

1

Introdução

1.1.

Medição de Vazão na Indústria do Petróleo

Nas companhias de petróleo, os sistemas de medição de vazão são a base do faturamento, do controle contábil e operacional, e da segurança industrial e do meio ambiente. Há 40 anos, era possível gerenciar toda a movimentação de produtos com medições de nível de tanque, mas atualmente, com as exigências de logística, exatidão e confiabilidade impostas pelo mercado globalizado, os sistemas de medição dinâmicos se tornaram indispensáveis.

Nos últimos anos, além do interesse direto das empresas de petróleo na utilização e melhoria contínua dos sistemas de medição de vazão, a Agência Nacional do Petróleo (ANP) e o Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (Inmetro) estão mais rigorosos nas regulamentações aplicáveis às medições de vazão, em especial no caso de medição de transferência de custódia e fiscal. Hoje, é exigido para os sistemas de medição de vazão de hidrocarbonetos líquidos, erro máximo admissível de $\pm 0,3\%$ (RTM-64) e, para os sistemas de gás natural, incerteza de medição menor ou igual a 1,5% (RTM-001/2000).

A indústria do petróleo tem investido na aquisição e modernização de sistemas de medição de vazão a um custo significativo, e a necessidade de atualização é constante. Novas tecnologias são disponibilizadas, e a aquisição de instrumentos com tecnologia de ponta está associada a um conhecimento novo. Trazem questões que podem ser inovações mesmo para os fabricantes ou centros de pesquisa. A pesquisa e o desenvolvimento na área de medição em geral e, especificamente, em medição de vazão passam a ser estratégicos.

Os medidores de vazão ultrassônicos são o destaque das últimas duas décadas. São robustos, conseguem aprovação de modelo na classe de exatidão mais rigorosa, são capazes de medir grandes vazões, sua colocação e retirada da linha é relativamente fácil, e apresentam grande flexibilidade quanto ao produto a

ser medido e às condições de operação. Entretanto, não-conformidades na instalação (como diferenças no comprimento de trecho reto e a existência de acidentes a montante do medidor) podem influenciar os resultados, os ultrassônicos apresentam dificuldades nas calibrações e não há um procedimento claro para a realização de verificações.

Devido à sensibilidade do medidor ultrassônico ao perfil de velocidade, o escoamento precisa estar completamente desenvolvido no trecho de medição e, por isso, as exigências de instalação são rigorosas. Em locais críticos, como em monobóias ou próximo a válvulas ou a curvas em unidades compactas, pode não haver espaço disponível para implementar os trechos retos necessários.

Da mesma forma, devido à sensibilidade ao perfil de velocidade, na calibração do medidor ultrassônico, a vazão deve ser mantida constante por um período de tempo maior do que na calibração de medidores de vazão de outras tecnologias. Então, o volume do fluido utilizado na calibração de medidores ultrassônicos é maior do que o volume na calibração de medidores com outras tecnologias, o que acarreta em padrões volumétricos maiores. Por isso, é difícil ou mesmo inviável a utilização de medidores ultrassônicos em estações de medição de líquidos, onde precisam ser calibrados no local de operação contra um volume padrão (provador).

Também, durante a operação seria de grande valia para a verificação desses medidores a utilização dos parâmetros de diagnóstico indicados por fabricantes. A indústria não tem tido acesso a esses parâmetros, mas, como são indicados como relevantes, a intenção é ter esse conhecimento e acesso.

O medidor ultrassônico utiliza tecnologia de ponta em instrumentação eletrônica, processamento de sinal e dinâmica dos fluidos. Para a indústria, tem potencial para se desenvolver mais nos próximos anos.

No Sistema Petrobras, os medidores ultrassônicos são utilizados: na medição fiscal de petróleo e gás natural; na medição de transferência de custódia de gás natural; e no controle operacional e detecção de vazamento de petróleo, derivados, biocombustíveis e gás natural. Há instalações que permitem calibração dos medidores no local de operação. Mas, todos os medidores ultrassônicos de vazão de gás natural e os medidores ultrassônicos de líquido utilizados em controle operacional não dispõem de instalação para sua calibração no local de

operação. A tecnologia ultrassônica a cada ano aumenta sua participação na indústria.

A expectativa no momento é continuar utilizando e até ampliar a utilização do medidor ultrassônico na medição de vazão e totalização de volume. Entretanto, é necessário identificar os fatores que influenciam esta medição, em especial fatores relativos à instalação. O usuário tem interesse em ter uma informação segura de qual é a variação esperada nos resultados em função de, por exemplo, uma curva ou um desnível no diâmetro interno a montante do medidor. A prioridade é garantir exatidão e confiabilidade nos resultados.

1.2.

Estado da Arte

A tecnologia ultrassônica de tempo de trânsito foi patenteada por Rütgen em 1928, mas apenas 40 anos mais tarde, o medidor de vazão ultrassônico conseguiu atingir uma incerteza aceitável pela indústria. Os primeiros instrumentos apareceram na década de 60, em uma configuração simples, com apenas uma trajetória passando pelo centro da tubulação (Brassier, 2000). Na década de 70, os primeiros medidores *clamp-on* foram comercializados nos Estados Unidos (Yoder, 2009). Utilizados inicialmente na medição de água, os ultrassônicos começaram a ter expressão na indústria do petróleo, na medição de vazão de óleo e gás nos anos 80, melhoram seu desempenho e passam a ser comercializados em larga escala na década de 90. Em 2008, 57% dos ultrassônicos comercializados no mundo eram medidores de gás, e 41%, de líquidos (Yoder, 2009).

Diversos experimentos foram realizados nos últimos anos visando conhecer as possibilidades e limitações dos medidores ultrassônicos. Sakariassen et al. (2000) descrevem o teste de longa duração, conduzido pela Statoil¹ e a Ruhrgas² (11 meses) em um circuito de gás natural, com diâmetro de 16 polegadas, com medidor ultrassônico, medidor tipo turbina e medidor tipo placa de orifício. As diferenças entre os valores indicados pelos medidores ultrassônicos

¹ Companhia norueguesa de exploração, produção e transporte de petróleo e gás natural.

² Companhia alemã de transporte e armazenamento de gás natural, que opera em diversos países e recebe gás natural da Statoil.

e os valores indicados pelas turbinas ficaram na faixa de $\pm 0,25\%$ (o que foi considerado um resultado positivo, pois as incertezas envolvidas ficam em torno de 0,7% para cada medidor). Em comparação com a turbina, o ultrassônico se mostrou mais robusto (mostrou maior continuidade em operação e exigiu menos manutenção). Para o ultrassônico, o resultado da *dry calibration* (procedimento em que apenas o zero do instrumento é calibrado com base na medição da velocidade do som) comparado com o resultado de outras calibrações mostrou diferenças em torno de 0,3%. O medidor ultrassônico dispõe de um ou mais pares de transdutores e cada par de transdutor forma um canal. Pela velocidade do som (VOS) medida pelos canais é possível avaliar se o medidor ultrassônico mantém seu desempenho.

Os testes descritos por Grimley (2000), realizados nos laboratórios de alta pressão de gás natural do Southwest Research Institute com medidores ultrassônicos multicanais de 12 polegadas, fizeram parte da série de testes que contribuiu com a revisão da AGA 9 (2007), norma da American Gas Association (AGA) referente aos medidores ultrassônicos. Os testes tiveram por objetivo avaliar a influência de perturbações resultantes de instalações típicas na indústria. Grimley testou medidores de 4, 5 e 6 canais, com diferentes acidentes a montante dos medidores: trecho reto com 100D (100 diâmetros), curva de 90°, duas curvas de 90° no mesmo plano e em planos perpendiculares. Os testes foram realizados com e sem condicionadores (dispositivos instalados a montante do medidor para minimizar vórtices e assimetrias no escoamento) e mostraram que mesmo para o escoamento completamente desenvolvido, os condicionadores influenciam nos resultados. Cada tipo de condicionador influencia o perfil de uma forma diferente e cada medidor tem seu próprio método de cálculo de vazão e responde à variação do perfil de forma específica. Tomando como referência o resultado obtido com escoamento completamente desenvolvido, dois medidores (de fabricantes diferentes) quando instalados a 20D do acidente mostraram desvio maior do que quando instalados a 10D do acidente. Essa sensibilidade dos medidores pela instalação foi interpretada como função do algoritmo de cálculo. Foi verificado também que os medidores deslocados 90° em torno do eixo da tubulação, com relação a sua posição original, em geral, indicaram desvios maiores, devido a sua sensibilidade ao perfil. Ficou a recomendação de utilizar condicionador de escoamento para minimizar distorções no perfil resultante da instalação.

Entretanto, o condicionador de 19-tubos (usual em medições com placas de orifício) gerou distorções no perfil e, portanto, sua utilização não é recomendável.

Frasier (2008) descreve o resultado de testes realizados com o medidor ultrassônico *clamp-on*, para gás natural, o qual obteve incerteza de 0,5% no laboratório do Southwest Research Institute. O *clamp-on* foi utilizado para avaliação de medidores fixos. Avaliando um medidor ultrassônico comercial, com diâmetro de 16 polegadas, a diferença foi de mais de 1,0% com relação ao resultado do *clamp-on*, e foi verificado que havia problemas em um transdutor do medidor comercial. Diferenças de 2% foram encontradas na avaliação de um medidor *clamp-on* fixo de 8 polegadas, e foram constatados problemas de instalação com quatro joelhos a montante do trecho reto. O medidor *clamp-on* em diferentes posições angulares em um mesmo trecho de duto permitiu avaliar assimetrias no escoamento.

Testes com medidores ultrassônicos podem fornecer informações importantes, entretanto, seu custo é elevado e nem sempre é possível abranger todas as possibilidades de instalação e condições operacionais. A simulação numérica, então, é uma opção para complementar os testes a custo mais baixo. Por outro lado, para validar os resultados de uma simulação, uma estratégia fundamental é comparar os resultados computacionais com os dados do experimento (Oberkampf & Trucano, 2002).

Yeh & Mattingly (1997) apresentaram os resultados de simulações numéricas de medidor ultrassônico de tempo de trânsito com um canal. Incluíram diferentes condições de instalação variando a distância do canal com relação ao eixo do duto, a inclinação do canal com relação ao eixo e a inclinação do canal na seção transversal. As simulações abrangeram diferentes números de Reynolds (escoamento laminar, e escoamento turbulento com $Re = 1 \times 10^5$ e $Re = 3 \times 10^6$). Foi avaliada a influência de um joelho no resultado da medição. Os resultados indicam que um medidor ultrassônico com um par de transdutores tem um elevado grau de sensibilidade ao perfil de escoamento. O desempenho do medidor é função da distância do canal ao eixo do duto, da inclinação do canal com relação ao eixo, da inclinação do canal na seção transversal e da distância do canal ao acidente. Para escoamento com um joelho, as indicações do medidor dependem da orientação e localização da instalação do medidor e próximo ao joelho, as variações podem chegar a 35% devido aos efeitos do escoamento cruzado.

Zanker (1999) utilizou perfis de velocidade analíticos assimétricos para simular efeitos de instalação em medidores de vazão ultrassônicos, mostrando que, para obter bom desempenho, é importante considerar a orientação do medidor de vazão com relação ao perfil de velocidade.

Moore et al. (2000b) descreveram um método para modelar e analisar o efeito de perfis de escoamento assimétrico em medidores ultrassônicos de tempo de trânsito, no qual toma por base os perfis analíticos de Salami (1984). Moore et al. combinaram os perfis analíticos com as configurações dos canais dos medidores ultrassônicos de tempo de trânsito e simularam a medição ultrassônica em escoamentos assimétricos. Apresentaram parâmetros para avaliar a sensibilidade da configuração dos canais ultrassônicos com relação aos perfis, o que permitiria indicar, por exemplo, para uma dada instalação, o arranjo de medidor mais apropriado.

Yeh & Mattingly (1997) utilizaram em sua análise a equação de vórtice de Taylor que simula efeitos de vórtices axialmente assimétricos. Por este modelo não há garantia de que a velocidade na parede seja zero. Para analisar efeitos de distorções no perfil de velocidade axial, Brown et al. (2006b) utilizaram um algoritmo que já havia sido aplicado na modelagem de perfis assimétricos pelo NEL (*National Engineering Laboratory*). Na avaliação dos efeitos de vórtices assimétricos em medidores multicanais, Brown et al. (2006b) se basearam em uma equação de vórtice de Taylor utilizada anteriormente por Yeh & Mattingly (1997), mas acrescentou uma função multiplicativa para garantir velocidade zero na parede.

Moore (2000) verificou as conclusões de Yeh & Mattingly (1997) e Zanker (1999) através de simulações numéricas por CFD (*Computational Fluid Dynamic*) usando o método RANS (*Reynolds Averaged Navier-Stokes*) para um medidor de vazão ultrassônico de quatro canais, de líquido, a jusante de uma curva de 90°, duas curvas de 90°, redução e expansão. As simulações foram verificadas experimentalmente e concluíram que o desempenho ótimo da medição depende da localização do medidor de vazão.

A variação da resposta do medidor em função do número de Reynolds pode influenciar de forma significativa os resultados de uma medição e, também, as simulações. Vaterlaus (1995) avaliou que, para medições com escoamento

turbulento, a desconsideração da variação da velocidade com Re leva a erros da ordem de 2 a 3% em medidores monocanais.

Zanker (1999) explica essa dependência da resposta do medidor com o Re e Orlando (2009) destaca a importância do Re na calibração dos medidores ultrassônicos.

Vaterlaus (1995) descreveu o método utilizado pelos medidores de vazão ultrassônicos para calcular o tempo de trânsito. Para minimizar a resolução dos resultados, é calculada a média dos tempos de trânsito de uma sequência de pulsos ultrassônicos. Assim, a resolução necessária e o número de pulsos utilizados no cálculo da média determinam a velocidade mínima da faixa de trabalho do medidor.

Um detalhe construtivo que afeta diretamente os resultados de um medidor ultrassônico é a forma como o sensor é fixado na tubulação ou no corpo do medidor. Foi apresentado pelo NEL (2000) o resultado da avaliação de desempenho de medidores ultrassônicos por período longo (18 meses), o que envolveu três medidores de carretel (dois medidores de 1 canal e o terceiro de 2 canais) e um *clamp-on* de 2 canais. Uma calibração inicial na faixa dos medidores e uma série de testes que incluíam manutenções simuladas seguidas de calibrações foram realizadas. Todas as calibrações foram feitas com óleo mineral de 24 cSt. Em regime turbulento, os medidores obtiveram, na calibração inicial, 1% de linearidade e 0,1 a 0,5% de repetitividade. A troca de cabos dos transdutores (de 15 m para 4 m; e de 2 m para 10 m) pode aumentar a incerteza em torno de 0,1%. A troca da eletrônica dos medidores gerou diferenças nas médias de 0,1 e até 0,15%. Quanto à substituição de transdutores, o fabricante de um medidor de carretel não autorizou o teste; outro medidor carretel apresentou desvio de calibração de 0,8% para a troca de transdutores e 0,1% para troca apenas do cristal piezelétrico; o medidor de carretel com 2 canais apresentou desvios de 0,1 a 0,2% e o *clamp-on* chegou a diferenças de 1%. A reprodutibilidade durante os 18 meses para estes medidores foi de 0,2 e 0,25% para os medidores de carretel de um canal, 0,4% para o medidor de carretel de dois canais, e 1% para o *clamp-on*.

As simulações numéricas de medidores ultrassônicos consideram que o pulso ultrassônico é transmitido de um transdutor ao outro e o caminho percorrido pelo pulso, denominado trajetória, pode ser representado por uma linha reta.

Yeh & Mattingly (1997) utilizaram modelos computacionais e a simulação da trajetória foi realizada por uma linha reta e também por linhas curvas para analisar a influência da velocidade do fluido sobre a trajetória do pulso ultrassônico. Os resultados indicaram que a concepção de que a trajetória é uma linha reta é adequada para número de Mach menor que 0,1. A sensibilidade dos medidores ao perfil de escoamento foi investigada para perfis de velocidade gerados por diferentes equações (uniforme, laminar, lei de potência, Bogue-Metzner, Reichardt, Gilmont, inclinação com relação eixo e equação de vórtice de Taylor). O medidor foi também avaliado em escoamento turbulento, com número de Reynolds elevado, em um trecho com uma única curva com software comercial de CFD, cujos resultados indicam que a localização das instalações e a orientação do par de sensores do medidor ultrassônico são críticas na obtenção de níveis satisfatórios de desempenho do medidor. Os resultados sugerem que medidores multicanais provavelmente conseguirão assegurar melhores níveis de exatidão e menor sensibilidade ao perfil de escoamento.

Moore et al. (2002) descrevem o efeito de flutuações turbulentas em escoamento completamente desenvolvido na trajetória de um medidor ultrassônico de tempo de trânsito. Para calcular, na simulação, a velocidade média na trajetória do pulso ultrassônico, foi utilizado o método *ray-tracing*, que busca coerência com o método do medidor ultrassônico. Para número de Mach (Ma) de 0,01 a 0,1 e número de Reynolds (Re) de 193 a 22494, o desvio na medição devido a flutuações turbulentas, com relação ao resultado obtido com perfil completamente desenvolvido, aumenta com o aumento de Ma e chega a 0,26% para Ma igual a 0,1.

O presente trabalho analisa desvios nos resultados dos medidores ultrassônicos em função de o perfil de velocidade sofrer alterações devido a acidentes a montante do medidor ou variações nas condições de operação. Mas não são apenas as alterações no escoamento que influenciam essas medições. O resultado de uma medição com medidor ultrassônico terá também componentes de incerteza devido à instrumentação e ao processamento de sinais. Brassier (2000) detalha: atenuação de ondas ultrassônicas no meio, limites da frequência de emissão de sinais em função dessa atenuação, adaptação da impedância dos transdutores quando pressurizados, funcionamento dos transdutores, medição de

tempo de trânsito, influência de variações na temperatura do fluido, ruídos existentes nas tubulações e queda de amplitude do sinal em função da distância.

Quanto ao diagnóstico de medidores ultrassônicos, Lansing (2001) analisa questões fundamentais no diagnóstico de medidores ultrassônicos na medição de gás natural, e mostra como esta tecnologia tem vantagens diante de outras tecnologias.

Zanker (2003) analisa parâmetros de diagnóstico do medidor ultrassônico de gás natural de 4 canais, e indica parâmetros para quantificação de assimetria, escoamento cruzado e vórtice, e valores para condições ideais e faixas aceitáveis no local e no laboratório. Calcula as flutuações na velocidade, que denomina também de turbulência. A comparação da velocidade do som indicada pelo medidor com a velocidade do som calculada pela AGA 10 (2003) é uma possibilidade de autodiagnóstico.

Oliveira et al. (2007) descrevem parâmetros de diagnóstico, como assimetria, escoamento cruzado e turbilhonamento, utilizados em medidor ultrassônico de 5 canais. Indica o fator de turbilhonamento como principal ferramenta para avaliação do número de Reynolds do escoamento nas condições de operação.

A medição de vazão de produtos viscosos é uma dificuldade para todas as tecnologias e a tendência mundial de o petróleo produzido nos próximos anos apresentar viscosidade elevada. Assim, os fabricantes estão investindo em atender a essa demanda. No Heavy Oil Workshop, ocorrido no Rio de Janeiro em novembro de 2009, os pesquisadores associados a fabricantes, que atuam no desenvolvimento de medidores ultrassônicos, indicaram aspectos que podem afetar a medição de vazão de óleo viscoso: Antunes (2009) aponta transmissão da energia do pulso ultrassônico e o regime do escoamento; Brown et al. (2009) identificam a resposta do medidor a variações significativas na viscosidade e a atenuação, pelo fluido, do sinal transmitido; e Hogendoorn et al. (2009) destacam a atenuação acústica do sinal ultrassônico pelo fluido, a interferência na transmissão devido a cruzamento de sinais (*crosstalk*), o efeito do baixo número de Reynolds (no perfil laminar), e os desvios da temperatura no líquido viscoso. Indicam que é importante, para medidores ultrassônicos operando com produtos viscosos, a influência das instalações e as possibilidades de calibração e verificação.

A medição de vazão com a tecnologia ultrassônica tem potencial para operar com petróleo, derivados, gás natural e biocombustíveis, em extensa faixa de condições de operação. Mas é uma tecnologia nova e há dúvidas quanto aos parâmetros de influência, em especial quanto à influência da instalação nos resultados da medição. Nas medições de vazão de gás natural e em diversas aplicações com biocombustíveis ou hidrocarbonetos líquidos, os medidores são calibrados em laboratório. Nos sistemas de transferência de custódia e fiscal de líquidos os medidores de vazão precisam ser calibrados no local, mas os procedimentos utilizados com outros tipos de medidores de vazão, nem sempre se são eficientes e confiáveis para os ultrassônicos e muitos sistemas não incluem calibração no local de operação.

1.3.

Objetivo

O objetivo do presente trabalho é quantificar a influência da instalação nos resultados dos medidores de vazão ultrassônicos focando, em especial, o caso típico de curvas a montante do medidor. A proposta inclui a definição de fatores de correção que minimizem os erros sistemáticos.

Esse trabalho inclui dois aspectos principais. O primeiro, quanto à aplicação de simulação numérica na avaliação dos sistemas de medição ultrassônicos, inclui apresentar uma proposta, que supere o erro numérico que, para a medição de vazão, é elevado. O segundo aspecto se refere a comparar os resultados obtidos analítica e numericamente sobre a influência da instalação, com os resultados obtidos em experimento que inclua a avaliação dos medidores ultrassônicos.

Para isso, fez-se necessário identificar parâmetros de influência, avaliar como alterações no escoamento influenciam nos resultados dos medidores ultrassônicos, quantificar essas diferenças visando sua correção e avaliar a eficiência dos parâmetros de diagnóstico.

Dentro desse objetivo geral, foram também definidas as seguintes metas:

- 1) Apresentar a análise do medidor ultrassônico visando a simulação numérica.

- 2) Definir e validar um método para a simulação dos medidores ultrassônicos monocanais e multicanais, incluindo as malhas e as modelagens de escoamento e o pós-processamento.
- 3) Identificar parâmetros que geram alterações no perfil de escoamento e por isso podem influenciar nos resultados dos medidores.
- 4) Apresentar uma análise sistemática a influência de curva a montante do medidor, com a comparação da influência de instalações com uma ou duas curvas e definir recomendações de instalação.
- 5) Avaliar a utilização de parâmetros de diagnóstico.
- 6) Determinar a incerteza de medição devido aos parâmetros de influência analisados.

1.4.

Estruturação

O presente trabalho está com a seguinte estrutura:

- Capítulo 2 (Fundamentos Teóricos): Apresenta o medidor ultrassônico, o princípio de operação, aspectos de sua construção e arranjos, e parâmetros de diagnóstico; identifica os modelos de escoamento utilizados nas modelagens e simulações; descreve trabalhos que utilizaram simulação numérica em medidores ultrassônicos; e apresenta uma base metrológica para a análise de um medidor de vazão.
- Capítulo 3 (Metodologia): Identifica possibilidades e limitações do instrumento, e descreve a metodologia utilizada, as análises feitas com diferentes perfis de velocidade e as simulações realizadas com software comercial CFX, limitações dos métodos e análise de erros numéricos. Apresenta também um procedimento para tratar os resultados de experimentos que envolvem medição de vazão.
- Capítulo 4 (Métodos Experimentais): Descreve um experimento que geraram os dados para a avaliação de medidor ultrassônico em instalação com trecho reto a montante com diâmetro interno diferente do diâmetro interno do medidor.
- Capítulo 5 (Resultados e Discussão): Apresenta resultados, discussões e conclusões de forma geral. Inclui a avaliação da influência de uma curva, duas curvas no mesmo plano e duas curvas em planos diferentes a montante

do medidor. Discute também a influência de diferenças no diâmetro interno do medidor e dos trechos retos.

- Capítulo 6 (Conclusões): Apresenta as conclusões de forma resumida e objetiva, contribuição do trabalho e recomendações de trabalhos futuros.