



CORREÇÃO MATEMÁTICA DE PERFIS DE VELOCIDADE

Daniel Masiero Nering

Engenheiro mecânico formado pela escola politécnica da USP.

Marcos Tadeu Pereira

Professor de engenharia da escola politécnica da USP

Danylo Guedes

Engenheiro mecânico formado pela escola politécnica da USP.

Endereço⁽¹⁾: Rua dos Jacintos, 15, Mirandópolis, CEP 04049-050 – Tel (11) 99270-7142 - e-mail: danielnering@gmail.com.

RESUMO

Um dos grandes problemas para a realização de medição de vazão em campo, é que frequentemente as condições da instalação não estão de acordo com as exigências de normas. Constantemente os pontos utilizados de medição são escolhidos por serem mais práticos, ou eventualmente, por serem os únicos pontos possíveis de serem acessados. Essa dificuldade se reflete muitas vezes em valores de vazão muito distantes da realidade e com incertezas grandes, causados principalmente pelas distorções nos perfis de velocidade. O presente artigo busca trazer uma modelagem matemática capaz de ajustar essas distorções nos perfis de velocidade de forma que os valores de vazão medidos não estejam tão sujeitos a tamanhas inconsistências. Essa modelagem matemática busca utilizar os pontos obtidos na medição para gerar um perfil de velocidades utilizando um algoritmo genético que irá buscar pelo perfil de velocidades que mais se aproxima da realidade, e realizar os cálculos de vazão em cima desse perfil gerado artificialmente. Os resultados dessa modelagem matemática é um valor de vazão que pode ser calculado de forma mais assertiva e com menores incertezas.

PALAVRAS-CHAVE: perfil de velocidades; tubo de Pitot, simulação de perfis de velocidade.

INTRODUÇÃO

Um dos grandes problemas para a realização de medição de vazão em campo, é que frequentemente as condições da instalação não estão de acordo com as exigências de normas.

É comum a seção de medição estar instalada mais próxima de singularidades do que o permitido pelas instruções normativas, e é especialmente grave no caso de tubulações de diâmetros maiores (acima de 800mm). Nessa situação de diâmetros grandes as normas todas estão com as distâncias requeridas erradas: como a rugosidade relativa se torna muito pequena para consumir componentes rotacionais do escoamento, pode-se ter uma influência grande na medição. Já foram relatados casos em que rotacionais se propagam a distâncias maiores que 130D da singularidade, enquanto normas exigem 10D ou 20D.

Outros fatores de perturbação nas medições de vazão podem ser a rugosidade elevada devido a incrustações e também a ausência de dados para escoamentos com números de Reynolds elevados, em tubulações de grande diâmetro.

Essas condições não adequadas podem provocar grandes distorções nos perfis de velocidade e estas distorções, além de aumentar a incerteza na medição, acabam tornando a velocidade média um estimador não muito preciso no cálculo da vazão.

Com o intuito de reduzir esse efeito da instalação não adequada, foi desenvolvido um algoritmo de ajuste teórico do perfil de velocidades, baseado no trabalho de SALAMI ⁽⁶⁾, capaz de ajustar perfis de velocidade gerados por uma equação aos dados medidos em campo.

OBJETIVO

O objetivo do presente trabalho é estudar possíveis modelagens matemáticas para reduzir as incertezas em torno da medição de vazão utilizando o tubo de Pitot em pontos da tubulação fora dos padrões ideais de medição.



ENSAIOS REALIZADOS

No trabalho “RUMO À MEDIÇÃO DE VAZÃO EM DUTOS SEM TRECHO RETO”, apresentado na FENASAN em 2020, foi mostrado um ensaio de medição de vazão realizado numa instalação sem trecho reto, com o auxílio de uma técnica de medição que empregava um medidor ultrassônico do tipo clamp on rotacionado em diversas posições radiais, conforme mostrado a seguir. Estes dados foram tratados nesse artigo com a técnica matemática desenvolvida por SALAMI ⁽⁶⁾, o que acrescenta mais um passo na direção de medição de vazão em condições difíceis.

O ensaio foi realizado com um medidor ultrassônico por “clamp on” em comparação com medição simultânea com tubo de Pitot, numa tubulação com topologia bastante complicada. 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, com o medidor ultrassônico instalado em 20 posições angulares diferentes, igualmente distribuídas ao longo do perímetro de uma seção transversal do conduto.

Como referência para comparação, em um trecho a montante foi realizado ensaio de vazão com tubo de Pitot. Assim, a partir destas medições, foi avaliado o desvio entre a vazão medida com o ultrassônico e o tubo de Pitot. Posteriormente foram realizadas simulações numéricas para comparar os resultados, apresentadas na sequência.



Fig. 1 – Tubulação de saída da 2ª bomba, conectando-se em “Y” com a tubulação onde estão instalados o Pitot (ressaltado em cor vermelha) e o medidor ultrassônico (tubulação inclinada, ao fundo). Deve ser observado que o escoamento entra na tubulação tronco após ser bombeado, passar por duas curvas, uma válvula e entrar via derivação em “Y”, bastante perturbado. Na figura é mostrada a saída de apenas uma das bombas, sendo que a outra está a 5 metros desta, em paralelo



Fig. 2 – Local de instalação do medidor ultrassônico. O escoamento vem de diversas singularidades a montante, mostradas na figura anterior, e passa por mais três curvas a jusante do Pitot.



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.

Para cada posição de medição com o macromedidor ultrassônico, foram registrados ou calculados os seguintes resultados:

- 1) A série temporal da vazão em m³/s.
- 2) A diferença relativa da vazão em torno da média em porcentagem, que é calculada por:

$$\bar{Q} = \frac{\sum_{i=1}^n \bar{Q}_i}{n}$$

Onde:

\bar{Q} : vazão média geral

n : número total de posições de medição

Por fim, os resultados de cálculo de vazão do tubo de Pitot e do medidor ultrassônico foram os seguintes:

Tabela 1: Resultados do ensaio com o tubo de Pitot e comparação com o medidor ultrassônico

Vazão Ensaio Pitot	0,566 m ³ /s
Incerteza Vazão Pitot	2,9 %
Vazão Média Geral US	0,541 m ³ /s
Diferença Relativa US-Pitot	-4,3%

Os resultados com o tubo de Pitot e o medidor ultrassônico foram comparados também com uma simulação numérica realizando utilizando-se CFD. Os resultados do CFD auxiliaram na compreensão das assimetrias do escoamento e como o perfil de velocidades pode ter impactado nas medições. Abaixo as comparações entre a medição com o tubo de Pitot e o perfil de velocidades utilizando-se o CFD

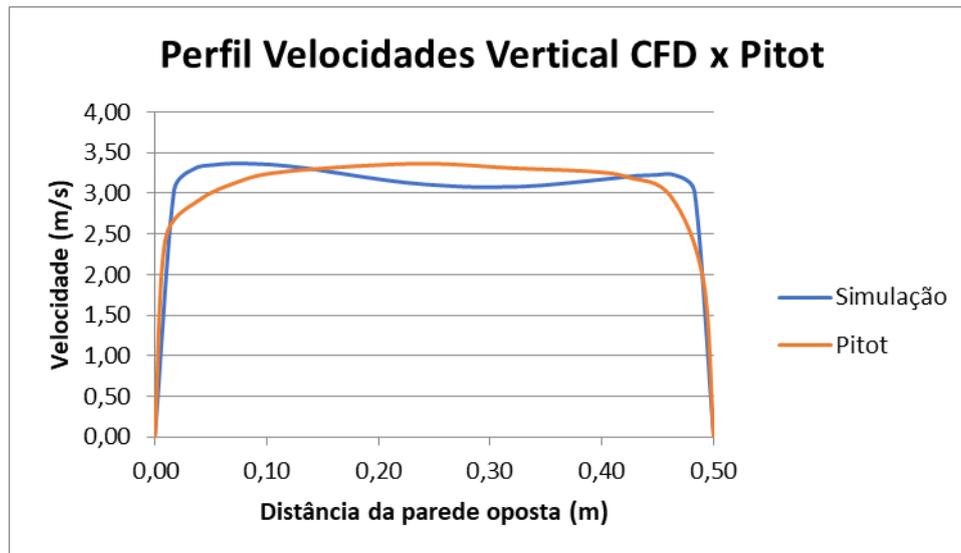


Figura 1: Comparação entre os perfis de velocidade obtidos com o CFD e com o Pitot

Os resultados do medidor ultrassônico e o CFD também foram comparados, e resultaram na figura abaixo, comparando a vazão calculada pelo CFD com a calculada pelo medidor ultrassônico:

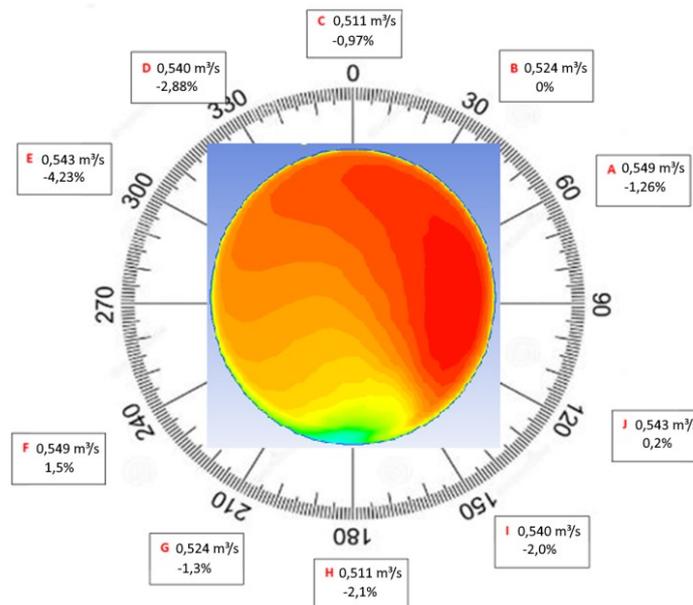


Figura 2: CFD x medição. Nas posições de medição, estão indicados os valores de vazão obtidos com o modelo numérico e da diferença percentual em relação à vazão medida com o ultrassônico. Deve ser ressaltada a excelente concordância dos resultados.

No presente artigo, será analisada novamente a medição com o tubo de Pitot, mas dessa vez, ao invés de compararmos com as medições com o medidor ultrassônico ou o CFD, iremos utilizar um método de correção matemática para escoamentos assimétricos, baseado no artigo de SALAMI ⁽¹⁾.



SIMULAÇÃO UTILIZANDO O MÉTODO DE ESCOAMENTOS ASSIMÉTRICOS

Para estimar qual a possível assimetria do perfil de velocidades na seção onde foi realizada a medição com o tubo de Pitot foi utilizado um método baseado no artigo de SALAMI ⁽⁶⁾. No artigo, o autor desenvolve um método para gerar perfis assimétricos adicionando-se fatores à equação de potencial normalmente utilizada para se modelar um perfil de velocidades simétrico.

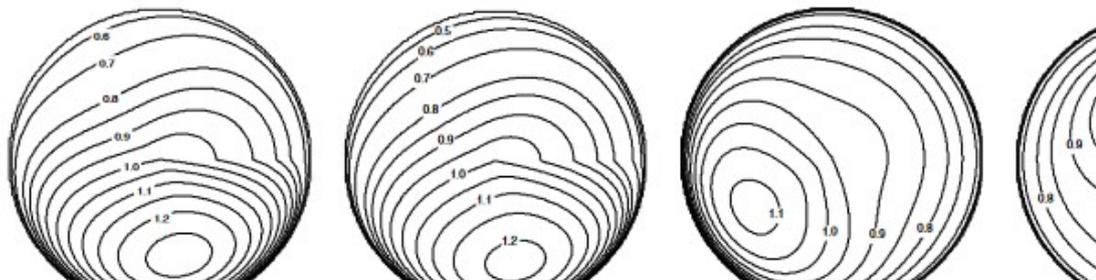


Figura 3: Perfis de velocidade assimétricos gerados pelo método analítico de Salami

O método utilizado no atual artigo se baseia nesses fatores de assimetria para criar um perfil assimétrico que mais se aproxima ao perfil medido pelo tubo de Pitot. Dessa forma, utilizam-se os dados de medição obtidos na com o tubo de Pitot e são geradas milhares de equações que vão tentar criar um perfil tridimensional que melhor se encaixe nos dados da medição.

Esse método pode gerar perfis assimétricos tridimensionais e, além disso, possibilita calcular a vazão através da integração da equação analítica proposta por Salami:

$$V = (1 - r)^{\frac{1}{n}} + m \cdot r \cdot (1 - r)^{\frac{1}{k}} \cdot f(\theta)$$

onde:

V: Velocidade em um determinado ponto;

r: Distância da parede da tubulação;

θ : Ângulo;

n: Fator da lei de potência;

m e k: Parâmetros adimensionais responsáveis pela geração do perfil assimétrico;

f(θ): Função responsável por alterar a assimetria em relação ao ângulo;

SALAMI ⁽⁶⁾ propôs diversos valores para n, m, k e f(θ), de forma a obter diversos perfis assimétricos. No entanto, esses parâmetros geram perfis de velocidade muito particulares, o que limita a sua utilização direta a apenas alguns tipos de modelos.

Como não se sabe a priori onde estão localizadas as assimetrias no perfil que está sendo medido, isto impede que uma escolha, principalmente da função f(θ), seja feita, o que torna muito difícil encontrar o perfil assimétrico gerado pela equação de SALAMI ⁽⁶⁾ que mais se assemelhe aos dados medidos.

Para resolver esses problemas, foram realizadas duas modificações no modelo proposto. A primeira modificação diz respeito à função f(θ), que precisa ser robusta o suficiente para que possa se adaptar ao maior número possível de perfis de velocidade, e a segunda modificação está relacionada ao cálculo dos parâmetros da equação.

A equação proposta para resolver esse problema e incluir todos os parâmetros propostos por SALAMI ⁽⁶⁾ está abaixo:

$$V = (1 - r)^{\frac{1}{n}} + m \cdot (1 - r)^{\frac{1}{k}} \cdot (r)^{\frac{1}{z}} \cdot (1 + p \cdot \text{sen}(\theta + a)) \cdot (1 + f \cdot \text{cos}(\theta + b))$$

Sendo n, m, k, z, p, a, f, b parâmetros adimensionais.

Para que os valores de velocidade teóricos estejam o mais próximo possível dos valores medidos, não basta apenas encontrar uma função f(θ) que seja capaz de se adequar a diferentes formas de perfis, mas também é necessário saber quais os valores para cada um dos parâmetros de V. Para encontrar esses parâmetros, foi desenvolvido um



algoritmo capaz de encontrar qual perfil de velocidades se adequa mais. Esse algoritmo é chamado na literatura de algoritmo genético.

O atual caso, como pode ser observado pela Eq. acima, é de grande complexidade. É uma função com diversos parâmetros variáveis (oito parâmetros adimensionais), com interações não lineares, além de grandes gradientes de velocidades próximos a parede. Portanto, é essencial que o algoritmo consiga combinar todos esses parâmetros de forma a encontrar a melhor solução possível.

De acordo com o trabalho de GOLDBERG [ADICIONAR REFERÊNCIA], o algoritmo genético é um método de otimização estocástico que se utiliza de uma analogia com a evolução natural, e, apesar de não ser um algoritmo rápido, apresenta uma robustez elevada, o que significa que é capaz de encontrar boas soluções, mesmo em casos complexos. Portanto, é de se esperar que o algoritmo genético, se bem elaborado, consiga encontrar a solução ótima para o problema, onde o menor desvio entre o perfil gerado e os valores medidos seja encontrado.

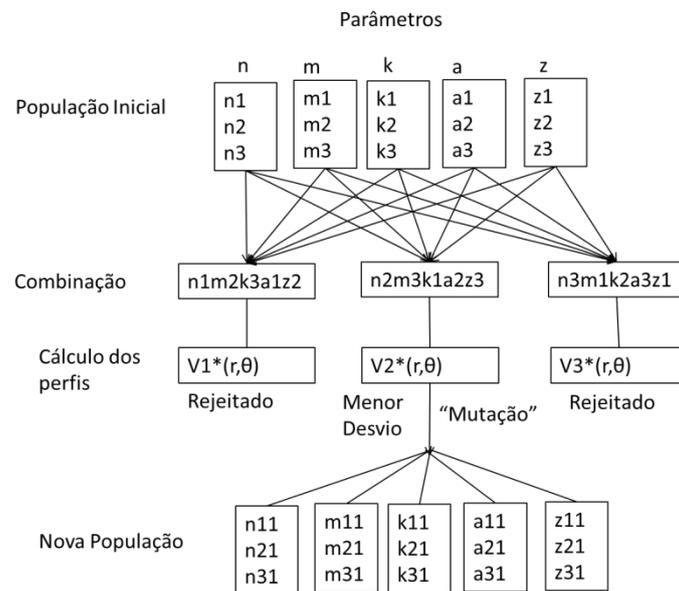


Figura 4: Exemplo funcionamento algoritmo genético

RESULTADOS SIMULADOS UTILIZANDO O MÉTODO DE ESCOAMENTOS ASSIMÉTRICOS

Para executar a equação de escoamentos assimétricos e o algoritmo genético para se obter o perfil assimétrico analítico foi utilizado o software Matlab

Ao executar o algoritmo chegou-se na convergência da equação ótima após cerca de 150 iterações, com um erro médio de 0,04% em relação aos dados da medição. A Figura a seguir mostra as curvas de velocidade obtidas com o perfil teórico calculado. O interessante dessa figura é que, apesar da medição com o tubo de Pitot mostrar um perfil praticamente simétrico, o algoritmo de perfis assimétricos consegue capturar os efeitos da distorção que existem de uma forma mais assertiva, além de fornecer uma visão tridimensional que não se limita unicamente à direção vertical. Essa assimetria também já foi demonstrada em estudos anteriores utilizando simulações numéricas.

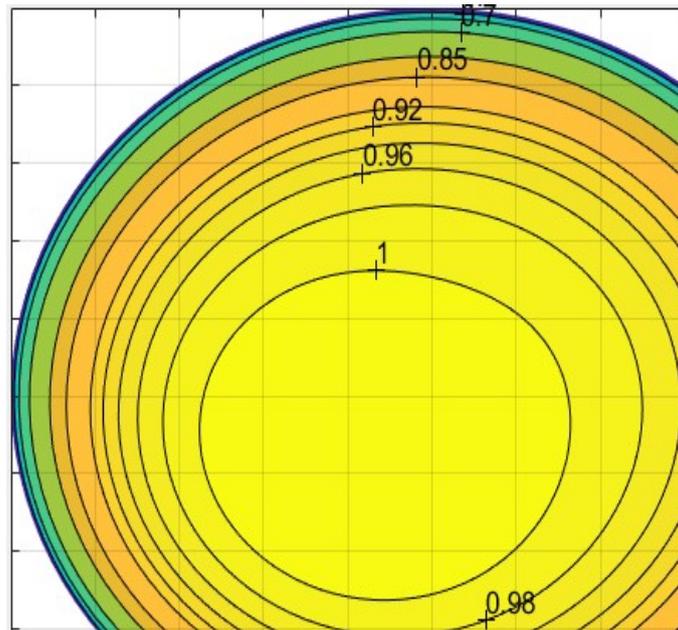


Figura 5: Curvas de velocidade do perfil teórico calculado pelo algoritmo genético

Olhando unicamente para o traverse vertical pode-se comparar o perfil teórico com o perfil medido pelo Pitot para observar de perto a precisão do algoritmo de escoamentos assimétricos. A maior diferença que se pode observar é que, próximo da parede os valores tendem a divergir de forma mais intensa. Isso ocorre por dois principais motivos: o primeiro é que a medição com o tubo de Pitot perto da parede é muito imprecisa e qualquer desvio no ponto de medição pode afetar fortemente o resultado devido aos gradientes de velocidade nessa região. Segundo o algoritmo se baseia no modelo de equações de potência para estimar as velocidades próximo a parede, o que em um caso real pode não ser muito preciso. Ainda assim, esses desvios inseridos na medição próximo a parede já estão inclusos no modelo e não afetam o valor final da vazão de forma considerável.

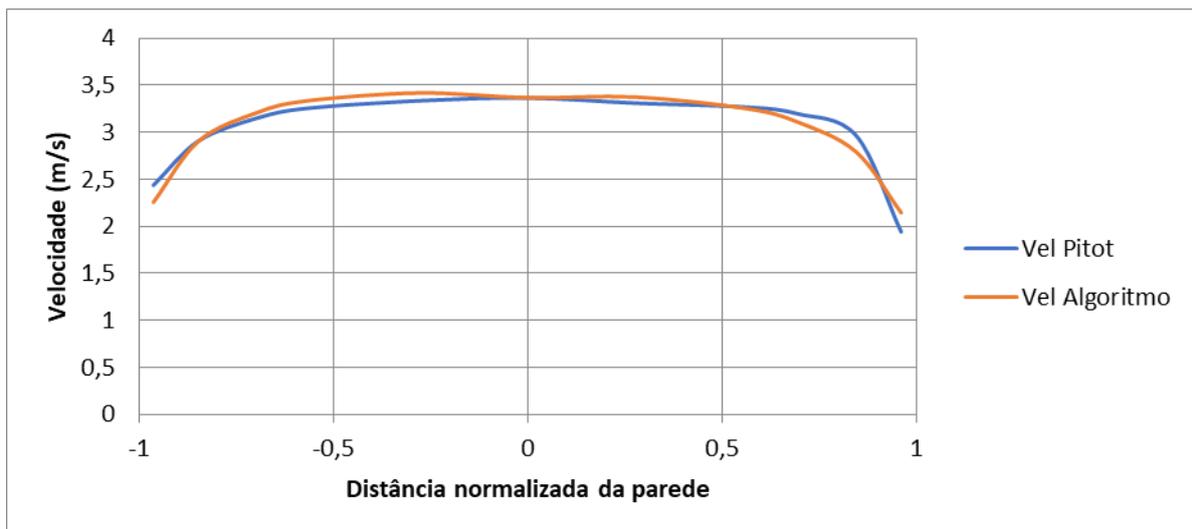


Fig. 18 - Perfis de velocidades medido com o tubo de Pitot e pelo algoritmo de escoamentos assimétricos

Finalmente, o método de escoamentos assimétricos permite que o cálculo da vazão seja realizado calculando a integral do perfil tridimensional. A vazão medida unicamente pelo tubo de Pitot foi de 0,566 m³/s, o que significa que o algoritmo encontrou um valor 6,2% maior do que calculado pela medição com o tubo de Pitot unicamente.



Esse resultado está em linha com nossos estudos anteriores que demonstram que o método utilizado para calcular vazão com o tubo de Pitot tende a subestimar o valor real, principalmente em escoamentos assimétricos.

Tabela 2: Valor de vazão medido pelo tubo de Pitot e sua incerteza

Vazão Ensaio Pitot	0,566 m ³ /s
Incerteza Vazão Pitot	2,90%

Tabela 3: Vazão calculada por diferentes métodos em comparação com o tubo de Pitot

Método	Vazão média	Diferença relação ao Pitot
Medidor Ultrassônico	0,541 m ³ /s	-4,3%
CFD - Base Ultrassônico	0,533 m ³ /s	-5,8%
CFD - Base Pitot (Vertical)	0,606 m ³ /s	7,1%
Método correção assimetria	0,601 m ³ /s	6,2%

Os valores de vazão calculados pelos diferentes métodos apresentaram valores bem distintos:

- O medidor ultrassônico foi utilizado em conjunto com o tubo de Pitot para medir a vazão e foi utilizado em diferentes traverses, por isso conseguiu capturar melhor os efeitos de assimetria do perfil. Esse estudo, feito em um artigo anteriormente publicado concluiu que: “O método empregado se mostrou muito adequado para a investigação de novas formas de medir vazão em situações diferentes das convencionais. O trabalho deverá ser continuado com outros testes em outras situações, até que se acumule conhecimento suficiente para estabelecer parâmetros de uso e faixas de incerteza confiáveis.
- O valor de vazão do CFD com base no ultrassônico partiu dos resultados da medição com o ultrassônico para realizar a simulação, e nos ajudou a entender como as assimetrias poderiam afetar a vazão medida pelo ultrassônico. O CFD ajudou a corroborar a conclusão que o ultrassônico utilizado em diversos traverses seria mais adequado para medição de vazão em casos não convencionais. Essa simulação foi realizada com o valor de vazão medido pelo ultrassônico como condição de entrada
- O valor de vazão do CFD com base no Pitot, utilizou o valor de vazão do tubo de Pitot como condição de entrada e também foi feito olhando-se apenas para o traverse vertical, mas com uma quantidade maior de pontos por traverse. Essa conclusão mostra que as distorções no perfil de velocidades no ponto de medição do tubo de Pitot são muito grandes a ponto do tubo de Pitot não conseguir capturar corretamente todos os efeitos no escoamento, o que pode produzir valores de vazão incorretos.
- Finalmente, a vazão calculada utilizando o método de correção de assimetria apresentado por esse artigo mostra um valor de vazão consideravelmente maior do que o apresentado pelo tubo de Pitot, confirmando a nossa hipótese de que o tubo de Pitot tende a subestimar o valor de vazão real do escoamento quando temos perfis assimétricos. O resultado que nos surpreende é que os valores de vazão ficaram muito próximos aos valores obtidos pelo CFD, que também é capaz de corrigir os problemas de assimetria.

CONCLUSÕES

A primeira conclusão que se pode chegar, e que já foi observada em nosso primeiro artigo, é que o medidor ultrassônico é mais adequado para medições de perfis assimétricos do que o tubo de Pitot. Principalmente quando o tubo de Pitot é utilizado em apenas um traverse e o ultrassônico em vários, como no caso apresentado.

A medição do tubo de Pitot realizada em apenas um traverse quando tem-se um perfil fortemente assimétrico significa que muita informação da assimetria pode, simplesmente, não ter sido capturada pelo tubo de Pitot. Isso mostra uma limitação do método de correção de perfis assimétricos: ele consegue extrapolar algumas assimetrias que existem no escoamento mas não é capaz de capturar efeitos muito acentuados, como vales ou picos de velocidades muito grandes. Isso significa que o método de correção de assimetria é mais eficiente quando têm-se mais um traverse medido pelo tubo de Pitot.

Outra possível solução para melhorar a medição do tubo de Pitot em tubulações com perfis de velocidade fortemente assimétricos é o aumento do número de pontos de medição com o tubo de Pitot. De forma geral, quanto mais informação o tubo de Pitot conseguir extrair do perfil de velocidades real, melhor. No entanto, esse método

pode enfrentar certos problemas práticos, principalmente em tubulações menores onde os pontos de medição fiquem muito próximos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ISO 3966. *Measurement of fluid flow in closed conduits – Velocity area method using Pitot static tubes*, International Organization for Standardization ,2008.
2. ISO 6416. *Hydrometry. Measurement of discharge by the ultrasonic (acoustic) method* ,2005.
3. SABESP. *Norma Técnica Sabesp NTS 280 – Calibração de macromedidores*, São Paulo, Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo, 2001.
4. ULTRAFLOW. *Medidor de vazão ultrassônico por tempo de trânsito - Manual*, Rev 11, 2017.
5. ISO 5168. *Measurement of fluid flow - Estimation of uncertainty of a flow rate measurement* International Organization for Standardization, 1978.
6. Salami L A 1971 Errors in the velocity-area method of measuring asymmetric flows in circular pipes University of Southampton Interim Report I