

6º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

Uma abordagem numérica para o cálculo de fator de correção de medidores de vazão por ultrassom

AUTORES:

Ramon Silva Martins (ramonsmartins@gmail.com)

Rogério Ramos (ramosrogerio@hotmail.com)

INSTITUIÇÃO:

Universidade Federal do Espírito Santo

Este Trabalho foi preparado para apresentação no 6º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás- 6º PDPETRO, realizado pela Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás-ABPG, no período de 09 a 13 de outubro de 2011, em Florianópolis-SC. Esse Trabalho foi selecionado pelo Comitê Científico do evento para apresentação, seguindo as informações contidas no documento submetido pelo(s) autor(es). O conteúdo do Trabalho, como apresentado, não foi revisado pela ABPG. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões da Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás. O(s) autor(es) tem conhecimento e aprovação de que este Trabalho seja publicado nos Anais do 6ºPDPETRO.

UMA ABORDAGEM NUMÉRICA PARA O CÁLCULO DE FATOR DE CORREÇÃO DE MEDIDORES DE VAZÃO POR ULTRASSOM

Abstract

Ultrasonic flow meters are commonly used in oil and gas industry and there are regulations for its correct operation. The correction factor (k) of such flow meters is a decisive issue on flow prediction's error and uncertainties. The paper presents a methodology for the calculation of the k -factor in straight pipe configuration. The commercial code ANSYS CFXTM has been used to predict the flow field. Reynolds number has been tested from 1×10^5 to 2×10^6 . Air at 25°C and standard k - ε turbulence model has been considered. Simulated k -factor has been plotted against analytical relations based on Nikuradse's classical profile. The methodology has been commented. Results and tendencies have been shown and discussed as well.

Introdução

A indústria de petróleo e gás requer medições de vazão precisas e que estejam de acordo com documentos que descrevem os procedimentos para medições operacionais e fiscais. No Brasil, a Portaria Conjunta ANP/INMETRO N° 1 [1], de 2000, foi o primeiro documento desta natureza a ser publicado. Este documento regula tecnicamente condições e procedimentos de sistemas de medição de vazão de petróleo e gás natural, além de autorizar previamente a utilização de medidores de vazão por ultrassom (MVU) para gás natural. Outros documentos, como AGA Report N° 9 [2] e a recente norma brasileira ABNT NBR 15855 [3] são usados frequentemente como procedimentos padrão para tais processos de medição. No entanto, as condições para medição acurada de vazão podem não ocorrer, em função de vários acidentes de linha, tais como curvas, válvulas e mudanças abruptas de diâmetro. Comumente, em instalações com pouco espaço, estes obstáculos situam-se próximo de seções de medição de vazão, causando perturbações no escoamento. Como a maioria dos medidores de vazão dependem da condição de escoamento completamente desenvolvido, a medição é comprometida nessas situações.

A comunidade científica e tecnológica avalia padrões e efeitos de perturbações no escoamento, bem como busca métodos para diminuição dos consequentes erros e incertezas. [4-5] identificam padrões de perturbação à jusante de configurações típicas (curvas à montante da seção de medição) por meio de experimentos. [6] compara resultados de dinâmica dos fluidos computacional (DFC) com experimentais, sugerindo que simulação numérica é ferramenta interessante para calibração e diagnóstico de medidores. [7] avalia alguns modelos de reprodução matemática de perfis perturbados e apresenta estudo analítico de sensibilidade de MVU em diversas configurações. [8] apresenta a proposta de inferir numericamente o fator de correção de MVU e analisar o efeito de acidentes de linha nos mesmos.

Estas referências [4-8] confirmam que, em função do próprio princípio de funcionamento, os MVU são relativamente sensíveis a perturbações, de maneira que esta sensibilidade e dependência pode ser melhor entendida conhecendo-se a configuração básica e os princípios de operação destes medidores. MVU são compostos por, pelo menos, dois transdutores de sinais ultrassônicos que transmitem e recebem pulsos ultrassônicos através do fluido com uma certa inclinação (α) em relação ao eixo longitudinal da tubulação. O caminho feito pelos pulsos ultrassônicos é chamado caminho acústico.

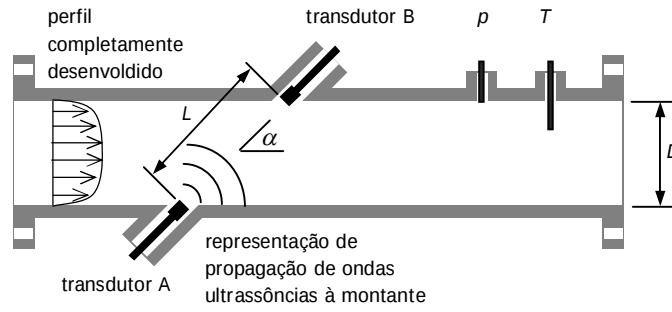


Figura 1. Esquema básico de medidor de vazão por ultrassom.

Supondo não haver escoamento a velocidade de propagação do som no meio (c) pode ser calculada por meio da razão entre a distância entre os transdutores (L) e o intervalo entre o envio e a recepção do pulso ultrassônico. Este intervalo é chamado tempo de trânsito. Uma vez que há escoamento, os tempos de trânsito dos sinais de A para B e de B para A são diferentes, em função do carregamento do sinal acústico pela velocidade do escoamento. O sinal que parte do transdutor A possui tempo de trânsito (t_{AB}) menor que o do sinal que parte do transdutor B (t_{BA}), uma vez que este último se propaga contra o escoamento. Sabendo-se o diâmetro da tubulação (D), o cálculo das velocidades médias de trânsito (u_{AB} e u_{BA}) faz-se, então, possível por meio das Eqs. (1) e (2).

$$u_{AB} = \frac{L}{t_{AB}} = c + \bar{u}_{CA} \cos \alpha \quad (1)$$

$$u_{BA} = \frac{L}{t_{BA}} = c - \bar{u}_{CA} \cos \alpha \quad (2)$$

$\bar{u}_{CA}$ é a velocidade média do escoamento na direção do caminho acústico. As variáveis $\bar{u}_{CA}$ e c são obtidas na solução do sistema algébrico composto pelas Eqs. (1) e (2) e o resultado é mostrado nas Eqs. (3) e (4) abaixo:

$$c = \frac{D}{2 \sin \alpha} \left(\frac{t_{AB} + t_{BA}}{t_{AB} t_{BA}} \right) \quad (3)$$

$$\bar{u}_{CA} = \frac{D}{\sin 2\alpha} \left(\frac{t_{AB} - t_{BA}}{t_{AB} t_{BA}} \right) \quad (4)$$

Em função do próprio princípio de funcionamento, os MVU já obtém c and $\bar{u}_{CA}$, todavia a velocidade média na seção transversal ($\bar{u}_m$) é a utilizada para se calcular a vazão. $\bar{u}_m$ depende do perfil de velocidades e um fator de correção (k), às vezes chamado de fator hidrodinâmico [7], que considera escoamento completamente desenvolvido, é usado para se obter $\bar{u}_m$ por meio de $\bar{u}_{CA}$, conforme exposto na Eq. (5). [9-10]

$$\bar{u}_m = k \bar{u}_{CA} \quad (5)$$

Uma vez obtida $\bar{u}_m$, a vazão volumétrica pode ser dada pela Eq. (6).

$$\dot{Q} = \bar{u}_m A = k \bar{u}_{CA} A \quad (6)$$

Este artigo propõe uma metodologia de cálculo numérico para o fator k , baseado na proposta de Holm *et al.* [8]. O principal objetivo é comparar o fator k de perfis gerados por simulação numérica com resultados de expressões analíticas usadas por [2-3] para alguns números de Reynolds turbulentos.

Metodologia

Este artigo apresenta resultados de simulação numérica de um trecho reto de tubulação com 300 mm de diâmetro interno. Conforme mostrado na Fig. 2, o trecho reto tem comprimento de 100D (30.000 mm).

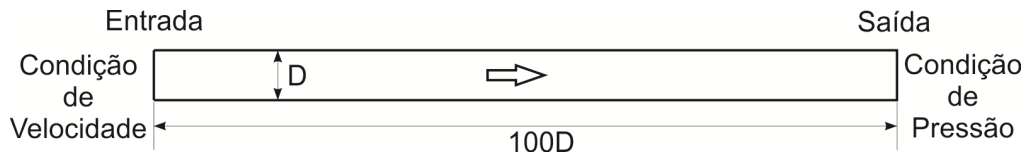


Figura 2. Domínio utilizado nas simulações.

Considerando escoamento permanente e incompressibilidade do fluido, o escoamento turbulento pode ser representado pelas equações de conservação de massa e quantidade de movimento, esta última já com o devido tratamento estatístico clássico de turbulência [11]. Uma vez realizado este tratamento da turbulência, esta necessita de equações adicionais para ser resolvida. Tais equações surgem com o modelo de turbulência. Neste artigo o modelo $k-\varepsilon$ padrão é usado. Neste modelo duas equações de transporte adicionais são consideradas para se obter μ_T . As referências [11-13] apresentam informações detalhadas sobre o tratamento e a modelagem da turbulência.

A solução numérica foi obtida por meio do código comercial de DFC ANSYS CFXTM [14] foi utilizado. O programa usa o Método dos Volumes Finitos e as iterações para solução do sistemas de equações discretizadas são resolvidas com a técnica de fatoração ILU (*Incomplete Lower Upper*) acelerada com a técnica *Multigrid* [13]. Como critério de convergência, os resíduos RMS (*Root Mean Square*) das soluções do sistema de equações governantes discretizadas são controlados para serem menores que 1×10^{-6} , usando dupla precisão para as soluções. Os termos de advecção são tratados com o esquema *High Resolution* [15]. Todos os processamentos utilizaram, em sua plenitude ou não, o *cluster* de 8 máquinas do Laboratório de Fenômenos de Transporte Computacional da Universidade Federal do Espírito Santo, cada uma equipada com processadores Quad Core 2,4 GHz, 4,0 Gb de memória e 8Mb de *cache*.

Um teste de malhas foi realizado, de modo que malhas majoritariamente tetraédricas foram utilizadas inicialmente. No entanto os resultados ainda eram influenciados pelas malhas, mesmo quando atingido o limite de memória dos computadores. Malhas hexaédricas tendem a apresentar mais nós que elementos, ao contrário das malhas não-estruturadas (tetraédricas). Tendo em vista que o critério utilizado no teste de malhas foi ponderado pelo número de nós, as malhas hexaédricas mostraram-se mais vantajosas sob este aspecto e proporcionaram maior número de nós. Em função desta vantagem e do fato de que a convergência dos resultados em relação à malha foi observada, a técnica de malha hexaédrica foi utilizada neste trabalho. A malha escolhida possui mais de 3 milhões de nós e todos os resultados apresnetados na próxima seção foram obtidos com esta discretização.

Ainda são necessárias condições de contorno para fechar o sistema de equações governantes apresentado até agora. Neste trabalho, as paredes do tubo são consideradas lisas e com condição de não-deslizamento. A condição de entrada é de perfil uniforme de velocidade. A velocidade foi

calculada de modo que o número de Reynolds desejado fosse atingido. Para turbulência, intensidade média foi considerada na entrada do domínio. Condição de pressão estática média igual a 1 atm (mesmo valor da pressão de referência) foi usado em toda a saída do domínio. O fluido utilizado foi ar a 25 °C. A Tab. 1 sintetiza as condições de contorno e as propriedades do fluido.

Tabela 1. Síntese das condições de contorno e propriedades do fluido.

Fluido	Ar a 25 °C
Massa Específica	1,185 kg/m ³
Viscosidade Dinâmica	1,83x10 ⁻⁵ kg/m.s
Pressão de Referência	1 atm
Intensidade de Turbulência na Entrada	Média
Pressão Estática Média na Saída	1 atm
Rugosidade da Parede	Parede Lisa
Condição da Parede	Não deslizamento

Manipulando-se a Eq. (5), o fator k pode ser expresso conforme a Eq. (7), a seguir.

$$k = \frac{\bar{u}_m}{\bar{u}_{CA}} = \frac{\frac{1}{A} \int_A u(r) dA}{\frac{1}{L} \int_L u(r) dL} = \frac{\frac{\mu Re}{\rho D}}{\frac{1}{L} \int_L u(r) dL} \quad (7)$$

Note que a velocidade média na seção transversal ($\bar{u}_m$) é obtida pela definição do número de Reynolds e a velocidade média do escoamento na direção do caminho acústico ($\bar{u}_{CA}$) é obtida por meio da integração das velocidades ao longo do caminho acústico. Semelhante à abordagem de [8], a proposta de integração numérica neste trabalho se dá de acordo com a Regra do Trapézio [16], conforme apresentada na Eq. (8).

$$\bar{u}_{CA} = \frac{1}{L} \int_L u(r) dL = \frac{1}{L} \sum_{p=2}^N \frac{(u_p + u_{p-1})}{2} (L_p - L_{p-1}) \quad (8)$$

Donde N é o número de pontos de integração, u_p e L_p são a velocidade e a posição relativas ao ponto de integração p , respectivamente.

Resultados e Discussão

Nesta etapa do trabalho os resultados serão expostos e comentados. O perfil de velocidades foi analisado em seções a 20, 40, 60 e 80D de distância longitudinal a partir da entrada do domínio. As análises sugerem que a partir de 60D o escoamento pode ser considerado completamente desenvolvido. A Fig. 3 mostra o perfil simulado do componente u de velocidade a 80D da entrada comparado com perfis consolidados disponíveis na literatura. Neste trabalho a comparação é feita com o clássico perfil semi-empírico de Nikuradse [17] e com o perfil oriundo da moderna abordagem analítica de De Chant [18].

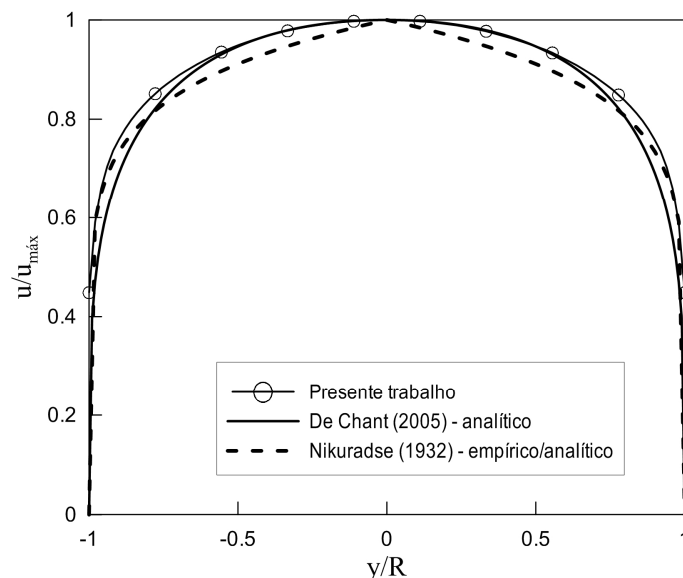


Figura 3. Comparação do perfil do componente u de velocidade para a malha convergida a 80D da entrada com os perfis de Nikuradse [17] e De Chant [18].

O perfil de Nikuradse [17] é usado, desde que foi citado por [2-3], como o perfil completamente desenvolvido a ser atingido em escoamentos turbulentos. De Chant [18], em trabalho mais recente, resolve um problema de camada limite e chega em um resultado analítico para o perfil de velocidades turbulento completamente desenvolvido. É notável que o presente trabalho atinge razoável semelhança com o perfil proposto por De Chant [18], indicando que o procedimento adotado é válido e atual. O perfil de Nikuradse [17], porém, apresenta característica subestimação das velocidades, o que pode indicar a necessidade de revisão da AGA 9 [2] e da recente ABNT NBR 15855 [3].

Com o objetivo de apresentar a sensibilidade de MVU em relação a estas diferenças no perfil de velocidades, o fator k foi calculado numericamente usando as Eqs. (7) e (8). Esta abordagem é relevante pois, como pode ser observado na Eq. (6), o fator k tem influência direta na leitura de vazão volumétrica do instrumento.

Compara-se, neste trabalho, o resultado do cálculo do fator k para alguns números de Reynolds entre 1×10^5 e 2×10^6 com o resultado analítico de k em função de Re , obtido resolvendo-se a Eq. (7) considerando o perfil de Nikuradse [2, 17]. Esta comparação inclui ainda os valores para o fator k obtidos da integração numérica do perfil de Nikuradse [17] para os mesmos valores de Reynolds simulados. Este procedimento também obedece a Eq. (7), porém também é usada a relação entre velocidade média e velocidade máxima deste perfil, que pode ser encontrada em [2, 19]. A Fig. 4 apresenta estas comparações.

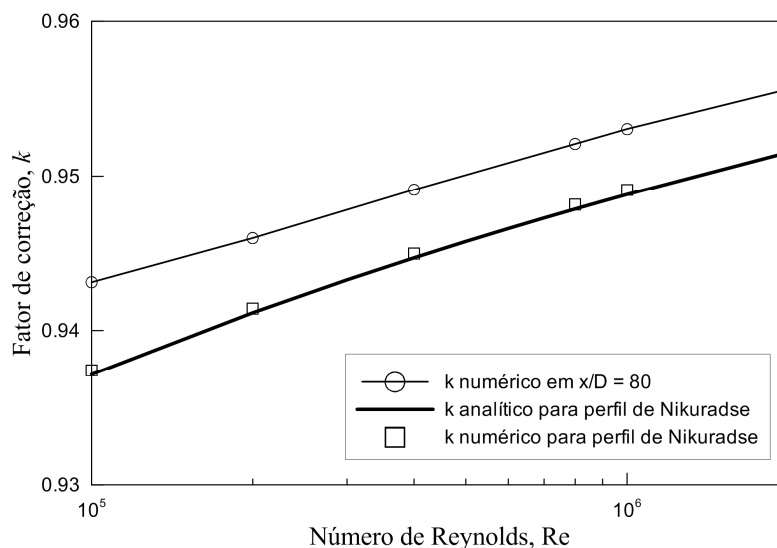


Figura 4. Comparação dos fatores de correção (k) analítico e numérico tendo como base o perfil de Nikuradse [17] com o obtido numericamente com perfil de velocidades simulado em $x/D = 80$.

Em todos os casos, a integração numérica foi realizada com 2.000 pontos de integração. Este número mostra-se razoável quando comparados os valores do fator k obtidos numericamente e analiticamente na Fig. 4. Ainda nesta figura, é notável que o fator k simulado segue a mesma tendência do analítico, no entanto com valores mais altos. Este desvio atinge o máximo no número de Reynolds de 1×10^5 , de 0,64% e o mínimo de 0,43% para Reynolds de 2×10^6 .

Conclusões

Foram realizadas simulações numéricas do escoamento em um trecho reto para o cálculo do fator de correção (k) visando a comparar com a abordagem feita pelos documentos AGA 9 [2] e ABNT NBR 15855 [3], os quais usam o perfil de Nikuradse [17] para tratar o escoamento completamente desenvolvido. Malhas hexaédricas foram testadas e a escolhida apresentou resultados razoáveis quando comparados com trabalhos consolidados da literatura. Como os perfis de velocidade e os valores do fator- k , embora próximos, apresentaram certo desvio em relação aos documentos aqui criticados [2-3], sugere-se também revisão destes documentos, com abordagens mais modernas e testadas. O uso desta abordagem numérica para o cálculo do fator k em perfis perturbados por acidentes de linha, bem como o teste com outros modelos de turbulência ficam como objetivo para trabalho futuro.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao Programa de Recursos Humanos da Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis por fomentar bolsa e fundo para o projeto, bem como ao Laboratório de Fenômenos de Transporte Computacional da Universidade Federal do Espírito Santo por possibilitar o trabalho numérico.

Referências Bibliográficas

- [1] ANP/INMETRO, *Portaria Conjunta ANP/INMETRO Nº1*. 2000, DOU - Diário Oficial da União
- [2] AGA, *Measurement of gas by multipath ultrasonic meters*. Report No. 9, American Gas Association, 2007, Washington, DC, USA.
- [3] ABNT, *ABNT NBR 15855:2010 - Medição de gás por medidores do tipo ultra-sônicos multitrajetórias*. Norma brasileira, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2010, Rio de Janeiro, Brasil.
- [4] Ruppel, C. and F. Peters, *Effects of upstream installations on the reading of an ultrasonic flowmeter*. Flow Measurement and Instrumentation, 2004. **15**(3): p. 167-177.
- [5] Mickan, B., et al., *Systematic investigation of flow profiles in pipes and their effects on gas meter behaviour*. Measurement, 1997. **22**(1-2): p. 1-14.
- [6] Hilgenstock, A. and R. Ernst, *Analysis of installation effects by means of computational fluid dynamics--CFD vs experiments?* Flow Measurement and Instrumentation, 1996. **7**(3-4): p. 161-171.
- [7] Moore, P.I., G.J. Brown, and B.P. Stimpson, *Ultrasonic transit-time flowmeters modelled with theoretical velocity profiles: methodology*. Measurement Science and Technology, 2000. **11**(12): p. 1802-1811.
- [8] Holm, M., J. Stang, and J. Delsing, *Simulation of flow meter calibration factors for various installation effects*. Measurement, 1995. **15**(4): p. 235-244.
- [9] Carlander, C. and J. Delsing, *Installation effects on an ultrasonic flow meter with implications for self diagnostics*. Flow Measurement and Instrumentation, 2000. **11**(2): p. 109-122.
- [10] Mylvaganam, K.S., *High-Rangeability Ultrasonic Gas Flowmeter for Monitoring Flare Gas*. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectric and Frequency Control, 1989. **36**(2): p. 144-149
- [11] Tennekes, H. and J.L. Lumley, *A First Course in Turbulence*. 1972, Cambridge, Massachusetts, USA: The MIT Press.
- [12] Launder, B.E. and D.B. Spalding, *The numerical computation of turbulent flows*. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1974. **3**(2): p. 269-289.
- [13] Versteeg, H.K. and W. Malalasekera, *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*. 2 ed. 2007, Essex: Pearson Education Limited.
- [14] ANSYS CFX™ Version 13.0, 2010, ANSYS Europe Ltd.
- [15] ANSYS CFX-Solver Theory Guide, 2010, ANSYS, Inc. Canonsburg, PA, USA.
- [16] Campos Filho, F.F., *Algoritmos Numéricos*. 2 ed. 2007: LTC.
- [17] Nikuradse, J., *Laws of Turbulent Flow in Smooth Pipes*, National Aeronautics and Space Administration **NASA TT F-10**(359). 1966, Washington, USA. Tradução de 'Gesetzmäßigkeiten der turbulenten Strömung in glatten Rohren', Forsch. Arb. Ing.-Wes., No. 356 (1932)
- [18] De Chant, L.J., *The venerable 1/7th power law turbulent velocity profile: a classical nonlinear boundary value problem solution and its relationship to stochastic processes*. Applied Mathematics and Computation, 2005. **161**(2): p. 463-474.
- [19] Schlichting, H., *Boundary-Layer Theory*. 6 ed. McGraw-Hill series in Mechanical Engineering. 1968, USA: McGraw-Hill.