

Artigo Técnico

Calibração de hidrômetro para água fria de vazão nominal de 1,5 m³/h

Calibration of hydrometer for cold water of nominal flow of 1,5 m³/h

Ermes Costa Neto^{1*} , Matheus de Lima¹ , Tiago Leite Rolim² 

RESUMO

Com a crise hídrica vivida na atualidade, as concessionárias de água têm buscado soluções para diminuir as perdas de água. No sistema de abastecimento de água podem acontecer dois tipos, as perdas reais – ocasionadas por vazamentos na tubulação, transbordamentos e vazamentos nos reservatórios – e as perdas aparentes – causadas por fraudes, ligações clandestinas e erros de submedição dos hidrômetros. O acompanhamento periódico da confiabilidade metrológica dos hidrômetros, por meio de calibração, permite o apoio na decisão pela troca, ou não, reduzindo, assim, as perdas aparentes. Dessa forma, este artigo apresenta um método para calibração de hidrômetro para água fria, taquimétrico, monojato, classe B, de vazão nominal de 1,5 m³/h, tipo de medidor mais utilizado nas ligações residenciais, por meio da Portaria do INMETRO de nº 246, de 17 de outubro de 2000. O método proposto apresenta as condições para preparação dos medidores e da bancada, o sistema de medição, as possíveis fontes dos erros e suas respectivas incertezas associadas. Além do método de cálculo de incerteza de medição, conforme preconiza o guia para a expressão de incerteza de medição (GUM) da ISO, publicado em 2008. Foi realizada a calibração de três hidrômetros usados, fabricados nos anos de 2015, 2016 e 2017 e escolhidos aleatoriamente no parque de hidrômetros do município de Recife, gerido pela Companhia Pernambucana de Saneamento (COMPESA). Os resultados obtidos demonstram a viabilidade do método no apoio na troca dos hidrômetros pela análise comparativa entre os valores de referência do INMETRO e os medidos somados às incertezas.

Palavras-chave: calibração; hidrômetro; incerteza de medição.

ABSTRACT

With the current water crisis, water companies have been joining efforts to find solutions to reduce water losses. In a water supply system, there can be two types of losses, the real ones – caused by pipe leaks, tank leaks, and overflows in the reservoirs – and the apparent losses – caused by fraud, illegal connections, and metering inaccuracies. The periodic monitoring of the metrological reliability of the water meters through calibration allows supporting the decision on whether or not to change these water meters, thus reducing apparent losses. Therefore, this paper presented a method for calibrating the cold water, tachometer, monojate, class B water meters, with a nominal flow rate of 1.5 m³/h, the most commonly used type of meter for residential connections, through the INMETRO Ordinance No. 246, October 17, 2000. The proposed method presents the conditions for meter and bench preparation, the measurement system, the possible sources of errors, and their associated uncertainties. In addition to the measurement uncertainty calculation method, as recommended by the ISO Guideline for Measurement Uncertainty Expression (GUM), published in 2008. Three water meters in use, from the Pernambuco water company (COMPESA), manufactured in 2015, 2016, and 2017, were calibrated using the proposed method and bench. The results obtained demonstrate the viability of the method to support the change of water meters in the comparative analysis between INMETRO reference values and the measured value corrected with uncertainties.

Keywords: calibration; water meter; uncertainty.

INTRODUÇÃO

O abastecimento de água de uma cidade ou região depende sempre da relação entre a oferta de água e a demanda requerida. Assim, se por um lado há de se envidar esforços e recursos para ampliação da oferta, há de se também gerenciar a demanda, principalmente nos dias de hoje, em que a escassez dos

recursos naturais já é bastante evidenciada e grave (BÁGGIO, 2014, p. 18). O estudo da demanda visa determinar as vazões (volume de água pelo tempo) de dimensionamento das unidades que compõem um determinado sistema de abastecimento de água. Para o cálculo, faz-se necessário determinar o consumo *per capita* de água da região em estudo. Os principais fatores que

¹Escola Politécnica de Pernambuco, Universidade de Pernambuco - Recife (PE), Brasil.

²Universidade Federal de Pernambuco - Recife (PE), Brasil.

*Autor correspondente: ermescosta@poli.br

Conflitos de interesse: os autores declaram não haver conflito de interesses.

Financiamento: nenhum.

Recebido: 19/08/2019 - Aceito: 06/05/2020 - Reg. ABES: 20190247

influenciam o consumo *per capita*, de forma positiva ou negativa, são: a disponibilidade hídrica e o clima da região, o porte, as condições econômicas e o grau de industrialização das comunidades, a existência de medição de consumo residencial, o custo da água e a pressão com que ela chega às residências (SPERLING *et al.*, 2002).

Conforme relatório emitido pela ONU Brasil (ONU, 2018), o Brasil ocupa a 8ª posição no *ranking* internacional de países, quando é analisado o percentual anual de perdas de água. Esse relatório aponta ainda que, em 2016, o Brasil desperdiçou 38% da água potável. Assim, torna-se indispensável a redução de perdas de água nos sistemas de abastecimento. Segundo Gularte (2005), do total das perdas de água que acontecem no Brasil, na maioria dos casos, as perdas aparentes representam 50% dessas, sendo a submedição no parque de hidrômetros considerada a maior parcela.

O volume de água total no sistema de abastecimento de água pode ser quantificado pelo cálculo do balanço hídrico proposto pela International Water Association (IWA), que divide o volume em consumo autorizado (faturado e não faturado, medido e não medido) e perdas de água (real ou aparente) (LAMBERT; HIRNER, 2000). Entre os erros que geram perda de água, os de submedição estão diretamente relacionados com a falta de confiabilidade metrológica dos hidrômetros. Para tal, a Portaria nº 246 (INMETRO, 2000) estabelece as condições a que devem satisfazer os hidrômetros com vazão nominal de 0,6 a 15,0 m³/h, fornecendo os valores padrão para os erros máximos admissíveis que devem ser comparados durante a calibração, para a aprovação dos hidrômetros, bem como determina os meios e os parâmetros para serem realizadas as calibrações. A identificação e correção dos parâmetros que provocam os erros de medição pode ser utilizada para a diminuição da submedição, impactando a redução das perdas de água (THORTON; STURM; KUNKEL, 2008).

O objetivo deste trabalho foi realizar a calibração de hidrômetros para água fria de vazão nominal de 1,5 m³/h, estabelecendo a relação entre os valores medidos e os valores verdadeiros fornecidos por padrões, bem como as indicações correspondentes com as incertezas associadas, para, em seguida, estabelecer uma relação visando à obtenção de um resultado de medição a partir de uma indicação, por meio dos certificados de calibração. Foram utilizados três hidrômetros taquimétricos do tipo monojato, classe B, com vazão nominal de 1,5 m³/h, e o estudo teve como padrão a bancada de calibração de hidrômetros do laboratório de hidrometria da Companhia Pernambucana de Saneamento (COMPESA).

Os resultados obtidos demonstraram a aplicabilidade do método de calibração sugerido neste trabalho, bem como do levantamento dos possíveis erros de medição, da sua propagação e o cálculo da incerteza expandida. Sendo assim, é possível o uso desse procedimento pelos inúmeros laboratórios de avaliação e calibração de hidrômetros, permitindo a correção aditiva ou multiplicativa da indicação do valor medido com sua respectiva correção e incerteza associada.

REFERENCIAL TEÓRICO

Perdas de água

Para a efetividade das ações no combate às perdas de água, inicialmente é necessário compreender claramente os tipos de perdas de água que existem. A IWA define dois tipos de perdas como sendo principais: as reais e as aparentes.

As perdas reais estão relacionadas com o volume de água desperdiçado durante as diversas etapas do sistema de abastecimento, que incluem vazamentos nas tubulações, juntas e conexões, vazamentos nos reservatórios e também transbordamentos do reservatório. As perdas aparentes correspondem ao volume de água consumido, porém não faturado, devido a fraudes, ligações clandestinas, falhas de cadastro e erros de submedição nos hidrômetros, este último relacionado tanto com os erros e incertezas da medição quanto com problemas técnicos na medição dos medidores (LAMBERT; HIRNER, 2000).

Hidrômetro

Medidor de água, doravante denominado “hidrômetro”, é o instrumento destinado a medir e indicar continuamente o volume de água que o atravessa (Portaria nº 246 do INMETRO, 2000). Os hidrômetros são utilizados com o objetivo de realizar a medição da água e, posteriormente, a cobrança do volume medido, por isso são amplamente utilizados na medição do volume consumido pelos clientes de companhias de saneamento. Os hidrômetros são classificados de acordo com sua capacidade de medição, seu princípio de funcionamento e sua classe metrológica (SILVA, 2008).

Calibração

Calibração é o ato de comparar os valores fornecidos por padrões ou por normas regulamentadoras, sob condições especificadas, conhecidos como valores verdadeiros (VV), com os valores medidos (VM), obtidos por meio de medições realizadas conforme as condições especificadas (IPQ, 2017). A calibração permite verificar, por meio da comparação das medições com seus respectivos valores de referências, com o uso de padrões rastreados, o erro que o instrumento tem e a incerteza associada à medição (OLIVEIRA, 2010).

A incerteza da medição é um parâmetro associado ao resultado que indica a qualidade de uma medida de forma quantitativa, ela relata a dispersão dos valores que podem ser atribuídos ao mensurando. É possível levantar a contribuição das incertezas na calibração pelo cálculo proposto no guia para a expressão de incerteza de medição (GUM) (ISO, 2008).

METODOLOGIA

Bancada de calibração

A bancada de calibração é o meio utilizado para serem feitas as comparações entre o valor fornecido pelo hidrômetro (indicação) e o valor de referência do padrão (valor verdadeiro), permitindo o cálculo do erro de indicação, as incertezas associadas e, por conseguinte, o resultado da calibração.

O laboratório de hidrometria da COMPESA tem a bancada de calibração de hidrômetro do tipo volumétrico, apresentada na Figura 1, que foi utilizada na obtenção dos resultados deste trabalho. Essa bancada tem:

- sistema de circulação de água, contendo conjunto motor e bomba, tubulação e conexões e acessórios para colocação dos hidrômetros;
- sistema de medição padrão de vazão de água, em litros por segundo, contendo dois tanques de 100 e 10 L, válvulas globo para ajuste da vazão, painel elétrico para seleção dos tanques e ajuste do sistema de bombeamento, leitura dos valores de referência, rotâmetros, manômetros e painel digital com o valor da temperatura da água de circulação nos hidrômetros em calibração.



Fonte: elaboração própria.

Figura 1 – Bancada de calibração de hidrômetros da Companhia Pernambucana de Saneamento (COMPESA).

A bancada de calibração realiza a medição em litros de acordo com o mostrador do tanque escolhido, e o volume em litros é dividido pelo tempo, que é cronometrado em segundos, para obter a vazão em litros por segundo. A comparação com o hidrômetro é realizada entre o valor de referência (valor verdadeiro), que é obtido no mostrador do tanque em litros, e a subtração entre as leituras final e inicial realizadas no hidrômetro, que também é dada em litros.

Hidrômetro

O hidrômetro escolhido para este trabalho foi o hidrômetro para água fria taquimétrico, tipo monojato, classe B, de vazão nominal de 1,5 m³/h, conforme a Portaria nº 246 (INMETRO, 2000). Esse hidrômetro foi escolhido por ser o tipo mais utilizado nas ligações residenciais atendidas pela COMPESA.

O hidrômetro realiza a medição por meio de um mecanismo interno que é acionado pela passagem da água, gerando um movimento de rotação, acionando um totalizador que faz registros proporcionais à rotação, indicando o volume em metros cúbicos ou em litros.

Enquadramento metodológico

O enquadramento metodológico tem como objetivo apresentar e esclarecer os procedimentos utilizados durante a pesquisa, nos temas: natureza da pesquisa (pesquisa quanto aos resultados), abordagem do problema, pesquisa baseada no objetivo geral (natureza do objetivo) e procedimentos técnicos.

Dessa forma, a natureza da pesquisa é do tipo aplicada, pois permite a aplicação prática do procedimento de calibração proposto, dirigido para a correção da medição de hidrômetros. A abordagem do problema é do tipo quantitativa,

pois permite a relação entre os valores medidos do hidrômetro e os valores de referência do padrão, permitindo objetivamente, por meio de modelos matemáticos, traduzidos em números, o cálculo do resultado, a correção da medição e sua respectiva incerteza expandida. A pesquisa baseada no objetivo geral é do tipo descritiva, pois tem a finalidade de criar um método de calibração para hidrômetros, além de permitir o cálculo da incerteza expandida.

O procedimento técnico adotado é de estudo de caso, visto que é proposto um procedimento de calibração de hidrômetros. Inicialmente, foi realizado o estudo da Portaria nº 246 (INMETRO, 2000) para conhecer o procedimento da calibração, bem como os seus valores de referência, que serão utilizados para a avaliação dos hidrômetros calibrados. Também foi realizado um estudo no guia para a expressão da incerteza da medição GUM (ISO, 2008), para obter conhecimento sobre como expressar os valores para cada incerteza de medição encontrada no processo.

Na sequência, foi realizado um estudo na bancada de medição da COMPESA, para entendimento sobre seu funcionamento e levantamento sobre os erros associados ao processo que geram incertezas de medição. Após o levantamento dos dados, foi criado um método de calibração com base no funcionamento da bancada de medição da COMPESA e da Portaria nº 246 (INMETRO, 2000), e foram realizados os cálculos das contribuições das incertezas de medição seguindo as recomendações do GUM (ISO, 2008). A partir do método definido, foi realizada a calibração de três hidrômetros, para servir de aplicação para o método bem como para os cálculos da incerteza da medição.

Método de calibração

Para a descrição do método de calibração, foi adotada a Portaria nº 246 (INMETRO, 2000). A bancada descrita neste artigo é utilizada para a aplicação do método conforme os passos descritos neste item.

Preparação da amostra e bancada

Foram adotados os passos:

- Passo 1: preparar a amostra mantendo o hidrômetro em um ambiente climatizado com temperatura entre 22 e 28°C por, pelo menos, cinco horas;
- Passo 2: instalar o hidrômetro na bancada de calibração;
- Passo 3: retirar o ar da tubulação, permitindo a passagem de água por todo o sistema;
- Passo 4: preencher os tanques com água para retirar o condensado no interior do tanque.

Medição

A medição foi realizada nos hidrômetros especificados neste artigo. Conforme determina o ensaio de verificação dos erros de indicação, descrito no item 8.4 da Portaria nº 246 (INMETRO, 2000), devem ser realizadas as medições nos três seguintes intervalos das vazões máxima ($Q_{máx}$), de transição (Q_t) e mínima ($Q_{mín}$). Sendo esses intervalos entre:

- $0,45 Q_{máx}$ e $0,5 Q_{máx}$;
- Q_t e $1,1 Q_t$;
- $Q_{mín}$ e $1,1 Q_{mín}$.

Para o tipo de hidrômetro adotado, sabendo-se que $0,5 Q_{máx}$ é igual à vazão nominal, esses valores são conhecidos conforme a Figura 2, em que os valores estão em m³/h.

Classes metrológicas		Vazão nominal (m³/h)									
		0,6	0,75	1,0	1,5	2,5	3,5	5,0	6,0	10,0	15,0
A	Q _{min} (m³/h)	0,024	0,030	0,040	0,040	0,100	0,140	0,200	0,240	0,400	0,600
	Q _t (m³/h)	0,060	0,075	0,100	0,150	0,250	0,350	0,500	0,600	1,000	1,500
B	Q _{min} (m³/h)	0,012	0,015	0,020	0,030	0,050	0,070	0,100	0,120	0,200	0,300
	Q _t (m³/h)	0,048	0,060	0,080	0,120	0,200	0,280	0,400	0,480	0,800	1,200
C	Q _{min} (m³/h)	0,006	0,0075	0,010	0,015	0,025	0,035	0,050	0,060	0,100	0,150
	Q _t (m³/h)	0,009	0,0110	0,015	0,0225	0,0375	0,0525	0,075	0,090	0,150	0,225

Fonte: Portaria nº 246 (INMETRO, 2000).

Figura 2 - Valores da vazão nominal por classe metrológica.

- Após a realização dos passos descritos, são sugeridos os próximos passos:
- Passo 5: selecionar a vazão de trabalho. Na bancada de calibração, a escolha da vazão é feita selecionando no painel de controle o tanque que será utilizado e o volume que será medido, 100 L para a vazão nominal e 10 L para a vazão mínima e de transição, e ajustando o rotâmetro para a vazão escolhida;
 - Passo 6: realizar a leitura inicial. Registrar o valor indicado no mostrador do hidrômetro;
 - Passo 7: permitir a passagem da água pela bancada com o volume e a vazão preestabelecidos, acionando o tempo, por meio de um cronômetro, no início do funcionamento para determinar a vazão real, e registrar a temperatura da água durante a calibração, que pode ser visualizada no painel de controle da bancada de calibração;
 - Passo 8: realizar a leitura final, registrando o valor indicado no mostrador do hidrômetro após a passagem da água e o volume escoado indicado no mostrador do tanque;
 - Passo 9: repetir os passos de 6 até 8 para n medições realizadas com a mesma vazão;
 - Passo 10: repetir os passos de 5 até 9 para vazões nos intervalos entre 0,45 Q_{máx} e 0,5 Q_{máx}, entre Q_t e 1,1 Q_t, e entre Q_{min} e 1,1 Q_{min}, que são determinadas pela Portaria nº 246 (INMETRO, 2000).

Modelo matemático da medição

Sabendo-se que o valor medido médio (VMM) e o valor verdadeiro médio (VMM), respectivamente, são calculados pelas Equações 1 e 2 e os seus respectivos resultados têm as unidades em litros.

$$VMM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Lf - Li)_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n VM_i \tag{1}$$

$$VMM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Ve_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n VV_i \tag{2}$$

Em que:

Lf = a leitura final registrada no hidrômetro (litros);

Li = a leitura inicial registrada no hidrômetro (litros);

VM = o valor medido (litros);

Ve = o valor do volume escoado (litros) indicado no mostrador do tanque;

VV = o valor verdadeiro da medição (litros).

Pode-se sugerir que a Equação 1 é o modelo matemático da medição, com uma única variável e de medição direta.

Cálculo do erro de medição

Para o cálculo dos erros, são sugeridos os seguintes passos:

- Passo 11: calcular os erros de cada medição conforme a Equação 3, de acordo com a recomendação da Portaria nº 246 (INMETRO, 2000).

$$E = \left[\frac{(Lf - Li) - Ve}{Ve} \right] \times 100 = \left(\frac{VM - VV}{VV} \right) \times 100 \tag{3}$$

- Passo 12: calcular o erro médio (E_m) para n medições, conforme a Equação 4:

$$E_m = \frac{(VMM - VVM)}{VVM} \times 100 \tag{4}$$

Cálculo da incerteza de medição

O GUM (ISO, 2008) reconhece dois tipos de incerteza de medição, a incerteza do tipo A é associada aos efeitos aleatórios que contribuem para o erro, é relacionada ao conceito de desvio padrão, e a incerteza do tipo B é associada aos efeitos sistemáticos que contribuem para o erro. Sendo assim, a incerteza de medição é uma expressão do fato de que, para um dado mensurando e um dado resultado de medição, não há um único valor, mas sim infinitos valores em uma determinada faixa.

Cálculo da incerteza do tipo A

Segundo o GUM (ISO, 2008), o valor da incerteza do tipo A $u_A(VMM)$, devido às medidas realizadas, pode ser considerado o valor do desvio padrão da média dos valores medidos, de acordo com a Equação 5.

$$s_{(VMM)} = \frac{S(VM)}{\sqrt{n}} = u_A(VM) \tag{5}$$

Em que:

S_(VMM) = o desvio padrão da média (litros);

S_(VM) = o desvio padrão dos valores medidos (VM) (litros);

n = o número de medições (adimensional).

Para o cálculo da incerteza do tipo A, é sugerido o seguinte passo.

- Passo 13: realizar o cálculo da incerteza do tipo A, conforme a Equação 5.

Cálculo da incerteza do tipo B

A avaliação da incerteza do tipo B é realizada por meio de julgamento científico baseado em todas as informações disponíveis, na experiência e no conhecimento geral da medição. Com base nas informações fornecidas pelo GUM (ISO, 2008), foi realizado o levantamento das principais fontes de erros do resultado de medição, de acordo com a Figura 3.

Sendo assim, por meio do somatório das incertezas associadas, obtém-se a incerteza do tipo B $u_B(VM)$, calculada pela Equação 6, que representa a variância combinada associada com as incertezas do tipo B.

$$u_B^2(VM) = \left[\begin{matrix} u^2(VM_{IH}) + u^2(VM_{TU}) + u^2(VM_{AR}) + u^2(VM_{AT}) + u^2(VM_V) + \dots \\ u^2(VM_{RE}) + u^2(VM_{EV}) + u^2(VM_{EA}) + u^2(VM_{RM}) + \dots \\ u^2(VM_{HD}) + u^2(VM_{FI}) + u^2(VM_{QM}) \end{matrix} \right] \quad (6)$$

Em que:

- $u(VM_{IH})$ = incerteza do hidrômetro que será calibrado;
- $u(VM_{TU})$ = incerteza devido à variação da temperatura ambiente e da umidade relativa do ar durante a calibração;
- $u(VM_{AR})$ = incerteza devido ao erro da bancada pela entrada de ar no reservatório;
- $u(VM_{AT})$ = incerteza devido ao erro da bancada pela entrada de ar na tubulação;
- $u(VM_V)$ = incerteza devido ao erro da bancada por vazamentos na tubulação;
- $u(VM_{RE})$ = incerteza devido à variação da rede elétrica que altera o funcionamento da bomba influenciando na vazão de trabalho da bancada;
- $u(VM_{EV})$ = incerteza devido ao erro na visualização do mostrador de volume escoado;
- $u(VM_{EA})$ = incerteza devido ao erro de arredondamento;
- $u(VM_{RM})$ = incerteza devido à resolução do mostrador de volume;

- $u(VM_{HD})$ = incerteza devido ao erro mecânico dos hidrômetros que permitem o escoamento do volume sem realizar o registro;
- $u(VM_{FI})$ = incerteza devido à fixação inadequada dos hidrômetros;
- $u(VM_{QM})$ = incerteza devido à quantidade de medições.

Em seguida, foi relacionada cada fonte de erro sua respectiva incerteza associada, determinando as distribuições de probabilidade e obtendo suas expressões conforme representação na coluna “incerteza padrão” na Tabela 1, sabendo que na tabela o valor a é a resolução do mostrador do tanque da bancada de calibração, o valor b é a resolução do hidrômetro, o valor n é o número de medições realizadas e o valor $s_{(VMM)}$ é o desvio padrão descrito na Equação 5.

Para o cálculo da incerteza do tipo B, é sugerido o seguinte passo.

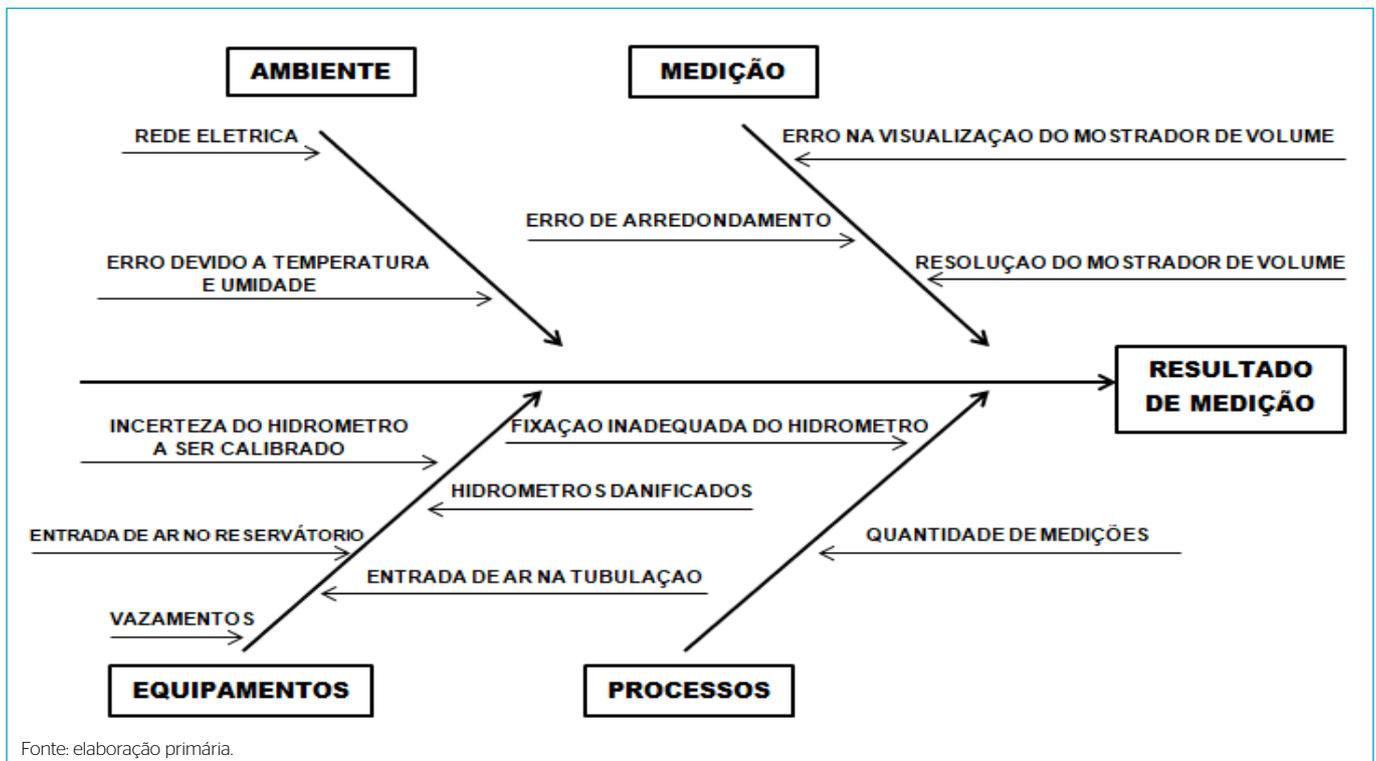
- Passo 14: calcular a incerteza do tipo B para cada fonte de erro, de acordo com a Tabela 1.

Cálculo da incerteza combinada

Para o cálculo da incerteza padrão combinada $u_c(VMM)$, utiliza-se a raiz quadrada positiva da variância combinada $u_c^2(VMM)$ (ISO, 2008), conforme Equação 7.

$$u_c(VMM) = \sqrt{u_c^2(VMM)} = \sqrt{\sum_{j=1}^n \left(\frac{\partial VMM}{\partial VM_j} \right)^2 u^2(VM_j)} \quad (7)$$

As incertezas do tipo A e B relacionadas a única variável do modelo matemático descrito na Equação 1 devem ser propagadas para gerar a incerteza padrão combinada $u_c(VMM)$. Além disso, os coeficientes de sensibilidade serão todos iguais a 1, pelo fato de o modelo matemático da medição ser de



Fonte: elaboração primária.

Figura 3 - Fontes de erros do sistema de medição.

Tabela 1 - Expressões da incerteza padrão do tipo B.

Item (i)	Variável $u(x_i)$	Descrição	Distribuição de probabilidade	Incerteza padrão (i)
1	$u(VM_{HP})$	Incerteza do próprio hidrômetro.	Retangular	$\frac{b}{\sqrt{3}}$
2	$u(VM_{TL})$	Incerteza devido à temperatura ambiente e a umidade relativa do ar.	Retangular	$\frac{a}{2}$
3	$u(VM_{AR})$	Incerteza devido à entrada de ar no reservatório.	Normal	$1,033 S_{(VMM)}$
4	$u(VM_{AT})$	Incerteza devido à entrada de ar na tubulação.	Normal	$1,033 S_{(VMM)}$
5	$u(VM_V)$	Incerteza devido aos vazamentos na tubulação.	Normal	$1,033 S_{(VMM)}$
6	$u(VM_{RE})$	Incerteza devido à variação da rede elétrica.	Normal	$\frac{S_{(VMM)}}{1,96}$
7	$u(VM_{EV})$	Incerteza devido ao erro na visualização do mostrado de volume escoado.	Retangular	$\frac{2a}{\sqrt{3}}$
8	$u(VM_{EA})$	Incerteza devido ao erro de arredondamento.	Retangular	$\frac{b}{2}$
9	$u(VM_{RM})$	Incerteza devido à resolução do mostrador de volume.	Retangular	$\frac{a}{\sqrt{3}}$
10	$u(VM_{HD})$	Incerteza devido ao erro mecânico dos hidrômetros.	Normal	$1,48 S_{(VMM)}$
11	$u(VM_{FF})$	Incerteza devido à fixação inadequada dos hidrômetros.	Normal	$\frac{S_{(VMM)}}{1,96}$
12	$u(VM_{QM})$	Incerteza devido à quantidade de medições.	Normal	$\frac{S_{(VMM)}}{n}$

Fonte: elaboração própria.

uma única variável (ou seja, independente) e de medição direta. Dessa forma, $u_c(VMM)$ é descrita pela Equação 8.

$$u_c(VMM) = \sqrt{u_A^2(VMM) + u_B^2(VMM)} \tag{8}$$

Para o cálculo da incerteza combinada, é sugerido o seguinte passo.

- Passo 15: calcular a incerteza combinada conforme a Equação 8.

Cálculo da incerteza expandida e do erro máximo

A incerteza expandida U é obtida multiplicando a incerteza padrão combinada $u_c(VMM)$ por um fator de abrangência k . Neste artigo, para o fator de abrangência, foi adotado $k=2$, que produz um intervalo tendo no nível da confiança de aproximadamente 95,45%, segundo o GUM (ISO, 2008), tendo-se obtido a Equação 9.

$$U = 2 \times u_c(VMM) \tag{9}$$

Para o cálculo da incerteza expandida, é sugerido o seguinte passo.

- Passo 16: calcular a incerteza expandida conforme a Equação 9.

Após o cálculo da incerteza expandida, em litros, é preciso calcular o erro máximo levando-se em consideração essa dispersão dos valores, pois, conforme a Portaria nº 246 (INMETRO, 2000), os erros são os valores que são comparados nas calibrações de hidrômetros. Para o cálculo do erro máximo, é considerado o menor valor dentro do intervalo expresso pelo resultado associado à incerteza expandida, que é o volume medido médio menos o valor da incerteza expandida. O erro máximo é calculado conforme a Equação 10.

$$E_{máximo} = \frac{(VMM - U) - VVM}{VVM} \times 100 \tag{10}$$

Para o cálculo do erro máximo, é sugerido o seguinte passo.

- Passo 17: calcular o erro máximo conforme a Equação 10.

Após a realização dos passos descritos, são sugeridos os próximos passos para a análise de resultados e emissão de certificados.

- Passo 18: comparar os valores dos erros médios (passo 12) e máximos (passo 17) aos erros máximos admissíveis apresentados no item 8.5 da Portaria nº 246 (INMETRO, 2000), para posterior aprovação ou reprovação do hidrômetro. Assim, os erros máximos não podem ultrapassar $\pm 10\%$ para as vazões entre Q_{min} inclusive e Q_i exclusive, e, para vazões entre Q_i inclusive e Q_{max} inclusive, os erros máximos não podem ultrapassar $\pm 5\%$. Quando é realizada mais de uma medição por intervalo de vazão, o erro comparado com os valores de referência é o erro médio;
- Passo 19: emitir o certificado da calibração apresentando os resultados, os valores de referência fornecidos pela Portaria nº 246 (INMETRO, 2000) e o procedimento de calibração.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Utilizando-se o método de calibração, foi realizada a calibração de três hidrômetros, com fabricação nos anos de 2015, 2016 e 2017, identificados, respectivamente, como A15S-014454, A16B-004671 e A17S-593203. Esses foram escolhidos aleatoriamente no parque de hidrômetros do município de Recife, pela COMPESA, concessionária do sistema de abastecimento de água. Por critérios adotados pelas concessionárias, os hidrômetros são substituídos a cada 5 anos, sendo assim, não justificava a calibração de hidrômetros com uma idade superior a 5 anos. Dessa forma, foram escolhidos hidrômetros com idade inferior a 5 anos. Para a calibração, foi utilizada a bancada de medição e foram realizadas três medições para cada intervalo de vazão estabelecido pela Portaria nº 246

(INMETRO, 2000). O resultado dessas medições, os erros e os valores médios foram registrados conforme apresentado nas Tabelas 2, 3 e 4.

Após serem feitas as medições, foram realizados os cálculos do desvio padrão e encontrados os valores das incertezas do tipo A, conforme a Tabela 5, e do tipo B, conforme as Tabelas 6, 7 e 8. Com os valores das incertezas do tipo A e

do tipo B já definidos, foram calculados os valores da incerteza padrão combinada e da incerteza expandida, conforme a Tabela 9.

Com os valores das incertezas definidos, foi possível obter os resultados apresentados na Tabela 10, que são comparados aos valores de referência determinados pela Portaria nº 246 (INMETRO, 2000).

Tabela 2 – Valores da medição realizada no hidrômetro A15S-014454, na temperatura ambiente durante a medição de 27°C.

Vazão (l/h) Entre:	Medição	Li (λ)	Lf (λ)	VM (λ)	Ve (λ)	Tempo (s)	Vazão leitura (l/h)	E (%)
0,45 $Q_{máx}$ e 0,5 $Q_{máx}$ (1350 até 1500)	1	513,80	610,22	96,42	100,02	241	1494,07	- 3,599
	2	610,22	707,28	97,06	100,00	240	1500,00	- 2,940
	3	707,28	804,16	96,88	100,02	241	1494,07	- 3,139
Q_1 e 1,1 Q_1 (120 até 132)	1	806,72	815,98	9,26	10,01	290	124,20	- 7,446
	2	815,98	825,32	9,34	10,01	291	123,77	- 6,647
	3	825,32	834,62	9,30	10,01	291	123,77	- 7,046
Q_{min} e 1,1 Q_{min} (30 até 33)	1	835,36	841,12	5,76	10,00	1105	32,58	- 42,400
	2	841,12	846,96	5,84	10,01	1106	32,57	- 41,629
	3	846,96	852,88	5,92	10,01	1105	32,60	- 40,830

Fonte: elaboração própria.

Tabela 3 – Valores da medição realizada no hidrômetro A16B-004671, na temperatura ambiente durante a medição de 27°C.

Vazão (l/h) Entre:	Medição	Li (λ)	Lf (λ)	VM (λ)	Ve (λ)	Tempo (s)	Vazão leitura (l/h)	E (%)
0,45 $Q_{máx}$ e 0,5 $Q_{máx}$ (1350 até 1500)	1	481,12	578,72	97,60	100,02	241	1494,07	- 2,420
	2	578,72	676,14	97,42	100,00	240	1500,00	- 2,580
	3	676,14	773,92	97,78	100,02	241	1494,07	- 2,240
Q_1 e 1,1 Q_1 (120 até 132)	1	776,60	786,48	9,88	10,01	290	124,20	- 1,249
	2	786,48	796,30	9,82	10,01	291	123,77	- 1,849
	3	796,30	806,18	9,88	10,01	291	123,77	- 1,249
Q_{min} e 1,1 Q_{min} (30 até 33)	1	806,92	816,74	9,82	10,00	1105	32,58	- 1,800
	2	816,74	826,52	9,78	10,01	1106	32,57	- 2,249
	3	826,52	836,32	9,80	10,01	1105	32,60	- 2,049

Fonte: elaboração própria.

Tabela 4 – Valores da medição realizada no hidrômetro A17S-593203, na temperatura ambiente durante a medição de 27°C.

Vazão (l/h) Entre:	Medição	Li (λ)	Lf (λ)	VM (λ)	Ve (λ)	Tempo (s)	Vazão leitura (l/h)	E (%)
0,45 $Q_{máx}$ e 0,5 $Q_{máx}$ (1350 até 1500)	1	341,10	439,12	98,02	100,02	241	1494,07	- 2,000
	2	439,12	537,24	98,12	100,00	240	1500,00	- 1,880
	3	537,24	635,30	98,06	100,02	241	1494,07	- 1,960
Q_1 e 1,1 Q_1 (120 até 132)	1	637,96	647,56	9,60	10,01	290	124,20	- 4,048
	2	647,56	657,18	9,62	10,01	291	123,77	- 3,848
	3	657,18	666,82	9,64	10,01	291	123,77	- 3,648
Q_{min} e 1,1 Q_{min} (30 até 33)	1	667,72	676,20	8,48	10,00	1105	32,58	- 15,200
	2	676,20	684,80	8,60	10,01	1106	32,57	- 14,043
	3	684,80	693,32	8,52	10,01	1105	32,60	- 14,843

Fonte: elaboração própria.

Tabela 5 - Valores da incerteza do tipo A para os três hidrômetros.

Hidrômetro	Vazão (l/h) Entre:	VVM (λ)	VVM (λ)	E_m (%)	$S_{(VM)}$ (λ)	n	$S_{(VMM)}$ (λ)
A15S-014454	0,45 $Q_{m\acute{a}x}$ e 0,5 $Q_{m\acute{a}x}$ (1350 até 1500)	100,01	96,79	- 3,226	0,330	3	0,191
	Q_t e 1,1 Q_t (120 até 132)	10,01	9,30	- 7,046	0,040	3	0,023
	Q_{min} e 1,1 Q_{min} (30 até 33)	10,00	5,84	- 41,619	0,080	3	0,046
A16B-004671	0,45 $Q_{m\acute{a}x}$ e 0,5 $Q_{m\acute{a}x}$ (1350 até 1500)	100,01	97,60	- 2,413	0,180	3	0,104
	Q_t e 1,1 Q_t (120 até 132)	10,01	9,86	- 1,449	0,035	3	0,020
	Q_{min} e 1,1 Q_{min} (30 até 33)	10,00	9,80	- 2,033	0,020	3	0,012
A17S-593203	0,45 $Q_{m\acute{a}x}$ e 0,5 $Q_{m\acute{a}x}$ (1350 até 1500)	100,01	98,07	- 1,946	0,050	3	0,029
	Q_t e 1,1 Q_t (120 até 132)	10,01	9,62	- 3,848	0,020	3	0,012
	Q_{min} e 1,1 Q_{min} (30 até 33)	10,00	8,53	- 14,695	0,061	3	0,035

Fonte: elaboração própria.

Tabela 6 - Valores da incerteza padrão do tipo B para o hidrômetro A15S-014454.

Variável	Descrição	Contribuição das incertezas		
		0,45 $Q_{m\acute{a}x}$ e $Q_{m\acute{a}x}$	Q_t e 1,1 Q_t	Q_{min} e 1,1 Q_{min}
$u(VM_{Hf})$	Incerteza do próprio hidrômetro.	0,0115	0,0115	0,0115
$u(VM_{TU})$	Incerteza devido à temperatura ambiente e a umidade relativa do ar.	0,0100	0,0025	0,0025
$u(VM_{AR})$	Incerteza devido à entrada de ar no reservatório.	0,3409	0,0413	0,0826
$u(VM_{AT})$	Incerteza devido à entrada de ar na tubulação.	0,3409	0,0413	0,0826
$u(VM_V)$	Incerteza devido aos vazamentos na tubulação.	0,3409	0,0413	0,0826
$u(VM_{RE})$	Incerteza devido à variação da rede elétrica.	0,1684	0,0204	0,0408
$u(VM_{EV})$	Incerteza devido ao erro na visualização do mostrado de volume escoado.	0,0231	0,0058	0,0058
$u(VM_{EA})$	Incerteza devido ao erro de arredondamento.	0,0100	0,0100	0,0100
$u(VM_{RM})$	Incerteza devido à resolução do mostrador de volume.	0,0115	0,0029	0,0029
$u(VM_{HD})$	Incerteza devido ao erro mecânico dos hidrômetros.	0,1684	0,0204	0,0408
$u(VM_{Ff})$	Incerteza devido à fixação inadequada dos hidrômetros.	0,4885	0,0592	0,1184
$u(VM_{QM})$	Incerteza devido à quantidade de medições.	0,0635	0,0077	0,0154

Fonte: elaboração própria.

Tabela 7 -Valores da incerteza padrão do tipo B para o hidrômetro A16B-004671

Variável	Descrição	Contribuição das incertezas		
		0,45 $Q_{m\acute{a}x}$ e 0,5 $Q_{m\acute{a}x}$	Q_t e 1,1 Q_t	Q_{min} e 1,1 Q_{min}
$u(VM_{Hf})$	Incerteza do próprio hidrômetro.	0,0115	0,0115	0,0115
$u(VM_{TU})$	Incerteza devido à temperatura ambiente e a umidade relativa do ar.	0,0100	0,0025	0,0025
$u(VM_{AR})$	Incerteza devido à entrada de ar no reservatório.	0,1859	0,0358	0,0207
$u(VM_{AT})$	Incerteza devido à entrada de ar na tubulação.	0,1859	0,0358	0,0207
$u(VM_V)$	Incerteza devido aos vazamentos na tubulação.	0,1859	0,0358	0,0207
$u(VM_{RE})$	Incerteza devido à variação da rede elétrica.	0,0918	0,0177	0,0102
$u(VM_{EV})$	Incerteza devido ao erro na visualização do mostrado de volume escoado.	0,0231	0,0058	0,0058
$u(VM_{EA})$	Incerteza devido ao erro de arredondamento.	0,0100	0,0100	0,0100
$u(VM_{RM})$	Incerteza devido à resolução do mostrador de volume.	0,0115	0,0029	0,0029
$u(VM_{HD})$	Incerteza devido ao erro mecânico dos hidrômetros.	0,2664	0,0513	0,0296
$u(VM_{Ff})$	Incerteza devido à fixação inadequada dos hidrômetros.	0,0918	0,0177	0,0102
$u(VM_{QM})$	Incerteza devido à quantidade de medições.	0,0346	0,0067	0,0038

Fonte: elaboração própria.

Tabela 8 – Valores da incerteza padrão do tipo B para o hidrômetro A17S-593203

Variável	Descrição	Contribuição das incertezas		
		0,45 $Q_{máx}$ e 0,5 $Q_{máx}$	Q_t e 1,1 Q_t	Q_{min} e 1,1 Q_{min}
$u(VM_H)$	Incerteza do próprio hidrômetro.	0,0115	0,0115	0,0115
$u(VM_{TU})$	Incerteza devido à temperatura ambiente e a umidade relativa do ar.	0,0100	0,0025	0,0025
$u(VM_{AR})$	Incerteza devido à entrada de ar no reservatório.	0,0520	0,0207	0,0631
$u(VM_{AT})$	Incerteza devido à entrada de ar na tubulação.	0,0520	0,0207	0,0631
$u(VM_V)$	Incerteza devido aos vazamentos na tubulação.	0,0520	0,0207	0,0631
$u(VM_{RE})$	Incerteza devido à variação da rede elétrica.	0,0257	0,0102	0,0312
$u(VM_{EV})$	Incerteza devido ao erro na visualização do mostrado de volume escoado.	0,0231	0,0058	0,0058
$u(VM_{EA})$	Incerteza devido ao erro de arredondamento.	0,0100	0,0100	0,0100
$u(VM_{RM})$	Incerteza devido à resolução do mostrador de volume.	0,0115	0,0029	0,0029
$u(VM_{HD})$	Incerteza devido ao erro mecânico dos hidrômetros.	0,0745	0,0296	0,0904
$u(VM_{FF})$	Incerteza devido à fixação inadequada dos hidrômetros.	0,0257	0,0102	0,0312
$u(VM_{QM})$	Incerteza devido à quantidade de medições.	0,0097	0,0038	0,0118

Fonte: elaboração própria.

Tabela 9 – Valores da incerteza padrão combinada e da incerteza expandida.

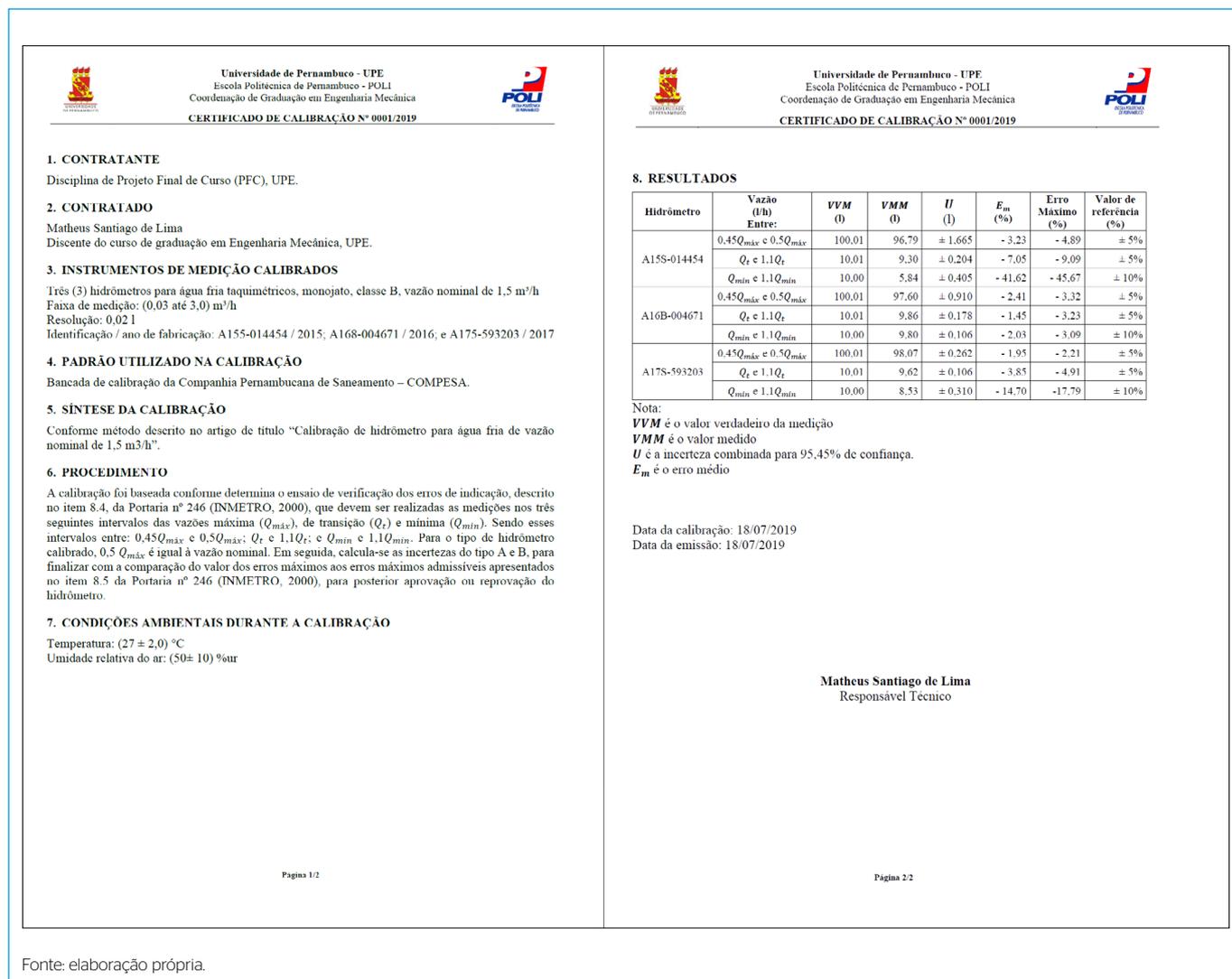
Hidrômetro	Vazão (L/h) Entre:	Incerteza padrão combinada U_c^2 (VMM) (l)	Incerteza expandida U (l)
A15S-014454	0,45 $Q_{máx}$ e 0,5 $Q_{máx}$	± 0,8327	± 1,6655
	Q_t e 1,1 Q_t	± 0,1022	± 0,2044
	Q_{min} e 1,1 Q_{min}	± 0,2024	± 0,4048
A16B-004671	0,45 $Q_{máx}$ e 0,5 $Q_{máx}$	± 0,4549	± 0,9098
	Q_t e 1,1 Q_t	± 0,0889	± 0,1779
	Q_{min} e 1,1 Q_{min}	± 0,0531	± 0,1063
A17S-593203	0,45 $Q_{máx}$ e 0,5 $Q_{máx}$	± 0,1308	± 0,2616
	Q_t e 1,1 Q_t	± 0,0531	± 0,1063
	Q_{min} e 1,1 Q_{min}	± 0,1550	± 0,3099

Fonte: elaboração própria.

Tabela 10 – Resultados das calibrações.

Hidrômetro	Vazão (L/h) Entre:	VVM (l)	VVM (l)	U (l)	E_m (%)	Erro Máximo (%)	Valor de referência (%)
A15S-014454	0,45 $Q_{máx}$ e 0,5 $Q_{máx}$	100,01	96,79	± 1,665	- 3,23	- 4,89	± 5%
	Q_t e 1,1 Q_t	10,01	9,30	± 0,204	- 7,05	- 9,09	± 5%
	Q_{min} e 1,1 Q_{min}	10,00	5,84	± 0,405	- 41,62	- 45,67	± 10%
A16B-004671	0,45 $Q_{máx}$ e 0,5 $Q_{máx}$	100,01	97,60	± 0,910	- 2,41	- 3,32	± 5%
	Q_t e 1,1 Q_t	10,01	9,86	± 0,178	- 1,45	- 3,23	± 5%
	Q_{min} e 1,1 Q_{min}	10,00	9,80	± 0,106	- 2,03	- 3,09	± 10%
A17S-593203	0,45 $Q_{máx}$ e 0,5 $Q_{máx}$	100,01	98,07	± 0,262	- 1,95	- 2,21	± 5%
	Q_t e 1,1 Q_t	10,01	9,62	± 0,106	- 3,85	- 4,91	± 5%
	Q_{min} e 1,1 Q_{min}	10,00	8,53	± 0,310	- 14,70	- 17,79	± 10%

Fonte: elaboração própria.



Fonte: elaboração própria.

Figura 4 – Certificado de calibração.

Comparando-se os valores da coluna “Valor de referência (%)” com os valores das colunas “ E_m (%)” e “Erro máximo (%)”, conforme preconiza o passo 18 do método proposto, obtém-se que os três hidrômetros apresentaram valores dentro do determinado para as vazões entre $0,45Q_{max}$ e $0,5Q_{max}$, o hidrômetro A15S-014454 não atende entre Q_t e $1,1Q_t$, e somente o hidrômetro A16B-004671 atende entre Q_{min} e $1,1Q_{min}$. Ao término da calibração, foi emitido o certificado de calibração, como apresentado na Figura 4.

CONCLUSÕES

O método de calibração de hidrômetros apresentado é uma possível solução para apoio na decisão de troca de hidrômetros em uso nos clientes, que poderão gerar redução de perdas de água, especialmente ocasionadas pela submedição nos hidrômetros. Isso porque é possível realizar análise comparativa, com confiabilidade metrológica, entre os valores de referência da Portaria nº 246 (INMETRO, 2000) e os valores encontrados na calibração, permitindo, assim,

aprovar, ou não, os hidrômetros analisados. As etapas do método de calibração foram elaboradas conforme determina a Portaria nº 246 (INMETRO, 2000); as incertezas associadas, os erros de medição e o cálculo de incerteza foram construídas segundo o GUM (ISO, 2008). É importante destacar que o método de calibração proposto foi desenvolvido para o hidrômetro de água fria, classe B, de vazão nominal de 1,5 m³/h, com o uso da bancada de medição da COMPESA. Caso seja necessário aplicar o método proposto para outros tipos de hidrômetros, ou diferentes bancadas de calibração, será necessário adaptar o método, com adequações de intervalos de vazões e instrumentos desses disponíveis.

CONTRIBUIÇÕES DOS AUTORES

Lima, M. S.: Investigação, Curadoria de Dados, Escrita – Primeira Redação.
Costa Neto, E. F.: Conceituação, Supervisão, Análise Formal, Metodologia, Escrita – Revisão e Edição. Rolim, T. L.: Administração do Projeto.

REFERÊNCIAS

- BÁGGIO, M.A. *Redução de perdas em sistemas de abastecimento de água*. 2. ed. Brasília: Funasa, 2014. 172 p.
- GULARTE, C. *Um Estudo sobre a Submedição em Hidrômetros para Aplicação no Controle de Perdas Aparentes no Sistema de Abastecimento de Água de Blumenau*. Dissertação (Mestrado em Metrologia) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.
- INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA (INMETRO). *Portaria nº 246, de 17 de outubro de 2000*. Aprova o Regulamento Técnico Metrológico para hidrômetros de água fria, de vazão nominal até 15 m³/h. Brasília: INMETRO, out. 2000.
- INSTITUTO PORTUGUÊS DA QUALIDADE (IPQ). *Vocabulário internacional termos de metrologia legal (VIML)*. Caparica: IPQ, 2017.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). *Guia para a expressão de incerteza de medição (GUM)*. ISO, 2008.
- LAMBERT, A.; HIRNER, W. *Losses from water supply systems: Standard terminology and recommended performance measures*. Londres: IWA, The Blue Pages, 2000.
- OLIVEIRA, M. *Desenvolvimento de um medidor de vazão termal inteligente*. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.
- ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). Disponível em: https://wateractionhub.org/media/files/2018/07/04/Press_Release_-_Estudo_de_Perdas_2018.pdf. Acesso em: 26 set. 2018.
- SILVA, N.R. *Estudo de metodologias para avaliação de submedição de hidrômetros domiciliares em sistemas de água*. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2008.
- SPERLING, M.V.; SANTOS, A.S.P.; MELO, M.C.; LIBÂNIO, M. Investigação de fatores de influência no consumo per capita de água em estados brasileiros e em cidades de Minas Gerais. In: SIMPÓSIO ÍTALO-BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 6., 2002, Vitória. *Anais eletrônicos* [...]. Vitória: ABES, 2002. p. 1-7.
- THORTON, J.; STURM, R.; KUNKEL, G. *Water loss control*. 2. ed. Nova York: McGraw-Hill, 2008.

