega e o cilindro do provador

10.5.4 Fontes de incerteza

As principais fontes de incerteza que afetam a confiabilidade dos resultados neste método de calibração são apresentadas a seguir:

- incerteza herdada da calibração da MMV, obtida do seu certificado de calibração e, normalmente, expressa na forma de uma incerteza expandida, com distribuição normal e fator de abrangência $k = 2$ para um nível da confiança de 95 %;
- incerteza decorrente da dispersão dos valores medidos em cada operação de calibração do provador e que pode ser avaliada por meio do desvio padrão das medidas ou do desvio padrão da média;
- incerteza associada ao volume corrigido;
- incerteza relacionada à correção da massa específica da água;
- incerteza associada à temperatura da água na MMV;
- incerteza associada à temperatura da água no cilindro do provador;
- incerteza relacionada à correção por expansão térmica do material do cilindro do provador;
- incerteza associada ao coeficiente de expansão térmica superficial do material do cilindro do provador;
- incerteza associada ao coeficiente de expansão térmica linear do material do suporte dos sensores de posição do provador;
- incerteza associada à temperatura do suporte dos sensores de posição do provador;
- incerteza relacionada à correção por expansão térmica do material que compõe a MMV;
- incerteza associada ao coeficiente de expansão térmica superficial do material que compõe a MMV (certificado de calibração);
- incerteza associada à correção por deformação elástica do cilindro do provador devido à pressão no seu interior;
- incerteza associada ao valor do módulo de elasticidade do material do cilindro do provador;
- incerteza associada à pressão da água no interior do cilindro do provador;
- incerteza associada ao valor do diâmetro interno do cilindro do provador;
- incerteza associada ao valor da espessura da parede do cilindro do provador;



- r) incerteza relacionada à correção devido à compressibilidade da água pela pressão interna no provador;
e
s) incerteza associada ao fator de compressibilidade isométrica da água.

10.5.5 Expressão da CMC

A seguir, é apresentado um exemplo de expressão da CMC para o referido serviço de calibração:

Descrição do Serviço	Faixa	CMC
Provador de pistão ou compacto	100 L até 1000 L	0,03 % do volume de referência

10.6 Calibração de totalizador de volume de hidrocarboneto líquido

10.6.1 Aplicação

Conforme a NIT-Dicla-012, o exemplo a seguir aplica-se ao serviço de calibração de código 2437 *Totalizador de volume de hidrocarbonetos líquidos*. O método de calibração utilizado neste exemplo é o de comparação com totalizador de referência.

10.6.2 Breve descrição do método

A calibração de um totalizador de volume de hidrocarboneto líquido mecânico ou eletrônico objetiva a determinação dos valores dos volumes de referência de hidrocarboneto (mensurando) em função da vazão ao longo da faixa de operação aplicável ao instrumento. Neste método de calibração por comparação, o fluido de calibração em escoamento na linha de calibração, sob uma determinada vazão, é totalizado simultaneamente por ambos o totalizador em calibração e o totalizador padrão, um montado em série ao outro.

10.6.3 Modelo matemático

O volume de referência, ou seja, o volume de hidrocarboneto líquido medido pelo padrão e referido às condições do escoamento presentes no totalizador em calibração é dado pela seguinte expressão:

$$V_{ref} = V_p CTS_p \frac{\rho_p}{\rho_m} \frac{CPL_p}{CPL_m}$$

Onde:

$V_p = \frac{N_p}{kf_p}$: volume de hidrocarboneto líquido medido pelo padrão, determinado a partir do número de pulsos totalizados (N_p) e o fator kf_p do padrão, dado em número de pulsos por metro cúbico;

$CTS_p = 1 + \alpha_p \cdot (T_p - 20)$: fator de correção devido à expansão térmica do medidor padrão;

ρ_p : massa específica do hidrocarboneto líquido nas condições de pressão e temperatura do padrão;

ρ_m : massa específica do hidrocarboneto líquido nas condições de pressão e temperatura do medidor em calibração;

$CPL_p = \frac{1}{1 - P_p F_p}$: correção devido à compressibilidade do líquido no medidor padrão;

$CPL_m = \frac{1}{1 - P_m F_m}$: correção devido à compressibilidade do líquido no medidor em calibração;



$$F = 0,000000001 e^{\left(-1,6208 + 0,00021592 T + \frac{0,87096}{(\rho_{15}/1000)^2} + \frac{0,0042092 T}{(\rho_{15}/1000)^2} \right)}$$

: fator de compressibilidade do líquido.

Ou seja:

$$V_{ref} = \frac{N_p}{k f_p} [1 + \alpha_p \cdot (T_p - 20)] \cdot \frac{\rho_p}{\rho_m} \cdot \frac{\left(\frac{1}{1 - P_p \cdot \left(0,000000001 e^{\left(-1,6208 + 0,00021592 T_p + \frac{0,87096}{(\rho_{15}/1000)^2} + \frac{0,0042092 T_p}{(\rho_{15}/1000)^2} \right)} \right)}{\left(\frac{1}{1 - P_m \cdot \left(0,000000001 e^{\left(-1,6208 + 0,00021592 T_m + \frac{0,87096}{(\rho_{15}/1000)^2} + \frac{0,0042092 T_m}{(\rho_{15}/1000)^2} \right)} \right)} \right)}$$

Onde:

- N_p : número de pulsos medidos no medidor padrão
 N_m : número de pulsos medidos no medidor em calibração
 T_m : temperatura do líquido medida no medidor em calibração
 P_m : pressão manométrica do líquido medida no medidor em calibração
 T_p : temperatura do líquido medida no medidor padrão
 P_p : pressão manométrica do líquido medida no medidor padrão
 α_p : coeficiente de dilatação térmica do material do medidor padrão

Além das variáveis diretas da equação, consideram-se fontes de incerteza porque seu valor no erro é igual a zero, porém, na incerteza não é.

$$V_{ref} = V_p CTS_p \frac{\rho_p}{\rho_m} \frac{CPL_p}{CPL_m} \pm \delta_{pp} \pm \delta_{med} \pm \delta_{rep} \pm \delta_{cv}$$

Onde:

- δ_{pp} : correção em função da perda de pulsos [volume]
 δ_{med} : correção em função da resolução do medidor padrão e do medidor em calibração [volume]
 δ_{rep} : correção em função da repetibilidade da diferença de indicação do medidor com o medidor padrão [volume]
 δ_{cv} : correção em função do volume morto entre o medidor em calibração e o padrão [volume]

10.6.4 Fontes de incerteza

As principais fontes de incerteza que afetam a confiabilidade dos resultados neste método de calibração são apresentadas a seguir:

**10.6.4.1 Fontes de incerteza associadas ao medidor padrão e aos instrumentos de medição auxiliares:**

- a) incerteza associada aos resultados da calibração do padrão utilizado, obtida do seu certificado de calibração e normalmente expressa na forma de uma incerteza expandida, com distribuição normal e fator de abrangência $k = 2$ para um nível de confiança de 95 %;
- b) incerteza decorrente da dispersão dos valores medidos com o uso do padrão em cada vazão de operação calibrada do totalizador e que pode ser avaliada por meio do desvio padrão das medidas ou do desvio padrão da média;
- c) incerteza associada à eventual influência dos parâmetros ambientais (temperatura, insolação, vento, vibração mecânica etc.) sobre o desempenho do padrão e instrumentos de medição auxiliares. Pode ser estimada a partir de informações contidas no manual do fabricante ou a partir da experiência que o usuário do instrumento possui sobre o mesmo;
- d) incerteza decorrente da limitação de resolução do dispositivo mostrador do padrão. Pode ser obtida diretamente da escala do dispositivo mostrador do padrão;
- e) incerteza relativa à correção imperfeita da medida obtida com o uso do instrumento de medição e feita com o uso da equação da linha de tendência determinada a partir dos resultados da calibração do instrumento de medição;
- f) incerteza associada à eventual deriva instrumental apresentada pelo padrão. Pode ser avaliada a partir dos dados do histórico de calibrações do padrão;
- g) incerteza associada à eventual presença de efeitos de histerese no medidor padrão. Caso a histerese exista e não seja corrigida, deve ser considerada como fonte de incerteza na medida;
- h) incerteza referente à possibilidade de perda de pulsos pelo medidor padrão, estimada a partir da suposição do número de pulsos que podem ser perdidos ao início e ao final da medição. Deve ser considerada apenas para instrumentos com saída de sinal pulsada;
- i) incerteza associada ao valor do coeficiente de dilatação térmica do material de fabricação do padrão. Pode ser obtida no manual do fabricante do padrão ou de tabelas de propriedades de materiais;
- j) incerteza decorrente da utilização do padrão sob condições de uso diferentes das de sua calibração. Pode ser importante considerar os efeitos decorrentes de mudanças no tipo de fluido, da sua viscosidade, mudanças de instalação e de operador etc.; e
- k) incerteza oriunda dos equipamentos ou acessórios auxiliares utilizados no sistema de medição.

10.6.4.2 Fontes de incerteza associadas ao instrumento de medição submetido à calibração:

- a) incerteza decorrente da dispersão dos valores indicados pelo medidor em calibração em cada vazão de operação e que pode ser avaliada por meio do desvio padrão das medidas;
- b) incerteza associada à eventual influência dos parâmetros ambientais (temperatura, insolação, vento, vibração mecânica, campo eletromagnético etc.) sobre o desempenho do medidor em calibração. Pode ser estimada a partir de informações contidas no manual do fabricante ou a partir da experiência que o usuário do instrumento possui sobre o mesmo;
- c) incerteza devido à limitação de resolução do dispositivo mostrador do medidor em calibração. Pode ser obtida diretamente do dispositivo mostrador do instrumento ou no manual do fabricante. Normalmente, esta incerteza deveria ser considerada duas vezes no cálculo dado que, na calibração do medidor, a referida incerteza afeta as leituras dos volumes inicial e final;
- d) incerteza referente à possibilidade de perda de pulsos pelo medidor em calibração, estimada a partir da suposição do número de pulsos que podem ser perdidos ao início e ao final da medição. Deve ser considerada apenas para instrumentos com saída de sinal pulsada;
- e) incerteza associada ao valor do coeficiente de dilatação térmica do material de fabricação do medidor em calibração. Pode ser obtida no manual do fabricante do padrão ou de tabelas de propriedades de materiais; e
- f) incerteza associada à eventual presença de efeitos de histerese no medidor em calibração. Caso a histerese exista e não seja corrigida, deve ser considerada como fonte de incerteza na medida.

**10.6.4.3 Fontes de incerteza associadas ao fluido utilizado na calibração:**

- a) incertezas associadas à determinação dos valores das temperaturas do líquido presentes, respectivamente, no padrão e no medidor em calibração. Para a determinação dessa incerteza, todas as possíveis fontes de incerteza associadas à medição deveriam ser consideradas, a exemplo da incapacidade dos sensores de temperatura medirem com exatidão a temperatura do líquido;
- b) incertezas associadas à determinação dos valores das pressões do líquido presentes, respectivamente, no padrão e no medidor em calibração. Para a determinação dessa incerteza, todas as possíveis fontes de incerteza associadas à medição deveriam ser consideradas, a exemplo da incapacidade dos sensores de pressão medirem com exatidão a temperatura do gás devido a tomadas de pressão inapropriadas;
- c) incerteza associada ao valor da massa específica do hidrocarboneto líquido durante a calibração. No caso da massa específica ser medida, considerar as componentes relativas ao instrumento de medição como calibração, resolução, variação durante a prova. No caso de se utilizar uma equação de alguma fonte (norma, tabela), como, por exemplo, a norma API, buscar na fonte qual é a incerteza indicada; e
- d) incerteza associada a uma possível variação dos parâmetros de calibração (principalmente temperatura) entre o início e o final da medição e que acaba influenciando na massa específica do fluido presente na linha ou tubulação de conexão entre o medidor em calibração e o padrão, resultando no conhecido *efeito de armazenamento de massa*. Pode ser obtida a partir da estimativa da taxa de variação do volume entre os dois medidores em função da variação da temperatura ocorrida durante a medição.

10.6.4.4 Fontes de incerteza associadas à operação da instalação utilizada na calibração:

- a) incertezas associadas às grandezas de influência que podem afetar as medidas no processo de calibração (exemplos: trechos retos de tubulação insuficientes para estabilização do perfil de velocidades do escoamento, perturbações no escoamento decorrentes da presença de conexões e válvulas, efeitos de pulsação do escoamento, eventual presença de bolhas de ar ou vapor d'água na linha, gradientes de temperatura no medidor e no hidrocarboneto líquido etc.);
- b) incertezas associadas à manobra de válvulas, caso seja utilizada a técnica de *start/stop*. Podem ser avaliadas de acordo com dados históricos da bancada ou podem ser determinadas durante a calibração;
- c) incerteza devido à não estabilidade da vazão na linha de calibração durante o intervalo de medição. Pode ser avaliada com base nos dados obtidos da calibração; e
- d) incerteza decorrente do método de calibração utilizado. Pode ser avaliada de acordo com dados históricos da bancada, pode ser determinada durante a calibração ou com base na experiência do metrologista.

10.6.4.5 Fontes de incerteza associadas aos cálculos e tratamento de dados realizados na calibração:

- a) incerteza decorrente da incapacidade do modelo matemático utilizado representar com perfeição o modelo físico da medição. Ou seja, uma equação de cálculo utilizada para calcular o volume de referência de líquido pode não traduzir com exatidão a realização do modelo físico de medição da grandeza;
- b) incerteza associada às equações empíricas utilizadas em cálculos na calibração. Pode ser obtida nas indicações das próprias normas API ou ISO; e
- c) incerteza associada à correlação entre as grandezas de entrada ou grandezas de influência envolvidas na calibração. Pode ser estimada a partir da avaliação de influências entre as variáveis por meio de cálculos estatísticos.



10.6.5 Expressão da CMC

A seguir, é apresentado um exemplo de expressão da CMC para o referido serviço de calibração:

Descrição do Serviço	Faixa	CMC
Totalizador de Volume de Hidrocarbonetos Líquidos	1 m ³ /h até 100 m ³ /h Fluido de calibração disponível: óleo mineral com viscosidades cinemáticas de 16,6 cSt (20 °C) e 12 cSt (40 °C)	0,22 % do volume de referência de hidrocarboneto líquido

Nota da NIT-Dicla-012 - O laboratório deverá informar em seu escopo, além das faixas de vazões de medição, os tipos de fluidos e a faixa de viscosidade cinemática ou as viscosidades cinemáticas dos fluidos com os quais é capaz de realizar a calibração, na grandeza volume totalizado. A informação sobre o fluido e a viscosidade cinemática pode ser apresentada de forma geral para todas as faixas de vazão, não havendo a necessidade de especificá-la para cada faixa de vazão. A CMC deverá ser expressa para a melhor situação de calibração com qualquer dos fluidos e qualquer das viscosidades. Alterações no fluido de calibração e na viscosidade são consideradas "atualização do escopo".

10.7 Calibração de totalizador de volume de gás

10.7.1 Aplicação

Conforme a NIT-Dicla-012, o exemplo a seguir aplica-se ao serviço de calibração de código 2439 *Totalizador de Volume de Gás*. O método de calibração utilizado é o de comparação com medidor de referência.

10.7.2 Breve descrição do método

A calibração de um totalizador de volume de gás mecânico ou eletrônico por meio do método de comparação com medidor de referência objetiva a determinação dos volumes de referência de gás (mensurando) medidos em função da vazão ao longo da faixa de operação aplicável ao instrumento. Neste método de calibração, o medidor padrão e o medidor em calibração são instalados em série em uma linha de calibração e o gás de calibração (normalmente ar), sob um regime de escoamento estável e controlado, passa por ambos os medidores. O volume totalizado de gás indicado pelo totalizador em calibração é comparado com o volume de referência de gás medido pelo medidor padrão e referido às condições de pressão, temperatura e fator de compressibilidade do gás no totalizador.

10.7.3 Modelo matemático

O volume de referência de gás é o volume de gás totalizado no medidor padrão durante o intervalo de medição, convertido para as condições de pressão, temperatura e fator de compressibilidade do gás presentes no medidor em calibração. Essa conversão é feita por meio da aplicação das relações de pressão, de temperatura e de fator de compressibilidade do gás de calibração entre os dois medidores, uma vez que os valores desses parâmetros no medidor padrão podem ser diferentes dos valores no medidor em calibração.



Há medidores padrão que indicam diretamente o volume de gás totalizado no medidor padrão, mas há outros tipos (por exemplo: turbinas, rotativos etc.), com saída de sinal na forma de pulsos, nos quais é necessário totalizar o número de pulsos durante o intervalo de medição e dividi-lo pelo fator K e pelo erro de medição do padrão para a vazão específica de operação. Nesse caso, o volume de referência de gás é calculado por meio da seguinte expressão:

$$V_{ref} = \frac{N}{K \cdot (1 + E/100)} \cdot \frac{P_p \cdot T_m \cdot Z_m}{P_m \cdot T_p \cdot Z_p}$$

onde:

- V_{ref} : volume de referência de gás [m³]
- N : n° total de pulsos medidos pelo padrão durante o intervalo de totalização [pulsos]
- K : fator K (constante física do medidor padrão) [pulsos/m³]
- E : erro de medição do medidor padrão na vazão específica de calibração [%]
- P_p : pressão absoluta do gás no medidor padrão [Pa]
- P_m : pressão absoluta do gás no medidor em calibração [Pa]
- T_m : temperatura absoluta do gás no medidor em calibração [K]
- T_p : temperatura absoluta do gás no medidor padrão [K]
- Z_m : fator de compressibilidade do gás no medidor em calibração
- Z_p : fator de compressibilidade do gás no medidor padrão

10.7.4 Fontes de incerteza

No processo de calibração de um medidor de vazão (volumétrica ou mássica) ou totalizador (de volume ou de massa) de gás devem ser consideradas as influências dos seguintes fatores: o medidor padrão e instrumentos de medição auxiliares, o próprio medidor submetido à calibração, o fluido utilizado na calibração, aspectos relacionados à operação da instalação utilizada e o tratamento de dados realizado na calibração.

Dessa forma, as principais fontes de incerteza que afetam a confiabilidade dos resultados neste método de calibração são apresentadas a seguir:

10.7.4.1 Fontes de incerteza associadas ao medidor padrão e instrumentos de medição auxiliares:

- a) incerteza associada aos resultados da calibração do padrão utilizado, obtida do seu certificado de calibração e normalmente expressa na forma de uma incerteza expandida, com distribuição normal e fator de abrangência $k = 2$ para um nível da confiança de 95 %;
- b) incerteza decorrente da dispersão dos valores medidos com o uso do padrão em cada vazão de operação calibrada do totalizador e que pode ser avaliada por meio do desvio padrão das medidas ou do desvio padrão da média;
- c) incerteza associada à eventual influência dos parâmetros ambientais (temperatura, insolação, vento, vibração mecânica etc.) sobre o desempenho do padrão e instrumentos de medição auxiliares. Pode ser estimada a partir de informações contidas no manual do fabricante ou a partir da experiência que o usuário do instrumento possui sobre o mesmo;
- d) incerteza decorrente da limitação de resolução do dispositivo mostrador do padrão. Pode ser obtida diretamente da escala do dispositivo mostrador do padrão. Pode ser obtida diretamente do dispositivo mostrador do instrumento ou no manual do fabricante. Normalmente, esta incerteza deveria ser considerada duas vezes no cálculo dado que, na calibração do medidor, a referida incerteza afeta as leituras dos volumes inicial e final do padrão;



- e) incerteza referente à correção imperfeita do valor medido pelo medidor padrão e feita com o uso da equação da linha de tendência determinada a partir do tratamento estatístico dos resultados da calibração do padrão;
- f) incerteza associada à eventual deriva instrumental apresentada pelo padrão. Pode ser avaliada a partir dos dados do histórico de calibrações do padrão;
- g) incerteza associada à eventual presença de efeitos de histerese no medidor padrão. Caso a histerese exista e não seja corrigida, deve ser considerada como fonte de incerteza na medida;
- h) incerteza referente à possibilidade de perda de pulsos pelo medidor padrão, estimada a partir da suposição do número de pulsos que podem ser perdidos ao início e ao final da medição. Deve ser considerada apenas para instrumentos com saída de sinal pulsada;
- i) incerteza associada ao valor do coeficiente de dilatação térmica do material de fabricação do padrão. Pode ser obtida no manual do fabricante do padrão ou de tabelas de propriedades de materiais;
- j) incerteza decorrente da utilização do padrão sob condições de uso diferentes das de sua calibração. Pode ser importante considerar os efeitos decorrentes de mudanças no tipo de gás, os efeitos de temperatura e pressão, mudanças de instalação e de operador etc.; e
- k) incerteza oriunda dos equipamentos ou acessórios auxiliares utilizados no sistema de medição.

10.7.4.2 Fontes de incerteza associadas ao instrumento de medição submetido à calibração:

- a) incerteza decorrente da dispersão dos valores indicados pelo medidor em calibração em cada vazão de operação e que pode ser avaliada por meio do desvio padrão das medidas;
- b) incerteza associada à eventual influência dos parâmetros ambientais (temperatura, insolação, vento, vibração mecânica, campo eletromagnético etc.) sobre o desempenho do medidor em calibração. Pode ser estimada a partir de informações contidas no manual do fabricante ou a partir da experiência que o usuário do instrumento possui sobre o mesmo;
- c) incerteza devido à limitação de resolução do dispositivo mostrador do medidor em calibração. Pode ser obtida diretamente do dispositivo mostrador do instrumento ou no manual do fabricante. Normalmente, esta incerteza deveria ser considerada duas vezes no cálculo dado que, na calibração do medidor, a referida incerteza afeta as leituras dos volumes inicial e final;
- d) incerteza referente à possibilidade de perda de pulsos pelo medidor em calibração, estimada a partir da suposição do número de pulsos que podem ser perdidos ao início e ao final da medição. Deve ser considerada apenas para instrumentos com saída de sinal pulsada;
- e) incerteza associada ao valor do coeficiente de dilatação térmica do material de fabricação do medidor em calibração. Pode ser obtida no manual do fabricante do padrão ou de tabelas de propriedades de materiais; e
- f) incerteza associada à eventual presença de efeitos de histerese no medidor em calibração. Caso a histerese exista e não seja corrigida, deve ser considerada como fonte de incerteza na medida.

10.7.4.3 Fontes de incerteza associadas ao fluido utilizado na calibração:

- a) incertezas associadas à determinação dos valores das temperaturas do gás presentes, respectivamente, no padrão e no medidor em calibração. Para a determinação dessa incerteza, todas as possíveis fontes de incerteza associadas à medição deveriam ser consideradas, a exemplo da incapacidade dos sensores de temperatura medirem com exatidão a temperatura do gás;
- b) incertezas associadas à determinação dos valores das pressões do gás presentes, respectivamente, no padrão e no medidor em calibração. Para a determinação dessa incerteza, todas as possíveis fontes de incerteza associadas à medição deveriam ser consideradas, a exemplo da incapacidade dos sensores de pressão medirem com exatidão a temperatura do gás devido a tomadas de pressão inapropriadas;
- c) incertezas associadas à determinação dos valores dos fatores de compressibilidade Z do gás utilizado na calibração presentes, respectivamente, no medidor padrão e no medidor em calibração. Pode ser obtida a partir de referências normativas como a AGA Report #8; e



d) incerteza associada a uma possível variação dos parâmetros de calibração (principalmente temperatura) entre o início e o final da medição e que acaba influenciando na massa específica do fluido presente na linha ou tubulação de conexão entre o medidor em calibração e o padrão, resultando no conhecido *efeito de armazenamento de massa*. Pode ser obtida a partir da estimativa da taxa de variação do volume entre os dois medidores em função da variação da temperatura ocorrida durante a medição.

10.7.4.4 Fontes de incerteza associadas à **operação da instalação utilizada na calibração**:

- a) incertezas associadas às grandezas de influência que podem afetar as medidas no processo de calibração (exemplos: trechos retos de tubulação insuficientes para estabilização do perfil de velocidades do escoamento, perturbações no escoamento decorrente da presença de conexões e válvulas, efeitos de pulsação ou ressonância do escoamento, gradientes de temperatura no medidor e no gás etc.);
- b) incerteza devido à não estabilidade da vazão na linha de calibração durante o intervalo de medição. Pode ser avaliada com base nos dados obtidos da calibração; e
- c) incerteza decorrente do método de calibração utilizado. Pode ser avaliada de acordo com dados históricos da bancada, pode ser determinada durante a calibração ou com base na experiência do metrologista.

10.7.4.5 Fontes de incerteza associadas ao **tratamento de dados realizado na calibração**:

- a) incerteza decorrente da incapacidade do modelo matemático utilizado representar com perfeição o modelo físico da medição. Ou seja, uma equação de cálculo utilizada para calcular o volume de referência de gás pode não traduzir com exatidão a realização do modelo físico de medição da grandeza;
- b) incerteza associada às equações empíricas utilizadas em cálculos na calibração. Por exemplo, equações de cálculo da massa específica de um gás. Podem ser avaliadas a partir de informações contidas em referências técnicas ou normas internacionais; e
- c) incerteza associada à correlação entre as grandezas de entrada ou grandezas de influência envolvidas na calibração. Pode ser estimada a partir da avaliação de influências entre as variáveis por meio de cálculos estatísticos.

10.7.5 Expressão da CMC

A seguir, é apresentado um exemplo de expressão da CMC para o referido serviço de calibração:

Descrição do Serviço	Faixa	CMC
Totalizador de Volume de Gás	(0,1 até 100) L/min Gases de calibração disponíveis: ar comprimido, nitrogênio, dióxido de carbono e argônio. Pressão disponível do gás no medidor em calibração: pressão ambiente.	1,2 % do volume de referência de gás

Nota da NIT-Dicla-012 - O laboratório deverá informar em seu escopo, além da faixa de vazões de medição, os tipos de gases e a faixa de pressão na qual é capaz de realizar a calibração na grandeza volume totalizado. A informação sobre o tipo de gás e pressão pode ser apresentada de forma geral para todas as faixas de vazão, não havendo a necessidade de especificá-la para cada faixa de vazão. A CMC deverá ser expressa para a melhor situação de calibração com qualquer dos gases e qualquer das pressões.



10.8 Ensaio de determinação dos erros de indicação de hidrômetro para água fria utilizando bancada volumétrica

10.8.1 Aplicação

O exemplo a seguir aplica-se ao serviço de ensaio de determinação dos erros de indicação de hidrômetros para água fria, previsto no Regulamento Técnico Metrológico a que se refere a Portaria Inmetro nº 246 de 17 de outubro de 2000.

10.8.2 Método

O ensaio de hidrômetro (mecânico ou eletrônico) em bancadas volumétricas objetiva a determinação dos erros de indicação na faixa de vazão aplicável ao medidor. Neste método de ensaio, a água, escoando a uma determinada vazão estável, é coletada em uma medida materializada de volume (MMV) calibrada que permite a determinação do volume de referência de água da medição e que será comparado com o volume totalizado pelo medidor sob ensaio.

10.8.3 Modelo matemático

O volume de água coletado na MMV durante a medição é igual ao seu volume de base, corrigido pelo efeito de expansão ou contração térmica da MMV se a sua temperatura for diferente da temperatura de base ou de referência. Como o recipiente constitui um volume, esta correção é equivalente à expansão ou contração cúbica do material utilizado, sendo que, para esse caso, assume-se que seja igual a três vezes a expansão térmica linear do material. Dessa forma, a correção é dada pela seguinte expressão:

$$V_p = V_b \cdot [1 + 3 \alpha_p (T_p - T_b)]$$

onde V_p é o volume de água contido na MMV, V_b é o volume da MMV referido à temperatura de base (normalmente adotada como 20 °C), α_p é o coeficiente de expansão térmica linear do material de construção da MMV, T_p é a temperatura da água na MMV e T_b é a temperatura de base.

Para se determinar o valor do volume de referência de água que passou através do hidrômetro, antes de fluir para a MMV, é necessário corrigir o volume de água contido na MMV levando-se em conta a expansão volumétrica do líquido devido à diferença de temperaturas. Assim:

$$V_{ref} = V_p \cdot [1 + \alpha_a (T_m - T_{ap})]$$

onde V_{ref} é o volume de referência de água que passou pelo hidrômetro referido à sua temperatura no hidrômetro, α_a é o coeficiente de expansão térmica volumétrica da água, T_m é a temperatura da água no hidrômetro e T_{ap} é a temperatura da água na MMV.

Com a determinação do valor do volume de referência de água que fluiu através do hidrômetro, é possível se determinar o seu erro percentual de medição. Ou seja:

$$\varepsilon = 100 \cdot \frac{V_{ind} - V_{ref}}{V_{ref}} \quad [\%]$$

onde ε é o erro relativo da medida obtida com o hidrômetro na vazão específica de operação, expresso em termos percentuais, e V_{ind} é o volume de água medido e indicado pelo hidrômetro sob ensaio.



10.8.4 Fontes de incerteza

As principais fontes de incerteza que afetam a confiabilidade dos resultados neste método volumétrico de ensaio são apresentadas a seguir:

- a) incerteza associada ao valor da medida materializada de volume utilizada (vaso padrão), obtida do seu certificado de calibração e normalmente expressa na forma de uma incerteza expandida, com distribuição normal, fator de abrangência k e nível da confiança de aproximadamente 95 %;
- b) incerteza decorrente da dispersão dos valores medidos em cada vazão de operação calibrada do medidor e que pode ser avaliada por meio do desvio padrão das medidas ou do desvio padrão da média; aplicado aos casos de ensaios com mais de uma medição por vazão. Para o caso de ensaios com apenas uma medição, essa incerteza pode ser estimada a partir da aplicação do método do tipo B de estimativa de incertezas;
- c) incerteza decorrente da limitação de resolução do dispositivo mostrador da medida materializada de volume utilizada como referência na calibração;
- d) incerteza devida à limitação de resolução do dispositivo mostrador do hidrômetro sob ensaio. Normalmente, esta incerteza deve ser considerada duas vezes no cálculo dado que, no ensaio do hidrômetro, a referida incerteza afeta as leituras dos volumes inicial e final;
- e) incerteza associada à correção imperfeita da dilatação volumétrica da medida materializada de volume sob condição de temperatura de medição diferente da condição base de 20 °C;
- f) incerteza associada à correção imperfeita do volume de água sob condição de temperatura de medição diferente da condição de base de 20 °C;
- g) incertezas associadas às medidas das temperaturas do material da MMV (T_p), da água na MMV (T_{ap}) e da água no medidor (T_m);
- h) incertezas associadas às grandezas de influência que podem afetar as medidas no processo de ensaio (exemplos: erro de paralaxe na leitura do nível de água na escala da MMV, esgotamento imperfeito da água da MMV entre medições, desnivelamento da MMV, eventual presença de bolhas de ar ou vapor d'água na linha, gradientes de temperatura na MMV e na água, variação de pressão manométrica quando de ensaios de hidrômetros em série etc.); e
- i) incerteza decorrente da incapacidade do modelo matemático utilizado representar com perfeição o modelo físico da medição.

Nota 1 - Para informações adicionais consultar o exemplo S12 do EA-4/02 M:2013.

Nota 2 - Para informações adicionais sobre a construção da MMV consultar a OIML R120:2010.

10.8.5 Expressão da incerteza

A seguir, é apresentado um exemplo de apresentação de resultados com a respectiva incerteza de medição para o ensaio de determinação dos erros de indicação de hidrômetros para água fria:

Vazão	Erro de Indicação	Incerteza de Medição
1.500 L/h	- 0,80 %	0,20 %