

INCERTEZA DE VAZÃO EM ENSAIOS COM MEDIDOR ULTRASSÔNICO

Danyllo de Lima Guedes ⁽¹⁾

Engenheiro Naval, Área de conhecimento: medição de vazão, escoamento de fluidos, hidrodinâmica experimental e numérica.

Marcos Tadeu Pereira ⁽²⁾

Doutor em Engenharia Mecânica, marcospereira@usp.br

Márcio Nunes ⁽³⁾

Engenheiro Mecânico, marcionunes53@gmail.com

Olavo Alberto Prates Sachs ⁽⁴⁾

Engenheiro Sanitarista, osachs@sabesp.com.br

Adauto Luiz de Souza da Silva ⁽⁵⁾

Técnico Mecânico, adautosilva@sabesp.com.br

André Luiz dos Santos ⁽⁶⁾

Engenheiro Elétrico, santos@sabesp.com.br

Endereço ⁽¹⁾: Fluido Análises- Análises, Tecnologia, Treinamento Ltda. Av. Baruel, 578 – Vila Baruel, São Paulo - SP, 02522-000 – Brasil, Telefone: (11) 97343-1827. e-mail: danylloguedes@gmail.com.

RESUMO

Este artigo compreende atividades que integram um projeto de longa duração o qual investiga possibilidades de medir vazão em sistemas de saneamento onde as recomendações de normas metrológicas não podem ser atendidas, e também busca investigar métodos alternativos ao uso do tubo de Pitot do tipo Cole nas atividades de calibrações em campo. O artigo apresenta metodologias de estimativa de incerteza para medições de vazão em condutos forçados com medidor do tipo ultrassônico. Foram realizadas medições em um trecho de duto com diversas singularidades nas proximidades, por meio de um medidor ultrassônico do tipo *clamp on* que opera segundo a técnica de tempo de trânsito. O medidor foi colocado em vinte posições diferentes em um mesmo perímetro de uma mesma seção da medição. Neste artigo, é apresentada uma metodologia para estimar a incerteza da vazão que é determinada por vinte medições de um medidor ultrassônico.

PALAVRAS-CHAVE: incerteza de vazão, medição com ultrassônico *clamp on*, medição de vazão em dutos.

INTRODUÇÃO

Sistemas de distribuição de água por empresas de saneamento costumam ser extensos e precisam cada vez mais de controles metrológicos dos volumes de água transferidos, seja pelo próprio gerenciamento das vazões, pelos custos envolvidos, pelos processos de compra e venda de água ou pelo controle de perdas. Nestes sistemas, são geralmente instalados medidores de grande porte (eletromagnéticos, tubos de Venturi, eletromagnéticos, ultrassônicos, etc.) os quais são dificilmente retirados para calibração. Assim, a alternativa é a calibração em campo que é realizada com ensaios com tubo de Pitot do tipo Cole. As normas metrológicas recomendam que as medições sejam realizadas em trechos retos do conduto, isto é, em uma região em que o escoamento possa ser considerado como plenamente desenvolvido, sem distorções de perfil de velocidades ou vorticidades. Em diversas situações, não é atendido o comprimento mínimo de trecho reto devido às singularidades da topologia do conduto, tais como a proximidade à cotovelos, válvulas, a sistemas de bombeamento, entre outros. Desta forma, foi iniciado um projeto entre a SABESP e consultores que visa estudar e desenvolver novas formas de abordagem para medição de vazão em condições não ideais, uma alternativa de investigação é a utilização de medidores ultrassônicos do tipo ‘Clamp On’. Uma vantagem destes medidores é a flexibilidade de uso. Como se trata de um medidor não intrusivo, a instalação é simples e permite ao operador realizar medições em regiões

de difícil acesso, além de possuir um fácil manuseio que permite instalar o ultrassônico em diversas posições de uma mesma seção de medição.

OBJETIVO

O objetivo do trabalho consiste em apresentar uma investigação de uma metodologia de estimação da incerteza de vazão que é medida por um medidor ultrassônico do tipo *clamp on* que opera sob a técnica de tempo de trânsito. O cenário de medição consiste em uma topologia de dutos marcada por singularidades que estão próximas da seção de medição como cotovelos e mudanças de inclinações do duto.

Esta investigação busca apontar e discorrer sobre as fontes de incertezas associadas a este tipo de medidor, aplicar guias práticos de recomendações para estimativa de incerteza, e estimar finalmente a incerteza de modo preliminar. Busca-se a avaliar a incerteza associada a um valor único de vazão que é determinada a partir de 20 medições.

MÉTODO

Foi escolhida uma antiga instalação da Sabesp caracterizada por um sistema de tubulações marcado por singularidades que estão próximas à seção de medição, praticamente sem trechos retos e com duas bombas em série dentro de um espaço restrito. Foram medidas a espessura e diâmetro das tubulações e selecionado um local para a instalação de um medidor ultrassônico do tipo *clamp on*,

Ensaio realizado

O medidor foi instalado em uma região da tubulação que é inclinada e próxima a diversas singularidades: cotovelos, mudanças de inclinações do conduto, e duas bombas instaladas nas proximidades, a montante. Foram realizadas medições da vazão, em uma mesma seção transversal da tubulação, com o medidor ultrassônico instalado em 20 posições angulares diferentes, igualmente distribuídas ao longo do perímetro de uma mesma seção transversal do conduto.

O medidor ultrassônico utilizado é do tipo Clamp-on que é baseado no princípio de medição da diferença de tempo de trânsito. Este medidor é composto por dois transdutores que são instalados junto à parede externa da tubulação que emitem e recebem pulsos de ultrassom. A velocidade do pulso de som que viaja ao longo do escoamento na direção jusante será aumentada pela componente de velocidade da água, já a velocidade do pulso de som que viaja na direção a montante possuirá uma velocidade reduzida. Deste modo, é possível correlacionar o valor da vazão a partir da diferença dos tempos que a onda sonora leva para percorrer de um transdutor para o outro, no sentido a montante e a jusante.

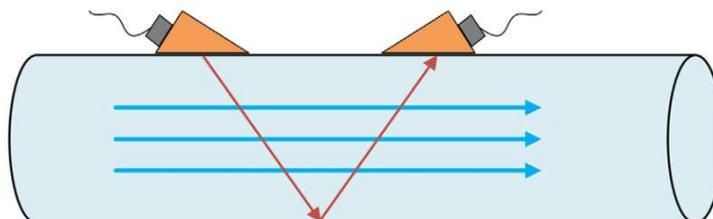


Fig. 1 - Os transdutores foram montados em modo V, que consiste em instalar os transdutores orientados axialmente na superfície da tubulação, e fazer o pulso sonoro atravessar o conduto por duas vezes.



Fig. 2 – Local de instalação do medidor ultrassônico. O escoamento vem de diversas singularidades a montante, mostradas na figuras posteriores



Fig. 3 – Medidor ultrassônico instalado.



Fig. 4 – Conexão imediatamente a jusante do ponto de medição com o ultrassônico. Pode ser visto no canto inferior direito a superfície lixada, que é a pista onde foi instalado o medidor ultrassônico.

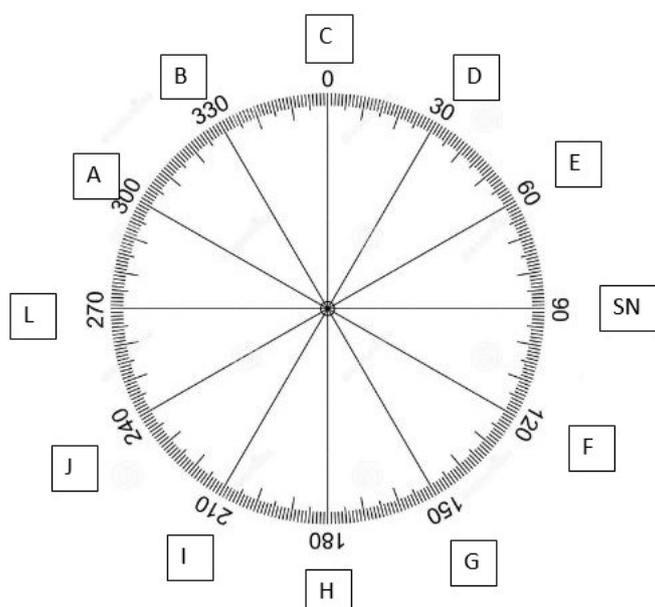


Fig. 5- Convenção adotada para os diversos posicionamentos angulares dos sensores ultrassônico. A figura apresenta a visão de quem observa o escoamento atravessando a seção, parte-se da posição das bombas em direção ao campo de medição do ultrassom. As posições L e SN se encontram em regiões da tubulação com cordão de solda, sem possibilidades de realizar medições.

Tabela 1 – Dimensões geométricas da tubulação

Perímetro do conduto	1591	mm
Diâmetro externo	506,63	mm
Espessura	6,67	mm
Área Interna da Seção Transversal	0,19	m ²

RESULTADOS E MEDIDAS DA TUBULAÇÃO

São apresentados em seguida os resultados dos ensaios realizados com o medidor ultrassônico.

Para cada posição de medição com o macromedidor ultrassônico, foi registrada a série temporal da vazão em m³/s. O sinal adquirido possui uma taxa de amostragem de 0,5 Hz com duração média de aquisição de dois minutos em cada posição de medição.

A figura 6 apresenta o registro temporal da vazão aqusitado na posição A. Os gráficos das outras posições não estão apresentados por economia de espaço, mas apresentam a mesma forma geral, embora apresentem valores diferentes os quais são apresentados na tabela 1.



Figura 6. Registro temporal da vazão na posição de medição A.

O valor da vazão em cada posição foi obtido através da média aritmética do registro temporal.

$$\bar{Q}_i = \frac{\sum_{j=1}^{N_i} q_i(t_j)}{N_i}$$

Onde:

\bar{Q}_i : a média entre os registros temporais da vazão na posição de medição i.

$q_i(t_j)$: registro da vazão na posição i no j-ésimo instante de tempo.

N_i : quantidade de registros de vazão aqusitados

A tabela 2 apresenta os resultados.

Tabela 2 – Resultados da vazão média medidas com o medidor ultrassônico em cada posição de medição.

Posição de medição	Vazão Média US [m³/s]
POSIÇÃO A	0,556
POSIÇÃO A-B	0,533
POSIÇÃO B	0,524
POSIÇÃO B-C	0,526
POSIÇÃO C	0,516
POSIÇÃO C-D	0,527
POSIÇÃO D	0,556
POSIÇÃO D-E	0,535
POSIÇÃO E	0,567
POSIÇÃO E-F	0,562
POSIÇÃO F	0,541
POSIÇÃO F-G	0,552

POSIÇÃO G	0,531
POSIÇÃO G-H	0,524
POSIÇÃO H	0,522
POSIÇÃO H-I	0,520
POSIÇÃO I	0,551
POSIÇÃO I-J	0,565
POSIÇÃO J	0,542
POSIÇÃO J-A	0,571

As posições que são retratadas com duas letras, como por exemplo, a posição A-B, corresponde a posição que está na metade da distância entre a posição A e a posição B.

ANÁLISE DE INCERTEZA

A incerteza é definida como um parâmetro não negativo que caracteriza a dispersão dos valores atribuídos a um mensurando. Em qualquer experimento, nunca se pode alcançar o valor exato do mensurando; pois sempre haverá uma incerteza associada a este valor devido às incertezas do próprio experimento e deste modo, é necessário realizar uma estimativa desta.

A técnica de medição do medidor ultrassônico baseia-se no princípio de medição do tempo de trânsito. Este método consiste em medir o intervalo de tempo em que as ondas sonoras levam para percorrer o caminho entre um transdutor transmissor e outro receptor. A diferença entre o tempo de trânsito (diferença do tempo que a onda chega de um transdutor a outro, no sentido à montante e à jusante) está diretamente relacionada com a velocidade de escoamento do fluido, conforme é apresentada pelas equações simplificadas abaixo.

$$V_{média} = K * \Delta t$$

$$Q = V_{média} * A$$

Onde:

$V_{média}$: velocidade média do escoamento

Δt : diferença entre o tempo de trânsito

K : constante de correlação

Q : vazão

A : área da seção transversal do conduto

A partir das normas 6416: Hydrometry. Measurement of discharge by the ultrasonic (acoustic) method, ISO GUM- Guide for the Expression of Uncertainty, a incerteza padrão da vazão na posição de medição i é calculada por:

$$u(Q_i) = \sqrt{u_A(Q_i)^2 + u_{cal,i}^2 + \left(\frac{\partial Q_i}{\partial A}\right)^2 * (u(A))^2 + u^2(erro_{sistemático\ Q_i}) + \left(\frac{\partial Q_i}{\partial V_{média,i}}\right)^2 * (u(V_{média,i}))^2}$$

Onde:

$u(Q_i)$: incerteza padrão da vazão medida na posição i .

$u_A(Q_i)$: incerteza padrão do tipo A da vazão medida na posição i

$u_{cal,i}$: incerteza padrão de calibração do medidor ultrassônico na posição de medição i .

$\frac{\partial Q_i}{\partial A}$: coeficiente de sensibilidade da vazão em relação à área da seção transversal do conduto

$u(A)$: a incerteza padrão da área da seção transversal da seção de medição

$u(distorção)$: incerteza padrão devido a distorção do campo de velocidades

$u(erro_{sistemático\ Q_i})$: incerteza devido ao erro sistemático referente à calibração do medidor ultrassônico na posição medição i

$\frac{\partial Q_i}{\partial V_{m\u00e9dia,i}}$: coeficiente de sensibilidade da vaz\u00e3o em rela\u00e7\u00e3o \u00e0 velocidade m\u00e9dia do escoamento na posi\u00e7\u00e3o de medi\u00e7\u00e3o i
 $u(V_{m\u00e9dia,i})$: incerteza padr\u00e3o da velocidade m\u00e9dia do escoamento na posi\u00e7\u00e3o i

Neste artigo, objetiva-se estimar a incerteza da vaz\u00e3o m\u00e9dia que \u00e9 definida por:

$$\bar{Q} = \frac{\sum Q_i}{n}$$

Onde:

\bar{Q} : vaz\u00e3o m\u00e9dia

n: posi\u00e7\u00f5es medidas com o medidor ultrass\u00f4nico

No primeiro momento da metodologia de estima\u00e7\u00e3o da incerteza da vaz\u00e3o m\u00e9dia, \u00e9 necess\u00e1rio determinar as componentes da incerteza da vaz\u00e3o de cada posi\u00e7\u00e3o de medi\u00e7\u00e3o. E em um segundo momento, para avaliar finalmente a incerteza da vaz\u00e3o m\u00e9dia, \u00e9 preciso aplicar as formula\u00e7\u00f5es estat\u00edsticas adequadas para jun\u00e7\u00e3o destas componentes.

Incerteza padr\u00e3o do tipo A da vaz\u00e3o

A incerteza padr\u00e3o do tipo A \u00e9 estimada atrav\u00e9s das repeti\u00e7\u00f5es das vaz\u00f5es que s\u00e3o medidas. Esta pode ser calculada pelo desvio padr\u00e3o da m\u00e9dia do registro temporal da vaz\u00e3o, segundo as equa\u00e7\u00f5es abaixo:

$$u_A(Q_i) = \frac{\sigma_i}{\sqrt{N_i}}$$

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{N_i} (q_i(t_j) - Q_i)^2}{N_i - 1}}$$

$$Q_i = \frac{\sum_{j=1}^{N_i} q_i(t_j)}{N_i}$$

Onde:

σ_i : desvio padr\u00e3o da s\u00e9rie temporal da vaz\u00e3o na posi\u00e7\u00e3o de medi\u00e7\u00e3o i

N_i : quantidade de registros de vaz\u00e3o aquisitados na posi\u00e7\u00e3o i

$q_i(t_j)$: registro da vaz\u00e3o na posi\u00e7\u00e3o i no j-\u00e9simo instante de tempo.

Q_i : a m\u00e9dia entre os registros temporais da vaz\u00e3o na posi\u00e7\u00e3o de medi\u00e7\u00e3o i.

Incerteza padr\u00e3o de calibra\u00e7\u00e3o do medidor ultrass\u00f4nico

A incerteza expandida de calibra\u00e7\u00e3o do medidor adotada \u00e9 baseada no certificado de calibra\u00e7\u00e3o.

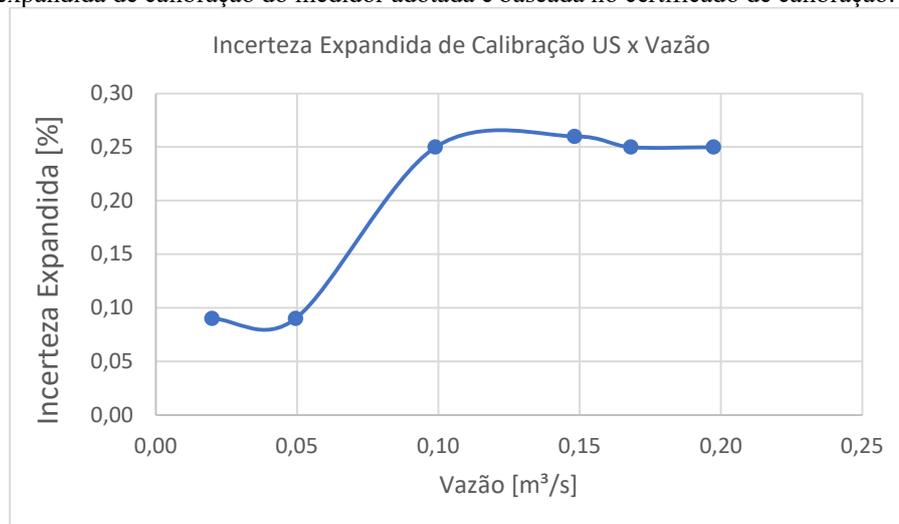


Fig. 7 - A figura apresenta a curva de incerteza expandida que foi criada a partir dos dados do certificado de calibra\u00e7\u00e3o.

A vazão medida está em torno de 0,540 m³/s, deste modo, a partir da figura 7. Foi assumido o valor de 0,25% da vazão medida, considerando fator de abrangência igual a 2.

$$u_{cal,i} = \frac{U_{Q_i}}{k} = \frac{0,25\%Q_i}{2}$$

Onde:

U_{Q_i} : incerteza expandida de calibração da vazão medida na posição i

k: fator de abrangência

Coefficiente de sensibilidade da vazão em relação à área da seção transversal

O coeficiente de sensibilidade da vazão em relação à área da seção transversal do conduto é dado por:

$$\frac{\partial Q_i}{\partial A} = V_i = \frac{Q_i}{A}$$

$$Q_i = A * V_i$$

Onde:

V_i : velocidade média na posição de medição i

Incerteza padrão da área transversal

A área da seção transversal é calculada através do diâmetro e da espessura do conduto:

$$A = \frac{\pi(D - 2 * e)^2}{4}$$

A incerteza padrão da área da seção transversal é dada por:

$$u(A) = \sqrt{\left(\frac{\partial A}{\partial D}\right)^2 * u(D)^2 + \left(\frac{\partial A}{\partial e}\right)^2 * u(e)^2}$$

Onde:

$\frac{\partial A}{\partial D}$: coeficiente de sensibilidade da área da seção transversal em relação ao diâmetro

$u(D)$: incerteza padrão do diâmetro do conduto

$\frac{\partial A}{\partial e}$: coeficiente de sensibilidade da área da seção transversal em relação à espessura do conduto

$u(e)$: incerteza padrão da espessura do conduto

Coefficiente de sensibilidade da área da seção transversal em relação ao diâmetro do conduto

O coeficiente de sensibilidade da área da seção transversal em relação ao diâmetro do conduto é dado por:

$$\frac{\partial A}{\partial D} = \frac{\pi(D - 2 * e)}{2}$$

Incerteza padrão do diâmetro do conduto

O diâmetro do conduto é definido através da medição do perímetro:

$$\text{perímetro} = \pi D$$

$$D = \frac{\text{perímetro}}{\pi}$$

A incerteza padrão do diâmetro do conduto é calculada por:

$$u(D) = \sqrt{\left(\frac{\partial D}{\partial \text{perímetro}}\right)^2 * u(\text{perímetro})^2} = \frac{u(\text{perímetro})}{\pi}$$

Onde:

$\frac{\partial D}{\partial \text{perímetro}}$: coeficiente de sensibilidade do diâmetro do conduto em relação ao perímetro
 $u(\text{perímetro})$: incerteza padrão do perímetro da seção transversal do conduto

Coeficiente de sensibilidade do diâmetro em relação ao perímetro do conduto

O coeficiente de sensibilidade do diâmetro em relação ao perímetro do conduto:

$$\frac{\partial D}{\partial \text{perímetro}} = \frac{1}{\pi}$$

Incerteza padrão do perímetro da seção transversal do conduto

A incerteza padrão do perímetro é a incerteza padrão da trena o qual é determinada a partir da resolução do instrumento. Assumindo distribuição retangular para estes erros de medição, a incerteza padrão da trena é dada por:

$$u(\text{perímetro}) = u_{\text{trena}}$$

$$u_{\text{trena}} = \frac{0,5}{\sqrt{12}} \text{mm}$$

Onde:

u_{trena} : incerteza padrão da trena

Coeficiente de sensibilidade da área da seção transversal em relação à espessura do conduto

O coeficiente de sensibilidade da área da seção transversal em relação à espessura do conduto é dado por:

$$\frac{\partial A}{\partial e} = -\pi(D - 2 * e)$$

Incerteza padrão da espessura do conduto

A incerteza padrão do medidor de espessura é estimada pelo certificado de calibração do medidor. A incerteza expandida do certificado é apresentada abaixo.

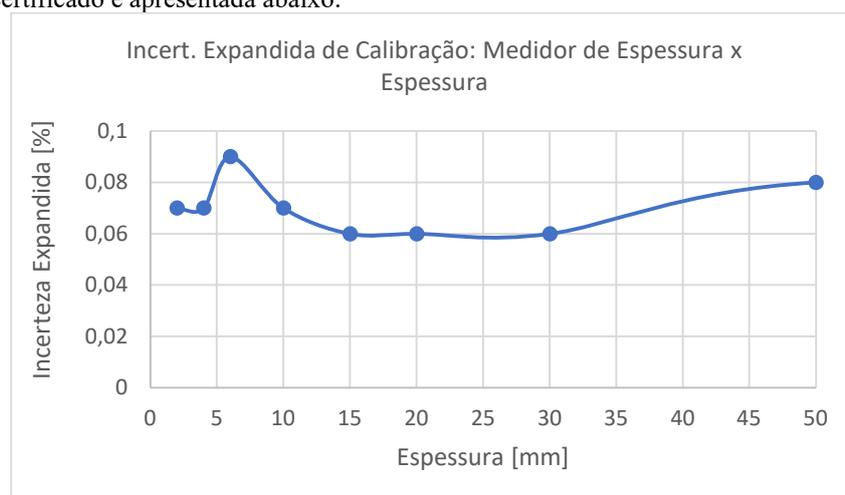


Fig. 8 – Incerteza no certificado do medidor de espessura.

A espessura medida em campo foi de 6,67 mm e assumiu-se o valor de 0,09 mm de incerteza expandida. O cálculo da incerteza padrão é apresentado a seguir.

$$u(e) = \frac{U_e}{k} = \frac{U_e}{2} = \frac{0,09mm}{2} = 0,045mm$$

Onde:

U_e : incerteza expandida de calibração do medidor de espessura

k : fator de abrangência

Coeficiente de sensibilidade da velocidade média em relação à vazão

O coeficiente de sensibilidade da velocidade média em relação à vazão é dado por:

$$\frac{\partial Q_i}{\partial V_{média}} = A$$

Incerteza devido ao erro sistemático de calibração do medidor ultrassônico

É considerado o erro sistemático apresentado no certificado de calibração do medidor.

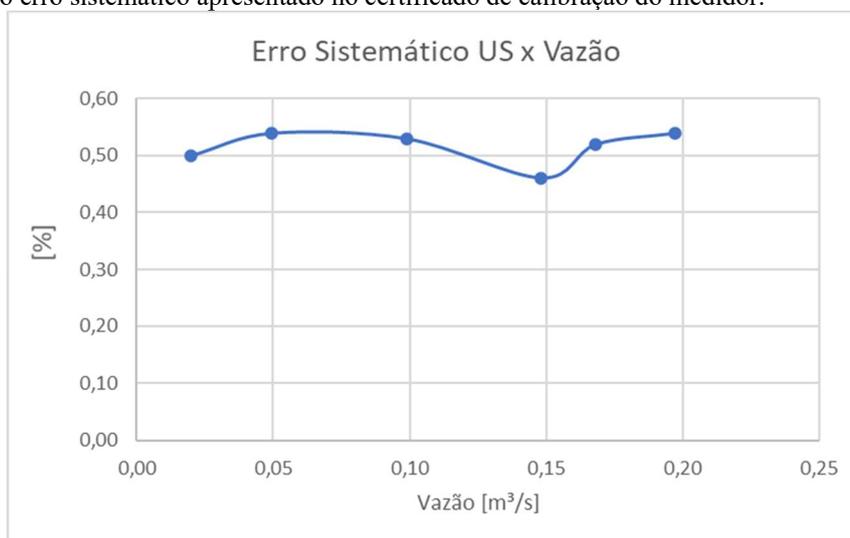


Fig. 9- No gráfico estão apresentados os erros sistemáticos do medidor ultrassônico para diferentes valores de vazão, extraídos do certificado de calibração.

A partir dos valores acima, foi assumido erro sistemático de 0,54% da vazão medida. Para estimação da incerteza, foi considerada uma distribuição de probabilidade gaussiana e a expressão é dada abaixo.

$$u(\text{erro sistemático}_{Q_i}) = \frac{0,54\%Q_i}{2}$$

Incerteza padrão da velocidade média do escoamento

A incerteza padrão da velocidade média, segundo a norma ISO 6416, é estimada pela formulação a seguir.

$$u(V_{média}) = \sqrt{U_L^2 + 4U_T^2 + U_{\Delta T}^2 + U_{\cos\theta}^2}$$

Onde:

U_L : Incerteza do comprimento da trajetória da viagem do pulso ultrassônico entre os transdutores

U_T : incerteza no tempo de trânsito

$U_{\Delta T}$: incerteza na diferença do tempo de trânsito

$U_{\cos\theta}$: Incerteza devido ao ângulo entre a trajetória e a direção do escoamento

A incerteza da velocidade média não foi considerada neste presente estudo e será investigada em trabalhos futuros deste mesmo projeto. A seguir, são apresentadas algumas considerações de cada parcela desta incerteza.

A incerteza do comprimento da trajetória da viagem do pulso ultrassônico entre os transdutores está associada à distância entre os transdutores e à direção da saída dos pulsos quando emitidos. Esta incerteza será avaliada futuramente para o caso deste trabalho no qual os transdutores são montados em V, isto é, quando os sensores são posicionados axialmente na superfície da tubulação e o pulso ultrassônico atravessa o escoamento por duas vezes.

As incertezas no tempo de trânsito e na diferença do tempo de trânsito não foram consideradas. A norma ISO 6416 diz que estas incertezas são frequentemente negligenciadas.

A incerteza devido ao ângulo entre a trajetória e a direção do escoamento decorre da presença de componentes não axiais da velocidade. E estas, por sua vez, implicam em uma distorção no campo de velocidades. Deste modo, em certa forma, a incerteza devido à distorção do campo de velocidades considera implicitamente a incerteza devido ao ângulo entre a trajetória e a direção do escoamento.

A incerteza devido à distorção é incluída na etapa posterior desta metodologia, quando é determinada a incerteza da vazão média.

Incerteza da vazão estimada pela média das vazões medidas em cada posição

Após a determinação das componentes das incertezas das vazões de cada posição de medição, é necessário realizar a junção adequadamente. Primeiramente, realiza-se uma classificação que distingue a incerteza em dois grupos: incerteza associada a erros aleatórios e incerteza associada a erros sistemáticos. E no segundo momento, aplicam-se as formulações estatísticas adequadas:

- Para o cálculo da incerteza associada a erros aleatórios (incerteza do tipo A da vazão), aplica-se a lei de propagação de incerteza para variáveis não correlacionadas.

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N c_i^2 u^2(x_i)$$

- Para o cálculo da incerteza associada a erros sistemáticos (as incertezas restantes), aplica-se a lei de propagação de incerteza para variáveis correlacionadas.

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N c_i^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N c_i c_j u(x_i) u(x_j) r(x_i, x_j)$$

E assim, a incerteza da vazão média é determinada através da expressão tradicional de combinação de incertezas. E também, é incluída nesta a incerteza devido à distorção do perfil de velocidades, resultando na expressão final:

$$u(\bar{Q}) = \sqrt{u_{aleat\ 1}^2 + u_{sist\ 1}^2 + u_{sist\ 2}^2 + \dots + u^2(distorção)}$$

Onde:

$u_{aleat\ j}$: incerteza associada ao erro aleatório i

$u_{sist\ j}$: incerteza associada a fonte do erro sistemático i

$u(distorção)$: incerteza devido a distorção do perfil de velocidades

Incerteza padrão devido a distorção do campo de velocidades

A incerteza padrão devido a distorção do campo de velocidades foi estimada a partir do desvio padrão das vinte medições da vazão nas diferentes posições. Para esta incerteza é atribuída uma distribuição de probabilidade gaussiana e a expressão é dada a seguir.

$$u(distorção) = \frac{\sqrt{\frac{\sum(Q_i - \bar{Q})^2}{n-1}}}{2}$$

Onde:

\bar{Q} : a vazão média geral

n: total de posições medidas com o ultrassônico

Esta formulação é baseada na norma *British Standard 1042 – Section 2.3: Methods of flow measurement in swirling or asymmetric flow conditions in circular ducts by means of current-meters or Pitot static tubes.*

Resultados

A partir da incerteza padrão, é estimada a incerteza expandida para um intervalo de confiança de 95%. É assumida uma distribuição gaussiana e adota-se o valor de 2 para o fator de abrangência.

$$U(\bar{Q}) = k * u(\bar{Q}) = 2 * u(\bar{Q})$$

Onde:

$U(\bar{Q})$: Incerteza expandida da vazão média

k: fator de abrangência

A tabela 3 apresenta o resultado da incerteza estimada para a vazão média com o ultrassom.

Tabela 3 – Resultados da análise de incerteza

Vazão Média	0,541	m³/s
Velocidade Média	2,831	m/s
Incerteza Expandida da Vazão Média	3,31%	-

Componentes Incerteza	Contribuição individual (%)
Incerteza da vazão do Tipo A	0,04%
Incerteza de Calibração	0,57%
Incerteza da área	0,06%
incerteza devido à distorção	96,67%
Erro sistemático de calibração	2,66%

Conclusões

A incerteza estimada a partir das 20 vazões medidas com o ultrassom em diferentes posições apresentou o valor de 3,3%. A componente da incerteza devido à distorção do campo de velocidades se mostrou preponderante sobre as demais componentes. Este comportamento já era esperado, devido à grande dispersão dos valores de vazão entre as 20 medições. Tal situação reflete um campo de velocidades demasiadamente distorcido devido às singularidades das condições de ensaio: proximidade a cotovelos, mudanças de inclinação da tubulação.

As componentes da incerteza associadas à calibração do medidor ultrassônico possuem pequena contribuição na incerteza global. Ressalta-se que estas incertezas foram estimadas a partir de condições laboratoriais de calibração em que se realizam medições em trechos retos.

Esta metodologia de redundância de medição se torna interessante na medida em que é possível avaliar o grau de incerteza em situações de medição que não são ideais, onde ocorrem altas distorções dos campos de velocidade.

No seguimento deste trabalho, buscará investigar por modelos computacionais alicerçados a resultados experimentais a fim de melhorar esta metodologia de estimativa de incerteza. E também serão investigadas outras fontes de incerteza como a incerteza do tempo de trânsito, incerteza devido à não circularidade da seção transversal do conduto, incerteza devido ao número de posições medidas, incerteza associada ao posicionamento dos transdutores, entre outras.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ISO 6416. *Hydrometry. Measurement of discharge by the ultrasonic (acoustic) method*, 2005.
2. ULTRAFLOW. *Medidor de vazão ultrassônico por tempo de trânsito - Manual*, Rev 11, 2017.
3. ISO 5168. *Measurement of fluid flow - Estimation of uncertainty of a flow rate measurement International Organization for Standardization*, 1978.
4. A. Weissenbrunner , A. Fiebach , S. Schmelter , M. Bär , P.U. Thamsen , T. Lederer. *Simulation-based determination of systematic errors of flow meters due to uncertain inflow conditions*. 2016.
5. *British Standard 1042 – Section 2.3: Methods of flow measurement in swirling or asymmetric flow conditions in circular ducts by means of current-meters or Pitot static tubes*
6. ISO GUM, *Guide for the Expression of Uncertainty*, 2008.