

Metodologia alternativa de calibração de medidores de vazão ultrassônicos através do número de Reynolds: conceitos e considerações

F O Costa¹, P C Gabriel¹, D A Garcia¹, J G Sanchez¹, S Araújo¹, M H Aquino¹, A Mascarenhas¹, C L Azeredo¹ e L O V Pereira²

¹ Divisão de Metrologia em Dinâmica de Fluidos, Dimci, Inmetro, Duque de Caxias, 25250-050, Brasil

² CENPES, Petrobras, Rio de Janeiro, 21941-915, Brasil

dinam@inmetro.gov.br

Resumo. A indústria de petróleo e gás no Brasil enfrenta desafios para atender os atuais requisitos de calibração estabelecidos em regulamentos técnicos de medição da produção. A grande variabilidade de condições, aliada à inviabilidade operacional e econômica e aspectos relacionados à segurança de se utilizar derivados de petróleo em laboratórios acreditados, limita a possibilidade de replicação de condições de operação em laboratório. Este artigo descreve como a metrologia científica do Inmetro vem conduzindo investigação metrológica para o desenvolvimento de novas metodologias e modelos de medição de vazão. No decorrer do trabalho são apresentadas as primeiras etapas de um estudo detalhado sobre o uso de número de Reynolds como parâmetro base na calibração de medidores ultrassônicos.

1. Introdução

A medição da vazão de fluidos é de extrema importância para setor de petróleo, em especial para fins fiscais, sendo a base para a cobrança de *royalties* e impostos, bem como impactando diretamente na economia do país e na viabilidade de projetos na indústria petrolífera. A calibração dos medidores de vazão utilizados para este fim é, portanto, uma etapa crucial para a garantia da confiabilidade das medições.

Atualmente, com vistas à garantia da confiabilidade de medição, a calibração de medidores de vazão é realizada em condições o mais próximas possível às condições reais de operação, em termos viscosidade, densidade, temperatura, pressão e vazão, conforme estabelece o Regulamento Técnico de Medição de Petróleo e Gás Natural (RTM), aprovado pela Resolução Conjunta ANP/Inmetro nº 001/2013 [1]. No entanto, a replicação fiel dessas condições pode ser uma tarefa desafiadora e até mesmo impossível de se obter em laboratório, especialmente quando as condições são extremas (pressões acima de 65 bar e temperaturas acima de 50 °C) ou variáveis, ou também devido a impossibilidade de usar petróleo real em calibrações em laboratório por questões de segurança e a variabilidade de composições existentes, sendo utilizado como fluido de calibração líquidos alternativos, como por exemplo os óleos minerais.

Os medidores de vazão ultrassônicos por tempo de trânsito possuem diversas vantagens em comparação a outras tecnologias de medição de vazão, destacando-se por não promoverem perda de carga ao escoamento e serem não intrusivos, não possuem partes móveis e possibilitarem medições com baixa incerteza, aliados ao baixo índice de manutenção e possibilidade de recursos avançados de diagnósticos do escoamento e de funcionamento do medidor [2]. Diante disso, essa tecnologia de medição de vazão tem sido fortemente aplicada na indústria de petróleo, e devido a sua evolução tecnológica, com medidores mais rápidos e de múltiplas trajetórias, abriu perspectivas para a realização de calibrações em condições alternativas às de operação.

A utilização de múltiplas trajetórias em medidores ultrassônicos possibilita ao medidor a estimação perfil do escoamento em medição. Por este motivo, o número de Reynolds, um dos principais parâmetros de similaridade em dinâmica de fluidos, assume um papel fundamental na calibração de medidores ultrassônicos. Por serem medidores essencialmente velocimétricos, são especialmente sensíveis à variação do perfil de velocidades de um escoamento. Ao se garantir a similaridade dinâmica entre condições de calibração e condições de processo, portanto, é possível flexibilizar a aplicação da calibração sem perda da confiabilidade da medição.

No presente artigo, serão apresentados aspectos importantes sobre o número de Reynolds como parâmetro de calibração para medidores ultrassônicos, bem como uma prova de conceitos e considerações necessárias. As análises propostas neste trabalho são aplicáveis a medidores ultrassônicos por tempo de trânsito para líquidos, com 4 trajetórias ou mais, sem reflexão interna, com transdutores fixos e corpo do medidor com dimensões definidas, que são os modelos mais usados em medições de transferência de custódia e fiscal na indústria do petróleo. Não foram considerados modelos com transdutores afixados na face externa da tubulação (*clamp-on*); também não foi realizada avaliação das condições de instalação, configuração e rugosidade dos trechos adjacentes ao medidor e uso de condicionadores de escoamento.

2. Fundamentação teórica

Medidores de vazão ultrassônicos por tempo de trânsito são dispositivos não intrusivos de medição de vazão de fluidos que utilizam a propagação de pulsos ultrassônicos para quantificar vazão volumétrica em uma tubulação [2]. São comumente utilizados em várias indústrias, como tratamento e distribuição de água, petróleo e gás e processamento químico. Estes dispositivos funcionam medindo o tempo que ondas ultrassônicas levam para transitar de um transdutor para outro. A Figura 1 mostra, em linhas gerais, o esquema de funcionamento deste tipo de medidor e os principais componentes.

O medidor de vazão contém pares de transdutores ultrassônicos montados no corpo do medidor a uma distância conhecida com grande nível de exatidão. Nos modelos mais atuais, múltiplos pares de transdutores são instalados em diferentes posições de modo que cada par desenha uma trajetória cordal em torno do diâmetro interno do medidor que é tipicamente cilíndrico e de mesmo diâmetro interno da tubulação adjacente. Ambos os transdutores do par agem como emissores e receptores, possibilitando a medição do tempo de trânsito dos pulsos emitidos a favor e contra o escoamento. A velocidade de propagação da onda é somada vetorialmente à velocidade do escoamento, de forma que os pulsos emitidos a favor e contra o escoamento possuem tempos de propagação diferentes.

Fazendo-se uso das equações para propagação de ondas acústicas ultrassônicas, é possível determinar a velocidade média do escoamento ao longo da trajetória acústica do pulso ultrassônico. Uma vez determinada a velocidade média em cada trajetória, técnicas de quadratura são utilizadas para realizar a integração da velocidade medida e determinar, assim, a vazão do fluido através da seção transversal da tubulação.

Normalmente medidores ultrassônicos de múltiplas trajetórias possuem uma linearidade intrínseca alta. No entanto, para adequação aos requisitos estabelecidos nos regulamentos técnicos de medição (com relação às medições fiscais), pode ser necessário realizar etapas de caracterização e de calibração para que o medidor obtenha desempenho satisfatório em diferentes condições de operação. A caracterização de um medidor de vazão ultrassônico é o estabelecimento de uma tabela interna de

correções, aplicada ao resultado de medição a partir de parâmetros de monitoramento do escoamento. Detalhes e discussões sobre a caracterização de medidores de vazão ultrassônicos podem ser encontrados em [3].

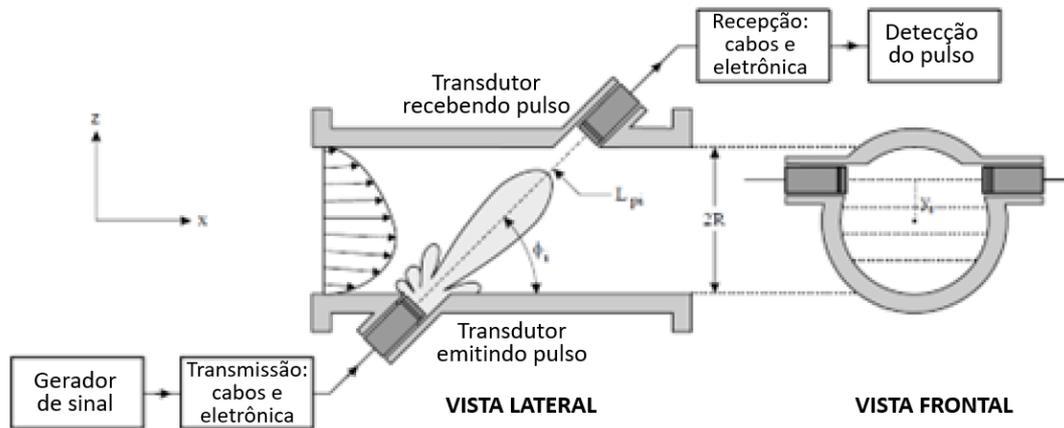


Figura 1. Esquema de funcionamento de medidores de vazão do tipo ultrassônico com múltiplas cordas. Fonte: Adaptado de [4].

A equação (1) apresenta o modelo matemático completo para medidores de vazão do tipo ultrassônicos, onde são categorizadas três fontes de erros e incerteza: escoamento e rastreabilidade, geometria e sinal medido.

$$Q = \underbrace{\frac{MF(\mathbf{p})}{\text{Escoamento e rastreabilidade}}}_{\text{Escoamento e rastreabilidade}} \underbrace{A \sum w_i \frac{L_i}{2 \cos \theta}}_{\text{Geometria}} \underbrace{\frac{\Delta t_i - \Delta t_{zi}}{(t_{abi} - \tau)(t_{ba_i} - \tau)}}_{\text{Sinal medido}} \quad (1)$$

onde $MF(\mathbf{p})$ é o fator do medidor, obtido durante a etapa de calibração/caracterização, A é a área da seção transversal do medidor, w é um fator de ponderação para cada trajetória, L é o comprimento da trajetória acústica do pulso, θ é o ângulo de inclinação do sinal ultrassônico em relação à direção axial do escoamento, Δt é a diferença nos tempos de trânsito, Δt_z é a diferença, para os caminhos de ida e de volta, dos atrasos causados por componentes eletrônicos, cabos e difração, τ é o tempo do pulso na cavidade dos transdutores, t_{abi} é o tempo de trânsito do pulso do transdutor de a para b (a favor do escoamento), t_{ba_i} é o tempo de trânsito do pulso do transdutor de b para a (contra o fluxo), e o subscrito i indica cada trajetória na somatória.

O modelo matemático pode ser separado em três grupos:

a) Escoamento e rastreabilidade: é o fator responsável pela linearização do medidor e pela rastreabilidade da medição. Fatores de processo e de escoamento são contabilizados nesta variável (perfil de escoamento, rugosidade de tubulação, ocorrência de rotacionais, entre outros);

b) Geometria: são os fatores relacionados à geometria do medidor (área da seção transversal, ângulo entre transdutores, comprimento do caminho acústico dos pulsos ultrassônicos). Aqui podem ser incluídos parâmetros para correção relativos à geometria do medidor. Estes fatores são informados pelo fabricante do equipamento, tipicamente obtidos por medições dimensionais no corpo do medidor após usinagem; e

c) Sinal medido: referente à medição de tempo de trânsito. Este fator deve ser proporcional à velocidade média em cada trajetória, e devem ser considerados efeitos de zero e tempo na cavidade.

3. Reynolds como parâmetro base para calibração de medidores de vazão ultrassônicos

O número de Reynolds surge da simplificação e adimensionalização das equações de Navier-Stokes (Eq. 2), que são conhecidas por serem as equações mais completas da dinâmica de fluidos e descreverem o comportamento de qualquer escoamento de fluido. As equações de Navier-Stokes são equações diferenciais parciais não lineares, cujas soluções gerais ainda não são conhecidas.

$$\frac{\partial v^*}{\partial t^*} + (v^* \cdot \nabla^*)v^* = -\nabla^* p^* + \frac{1}{Re} \nabla^{*2} v^* \quad (2)$$

onde v é velocidade, t é tempo, p é a pressão e Re é o número de Reynolds e o sobrescrito (*) representa uma variável adimensionalizada. Estas equações são válidas para escoamentos incompressíveis, fluidos newtonianos, e demonstram que quaisquer dois escoamentos com mesmo número de Reynolds serão dinamicamente idênticos, respeitadas as condições¹:

- a) **Condições de contorno:** as condições de contorno devem ser semelhantes. Isto quer dizer que a interação entre o domínio de interesse (fluido) e seu entorno (tubulação de entrada e saída do volume de controle), para ambas as condições de calibração e operação devem ser iguais;
- b) **Condições iniciais:** as condições iniciais devem ser semelhantes. Para isso, deve-se garantir que o perfil do escoamento na entrada do volume de controle considerado seja semelhante;
- c) **Similaridade de instalação:** toda e qualquer condição que afete o perfil do escoamento deve ser reproduzida da forma mais fiel possível na calibração (tais como curvas, válvulas e restrições);
- d) **Fluido Newtoniano:** o fluido deve ser considerado newtoniano em toda a faixa de condições desejada para ambos os casos;
- e) **Fluido incompressível:** o fluido deve ser considerado incompressível para toda a faixa de operação de interesse;
- f) **Forças de campo:** não deve haver nenhuma força de campo considerável no escoamento; e
- g) **Estabilidade térmica:** não há troca de calor significativa no volume de controle, de forma que a densidade e a viscosidade são constantes e iguais em todas as direções.

Matematicamente, o número de Reynolds pode ser descrito como:

$$Re = \frac{\rho \bar{v} D}{\mu} \quad (3)$$

onde \bar{v} é a velocidade média do fluido, D é o comprimento característico, μ é a viscosidade dinâmica do fluido e ρ é a densidade do fluido. Em muitos cenários, a semelhança de Reynolds pode descrever o comportamento físico de um escoamento de forma muito satisfatória, desde que as considerações para a simplificação das equações de Navier-Stokes sejam aceitáveis para o nível de exatidão que se deseja. Deve-se observar, no entanto, que o Reynolds não é o único adimensional existente; para muitos casos, outros adimensionais - número de Mach, Prandtl, Froude, Weber, etc – devem ser considerados. A rigor, dois escoamentos podem ser considerados semelhantes quando todos os adimensionais de interesse são similares.

¹ Deve-se notar que, em situações reais, não é possível medir isoladamente a influência de cada parâmetro. Deve-se garantir, portanto, que a combinação de todas as imperfeições nas condições citadas seja insuficiente para elevar o erro de medição a um valor acima do aceitável pelos órgãos de regulamentação através de testes experimentais.

O número de Reynolds também pode ser utilizado para classificar o escoamento quanto ao seu regime, podendo ser separado em três faixas principais: *laminar*, onde o escoamento se move de maneira ordenada, com linhas de corrente paralelas e perfil parabólico; *transitório*, onde há grande variação no perfil de velocidade de difícil predição; e *turbulento*, quando há grande troca de energia cinética entre as linhas de corrente e perfil de velocidade achatado. Uma vez que o perfil do escoamento possui uma alta correlação com o número de Reynolds, medidores com múltiplas trajetórias podem utilizar a relação entre as velocidades obtidas em cada trajetória como parâmetro de monitoramento do escoamento, bem como utilizar-se deste recurso para determinar como as correções internas serão realizadas.

Para aplicações industriais, é essencial considerar intervalos de Reynolds conservadores para garantia de operação do medidor em regime turbulento. Fabricantes e portarias de aprovação de modelo de medidores de vazão costumam limitar o uso dos medidores para número de Reynolds acima de 10.000, enquanto a literatura atribui regimes turbulentos a números de Reynolds tão baixos quanto 4.000 [5].

O desempenho do medidor é fortemente correlacionado com a similaridade entre o perfil do escoamento obtido entre as etapas de calibração/caracterização e de operação. Assim, a flexibilização das condições citadas para a calibração em função do número de Reynolds pode levar à alteração no perfil do escoamento em relação à condição de calibração (ou caracterização) e causar erros de medição. Para a medição de vazão de líquidos, estas condições podem ser satisfeitas quando:

- a) Configuração de tubulação à montante:** a configuração da tubulação à montante do medidor pode causar distorção do perfil do escoamento e aparecimento de escoamentos secundários (transversais). A reprodução das condições de instalação à montante do medidor deve ser a mais próxima à de operação possível;
- b) Rugosidade:** a rugosidade da tubulação, mesmo em escoamentos completamente desenvolvidos, pode alterar o perfil do escoamento. Tubos muito lisos tendem a ter escoamentos laminares e de transição em Re mais altos enquanto tubos muito rugosos podem provocar escoamentos turbulentos em Re mais baixo. Sua influência varia com o nível de rugosidade, configuração do medidor e número de Reynolds do escoamento; e
- c) Temperatura:** a temperatura, além de alterar a viscosidade do fluido em medição - e, portanto, seu número de Reynolds -, pode causar convecção natural, em situações em que não há estabilidade térmica, e o aparecimento de escoamento secundário. Esta condição pode ser crítica em escoamentos laminares.

Deve-se ressaltar, no entanto, que os fatores aqui citados já ocorrem nas metodologias de calibração atuais.

4. Fluxograma para transferabilidade de calibrações

Para que um medidor possa ser calibrado em condições alternativas consideradas equivalentes às de operação, uma série de condições devem ser consideradas. A partir de uma lista de possíveis fatores de influência, avalia-se qual a sensibilidade do medidor a cada um deles, dentro de limites pré-estabelecidos, por meio da aplicação de testes experimentais e de modelagens físicas do funcionamento do medidor.

A partir dos resultados obtidos é possível fazer uma análise quantitativa da influência de cada parâmetro e determinar qual a influência individual e combinada da variação na operação de cada modelo de medidor. A Figura 2 apresenta uma proposta de fluxograma de como deve ser conduzida a metodologia de análise para determinação da capacidade de um medidor de vazão ser calibrado em condições alternativas.

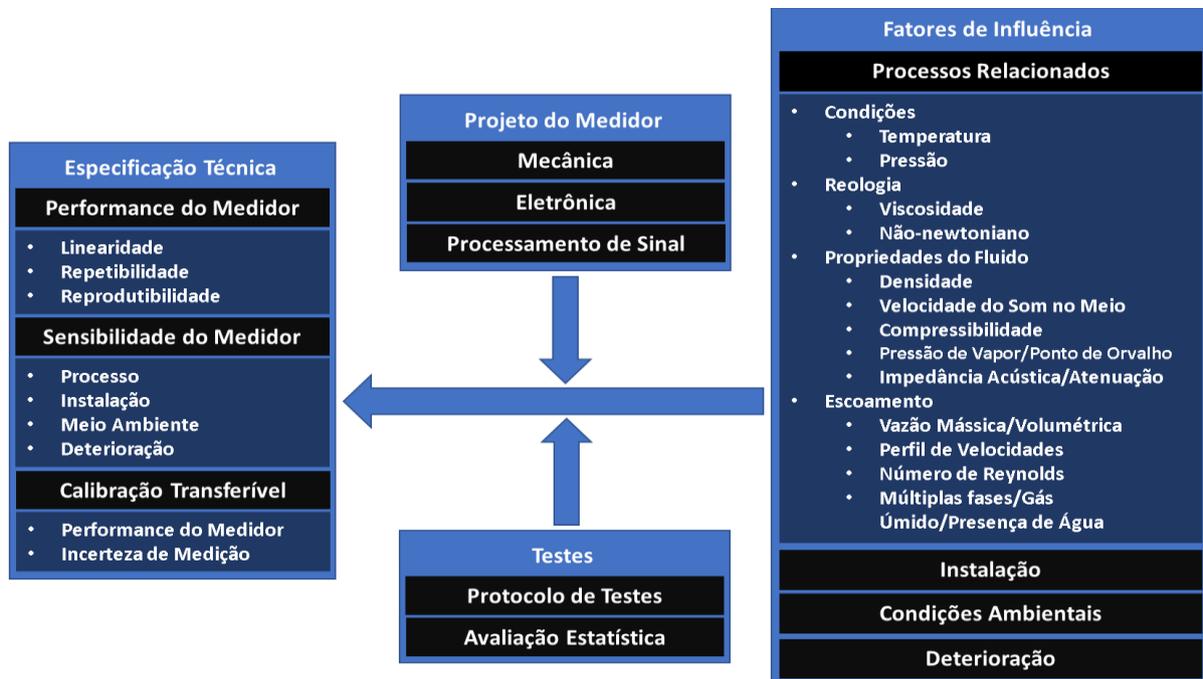


Figura 2. Fluxograma para análise da transferabilidade de calibração.

5. Fatores de influência (medidor)

Em um instrumento real, qualquer fator que difira entre condições de calibração e de operação pode, potencialmente, afetar seu desempenho. Desta forma, para se definir quais os limites da transferabilidade de uma calibração, é necessário determinar a sensibilidade do medidor a cada um destes fatores e possíveis correções.

A medição exata e precisa em medidores de vazão ultrassônicos depende de diversos fatores, incluindo:

a) Variação de temperatura no corpo do medidor: A temperatura pode causar alterações nas dimensões do medidor, levando a alterações no comprimento do caminho acústico, na área da seção transversal e nos coeficientes de tempo do medidor (τ , ΔZ). A partir de equações de dilatação térmica, é possível prever teoricamente qual a correção necessária [6].

b) Efeitos da pressão no corpo do medidor: A pressão interna do fluido em medição pode causar variações no diâmetro interno do medidor e no ângulo dos sensores e, conseqüentemente, erro na indicação de vazão. Os efeitos de pressão são complexos e dependem do projeto mecânico do medidor, da forma de instalação do medidor e da configuração da tubulação. De forma geral, equações teóricas podem ser aplicadas para esta correção [7].

c) Impedância acústica do fluido: fluidos com impedância acústica mais alta demandam pulsos mais potentes, em especial em medidores com grandes diâmetros. A eletrônica deve ter capacidade para se adequar a essa variação e trabalhar com igual performance com o fluido de operação e com o fluido de calibração, de modo a tornar satisfatória a relação sinal/ruído (*SNR*) [8]. Além disso, a utilização em fluidos com maior impedância pode levar à maior probabilidade de ocorrer *cross-talk* durante a medição, provocado, por exemplo, por um desacoplamento entre o sensor e a carcaça do medidor;

d) Medição do tempo: a medição do tempo é o único parâmetro utilizado no cálculo da velocidade média em uma trajetória. Desta forma, qualquer fator que influencia sua medição afetará o desempenho

do medidor. Assim, a resolução, estabilidade e exatidão do *clock* de referência do medidor, associadas à capacidade eletrônica (velocidade de processamento do sinal) e dos algoritmos de detecção do medidor podem afetar a medição, especialmente em baixas velocidades e/ou em fluidos com alta velocidade de propagação de som [9].

6. Análise experimental

Para teste das hipóteses levantadas e desenvolvimento de um protocolo de testes, bem como das metodologias de análise, um medidor de vazão ultrassônico por tempo de trânsito descaracterizado foi testado e avaliado. A escolha de um medidor descaracterizado se deu pela possibilidade de observação do fenômeno físico em estudo, a fim de se detectar a dependência do desempenho da tecnologia com o número de Reynolds. Evidentemente, um medidor caracterizado e em bom estado de funcionamento terá correções internas que poderão levar ao desempenho satisfatório independentemente da forma de calibração.

Um medidor de vazão ultrassônico por tempo de trânsito descaracterizado de 6" foi testado no TÜV SÜD *National Engineering Laboratory* (NEL), na Escócia. O NEL é o Instituto Nacional de Metrologia (NMI) do Reino Unido, com capacidade de medição reconhecida pelo Bureau Internacional de Pesos e Medidas (BIPM), e com serviços inclusos no banco de dados de comparações chave do BIPM - KCDB (UK1 a UK8). Também possui serviços de calibração acreditados à ISO/IEC 17025 pelo *United Kingdom Accreditation Service* (UKAS) do Reino Unido, sob número 0009.

O medidor foi testado com água, querosene, óleo diesel, e óleo mineral *Siptech* em três viscosidades distintas (alteradas através da mudança de temperatura do escoamento). Os testes ocorreram em três bancadas de calibração diferentes. As incertezas obtidas estão na ordem de 0,15% para água, 0,08% para querosene, 0,085% para óleo diesel e 0,25% para *Siptech*,

Os resultados apresentados nas Figuras 3, 4 e 5 ilustram os erros do medidor descaracterizado para cada uma das medições dos seis fluidos testados, em relação à vazão volumétrica (Figura 3) e ao número de Reynolds (Figuras 4 e 5). No gráfico da Figura 3, observa-se uma grande dispersão dos valores, sugerindo uma falta de correlação direta com a vazão. Esta falta de correlação ocorre devido à alta dependência entre resultado de medição e o perfil do escoamento, o que não pode ser garantido apenas com a determinação da vazão do escoamento. Já no gráfico da Figura 4, fica evidente uma clara dependência do medidor em relação ao número de Reynolds, indicando que esse parâmetro exerce uma influência significativa nos resultados obtidos. Esta dependência pode ser melhor demonstrada a partir da análise de pontos com mesmo número de Reynolds: em toda a faixa de medição estudada, há sobreposição das barras de incerteza tipo A (com 95% de confiança) em todos os pontos, exceto em Reynolds ≈ 110.000 . Esta diferença ocorreu devido à combinação da alta repetibilidade do instrumento com erro sistemático dos padrões de calibração. É possível também observar o comportamento típico de desempenho de medidores ultrassônicos de acordo com as faixas do número de Reynolds e, há uma notável instabilidade do perfil na zona de transição, onde pequenas variações do número de Reynolds podem alterar fortemente o resultado de medição. Na faixa de Reynolds turbulentos, por outro lado há uma maior linearidade no comportamento da planicidade do perfil de velocidade com relação ao número de Reynolds. Por este motivo, a maioria dos fabricantes recomenda que a operação de seus medidores na região de transição seja evitada ou analisada caso a caso. No gráfico da Figura 5 ilustra os resultados obtidos incluindo-se a barra de incerteza expandida para cada ponto de calibrado, sendo possível observar uma sobreposição ou equivalência dos resultados em toda a faixa calibrada para todos os fluidos. A análise dos gráficos também permite-se observar que todos os fluidos apresentaram resultados equivalentes, tanto em termos de erro de medição quanto em repetibilidade.

Este artigo aborda exclusivamente a região turbulenta de Reynolds, em limites de acordo com as especificações técnicas do fabricante do medidor utilizado nos testes. As medições realizadas na faixa de Reynolds de 2500 a 7000 foram realizadas com o propósito de observação dos fenômenos físicos envolvidos.

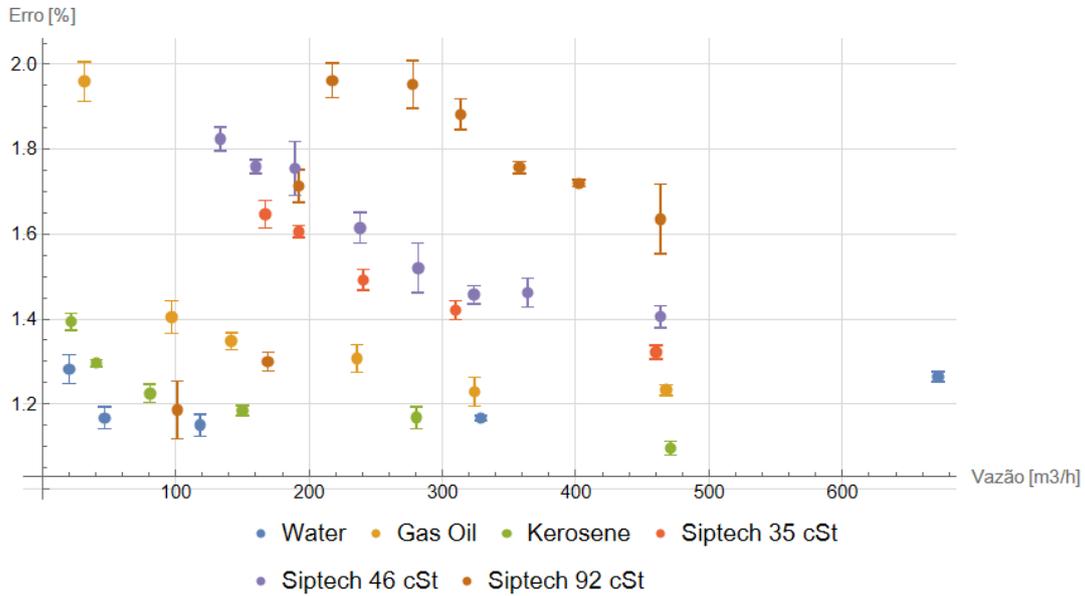


Figura 3. Resultados US-1 (Todos fluidos): Erro x Vazão de referência, para todos os pontos.

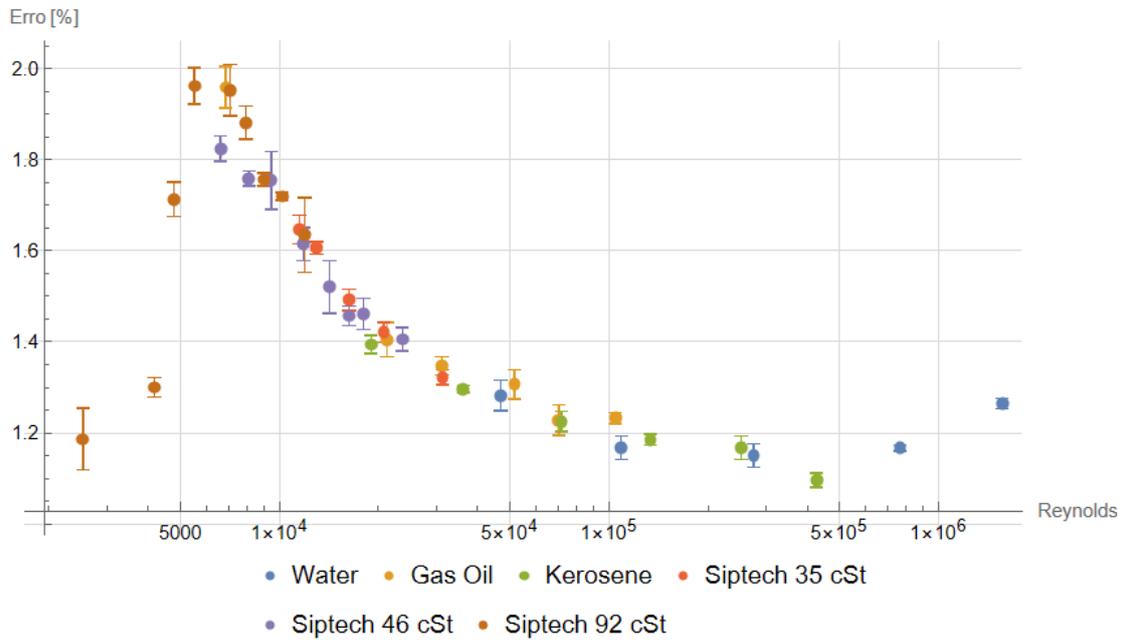


Figura 4. Resultados US-1 (Todos fluidos): Número de Reynolds x Erro (barra de incerteza da repetibilidade), para todos os pontos.

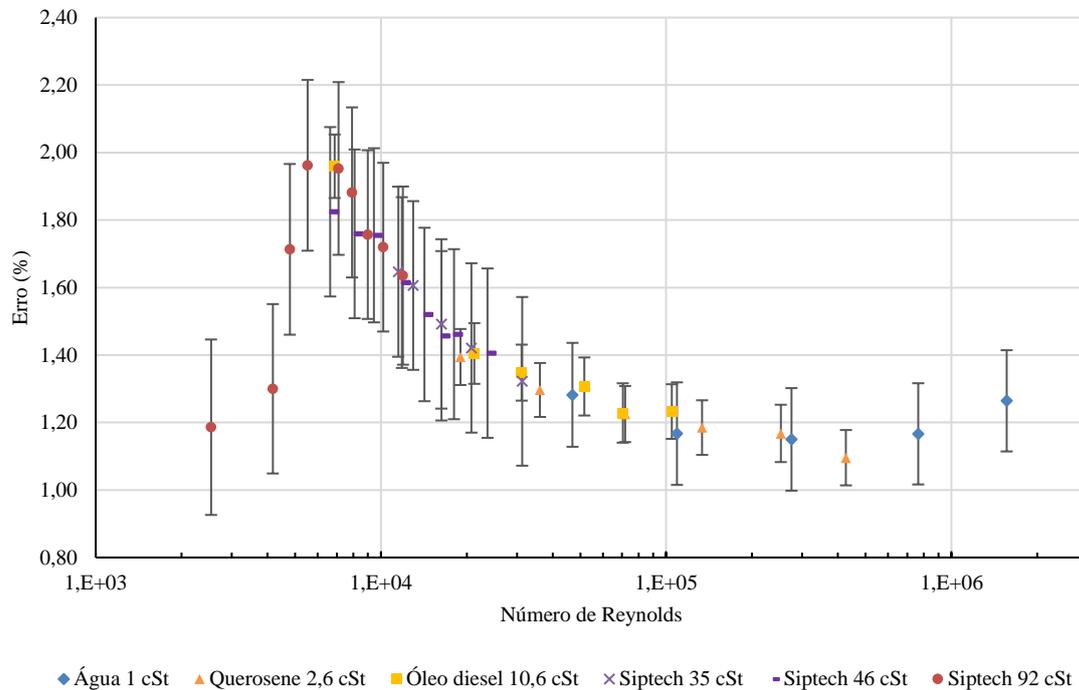


Figura 5. Resultados US-1 (Todos fluidos): Número de Reynolds x Erro (barra de incerteza expandida), para todos os pontos.

7. Conclusões

A análise do princípio de funcionamento de medidores de vazão do tipo ultrassônico por tempo de trânsito, de múltiplas trajetórias, aliado aos resultados experimentais, demonstram que, é metrologicamente aceitável que instrumentos desta tecnologia sejam calibrados com base no número de Reynolds. Esta abordagem permite que apenas um parâmetro – o número de Reynolds - seja reproduzido na calibração, de forma que o número de pontos total – e, portanto, os custos e prazos de calibrações - pode ser reduzido drasticamente.

Alguns aspectos, no entanto, devem ser destacados: assim como a metodologia utilizada atualmente, deve-se garantir que o fluido seja incompressível, newtoniano e homogêneo (monofásico), bem com haja estabilidade térmica no escoamento. A condição de similaridade geométrica deve ser obtida, pela reprodução, da melhor forma possível, das condições de instalação à montante do instrumento, ou que sejam utilizados condicionadores de escoamento.

Os medidores também devem possuir recursos - ou correções devem ser aplicadas - para compensação da diferença de temperatura e pressão entre condição de calibração e operação, quando este efeito for considerado significativo. O desempenho em vazão do medidor também deve ser observado, especialmente devido à estabilidade de zero do medidor, e todas as trajetórias do medidor devem operar dentro dos limites de velocidades determinados. Isto é particularmente importante em baixos números de Reynolds e baixas vazões, onde as trajetórias periféricas apresentarão as menores velocidades possíveis e efeitos de zero podem ser significativos.

Para a aplicação desta metodologia alternativa de calibração, deve ser garantido, portanto, que os coeficientes de calibração sejam aplicados com base no número de Reynolds de operação. Desta forma, duas alternativas podem ser utilizadas: a obtenção do número de Reynolds do escoamento diretamente, a partir do conhecimento da viscosidade e densidade do escoamento em medição, associado à medição de vazão do medidor; ou aplicação dos fatores de calibração automaticamente, realizada pelo próprio



medidor, através de parâmetros de monitoramento interno (geralmente relação entre as velocidades das trajetórias) ou da entrada de parâmetros de viscosidade e densidade pelo operador.

8. Agradecimentos

O Inmetro agradece à Petrobras pela parceria no financiamento de estudos visando a pesquisa e desenvolvimento de metodologias alternativas de calibração de medidores de vazão, bem como aos fabricantes de medidores de vazão do tipo ultrassônico que desde o primeiro momento deste estudo se dispuseram a compartilhar as tecnologias de medição com esta equipe. Este trabalho foi financiado pela PETROBRAS sob o número 4600615426.

Referências

- [1] Inmetro/ANP, “Regulamento Técnico de Medição de Petróleo e Gás Natural (RTM) número 001/2013,” [Online]. Available: <http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC001995.pdf>. [Acesso em 21/12/2021].
- [2] Baker, R. C. (n.d.). Flow Measurement Handbook: Industrial Designs, Operating Principles, Performance and Applications. Cambridge University Press 202.
- [3] Cousins, T. (2014). IS LINEARISATION SAFE FOR CUSTODY TRANSFER METERS? 32nd International North Sea Flow Measurement Workshop.
- [4] L. P, F. K.-E. e V. M., “GERG Project on Ultrasonic Gas Flow Meters, Phase II,” GERG project Group, 2000.
- [5] Okiishi, M. Y. (2006). Fundamentals of Fluid Mechanics Fifth Edition. John Wiley & Sons, Inc.
- [6] International Organization for Standardization, “ISO 17089-1:2010 Measurement Of Fluid Flow In Closed Conduits - Ultrasonic Meters For Gas - Part 1: Meters For Custody Transfer And Allocation Measurement,” 2010.
- [7] International Organization for Standardization, “ISO 12242:2012(E) : Measurement of fluid flow in closed conduits - Ultrasonic transit-time meters for liquid,” 2010.
- [8] I. O. O. L. METROLOGY, “OIML:R 117-2 - Dynamic measuring systems for liquids - Part 2: Metrological controls and performance tests,” International Organization of Metrology Lagal, 2014.
- [9] American Gas Association, “AGA Report No. 9 - Measurement of Gas by Multipath Ultrasonic Meters,” 2022.