

PERFIS DE VELOCIDADES DISTORCIDOS NA MEDIÇÃO COM TUBO DE PITOT

Nome do autor principal⁽¹⁾

Danyllo de Lima Guedes⁽¹⁾

Engenheiro naval pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Áreas de conhecimento: medição de vazão, escoamento de fluidos, hidrodinâmica experimental e numérica.

Marcos Tadeu Pereira⁽²⁾

Professor Doutor em Engenharia Mecânica pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

Daniel Masiero Nering⁽³⁾

Engenheiro Mecânico pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

Olavo Alberto Prates Sachs

Engenheiro Sanitarista – PUCC; Engenheiro de Segurança do Trabalho – FAAP; MBA em Administração para Engenheiros – MAUA; Mestrado em Tecnologia Ambiental – IPT

Adauto Luiz Souza da Silva

Técnico mecânico, técnico em Sistema de Saneamento – Sabesp - MAGG

Andre Luiz dos Santos

Engenheiro Eletrico, encarregado – Sabesp - MAGG

Endereço⁽¹⁾: Fluido Análises- Análises, Tecnologia, Treinamento Ltda. Av. Baruel, 578 – Vila Baruel, São Paulo - SP, 02522-000 – Brasil, Tel: +55 (11) 97343-1827. e-mail: danylloguedes@gmail.com.

RESUMO

Este artigo busca discutir os efeitos da distorção no perfil de velocidades causado por singularidades na tubulação na medição de vazão utilizando tubos de Pitot.

PALAVRAS-CHAVE: medição de vazão; tubo de Pitot; incerteza na medição de vazão

INTRODUÇÃO

Como é do conhecimento, medir vazão é uma atividade que representa de certa forma a “caixa registradora” de empresas de saneamento: em última análise é a maneira técnica de como as empresas medem quanta água captam, quanto tratam, quanto enviam para os consumidores, quanto os consumidores recebem, e quanto perdem por vazamentos (por meio de balanços). Por isso medir vazão é importante e reduzir as incertezas na medição é uma busca ininterrupta.

Qualquer medição efetuada, de qualquer grandeza física, possui uma incerteza associada, o que também é válido para a medição de vazão. O que diferencia a medição de vazão de outras grandezas é sua complexidade e dificuldades associadas: é uma grandeza dinâmica (depende do tempo na sua definição: m^3/s); não possui padrão primário; há medidores muito grandes e que não podem ser retirados do campo para calibração periódica; fatores como turbulência, perfis de velocidade distorcidos por singularidades e mesmo rugosidade podem afetar de maneira muito importante a medição. Adicionalmente, mesmo que se calibre um medidor em laboratório, os efeitos do escoamento diferente no campo (em relação às condições em laboratório) frequentemente introduzem erros importantes a ponto de invalidar resultados mais finos.

Para complicar, medidores de grande porte que dependem de calibração no campo, são normalmente calibrados com tubos de Pitot, que geram incertezas da ordem de 2 a 2,5% no cálculo da vazão, enquanto um medidor como o eletromagnético ou ultrassônico de vários feixes podem teoricamente fornecer incertezas de 0,5%. Ao se realizar a calibração em campo, está se calibrando um medidor que pode atingir incertezas de 0,5% com um “padrão” (tubo de Pitot) que consegue quando muito 2,0% de incerteza, o que é muito estranho do ponto de vista matemático e das boas práticas da metrologia, mas talvez a única opção do ponto de vista das

possibilidades reais, da engenharia. Deve ser lembrado que normas recomendam padrões com no mínimo incertezas 2,5 vezes melhores que o instrumento sendo calibrado.

Com esse pano de fundo, a estimativa da incerteza da medição com o tubo de Pitot no processo de calibração é crítica na gestão de empresas, e deve-se fazer esforços para diminuir seu valor e melhorar os métodos de estimativa de incertezas.

Este artigo vai tratar de um dos aspectos mais importantes e pouco discutidos na medição com tubos de Pitot: a **existência de perfis de velocidades distorcidos e seus impactos possíveis na medição.**

SIMULAÇÃO DE PERFIS DE VELOCIDADE EM ESTAÇÃO DE BOMBEAMENTO

Para mostrar a importância da distorção de perfis de velocidade, esse artigo parte da simulação por CFD (Computational Fluid Dynamics) de uma estação de bombeamento de água de grande porte, com possibilidades de gerar vazões de $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$ em cada uma de suas 5 bombas. Serão simuladas vazões com uma, três e cinco bombas operando, verificando-se o perfil de velocidades no local da estação pitométrica.

Em um momento posterior, as simulações deverão ser comparadas com dados coletados através de medições realizadas com os medidores instalados. Estas simulações deverão servir de importante fonte de informações para melhorar o entendimento do escoamento ao longo das tubulações e, última análise reduzir incertezas de medições decorrentes de distorções nos perfis de velocidade.

Dados gerais

A partir das figuras e vista, forma adotadas as seguintes informações:

- Existem cinco bombas que retiram a água de um poço de sucção para uma tubulação de 30''
- As cinco tubulações alimentadas pela bomba levam a uma tubulação principal de 84''
- Essa tubulação nominal eleva a água para um ponto de cota mais elevada, onde está instalado o medidor de vazão atual

As características das bombas são apresentadas na tabela 1 a seguir.

Tabela 1 – Dados das bombas

BOMBA	
Vazão:	$1,5 \text{ m}^3/\text{s}$
Altura manométrica:	365 mca
Pressão sucção	$1 \text{ kgf}/\text{cm}^2$
Pressão recalque	$37,5 \text{ kgf}/\text{cm}^2$

Premissas e modelos admitidos

Para realizar a simulação numérica algumas premissas, simplificações e adequações tiveram que ser realizadas:

- Foi considerado que a vazão de saída de cada uma das bombas é a vazão nominal de $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$, e que essa vazão é constante. Um regime transitório poderia ser admitido, mas não é conhecido o comportamento da bomba ao longo do tempo e também não haveria grandes alterações no perfil de velocidade obtido.
- Foi considerado que a tubulação é de aço e que ela é relativamente nova, com poucas incrustações. Foi considerado um coeficiente de rugosidade de 0,010.
- Foi utilizado o modelo $k-\omega$ SST de turbulência. Esse modelo é adequado para esse tipo de simulação, principalmente pela dificuldade de simular o comportamento quando as cinco bombas estão em funcionamento e os escoamentos se juntam na tubulação principal.
- Para reduzir esforço computacional a simulação foi realizada em duas etapas:
 - Primeiro, foi simulado o escoamento de uma bomba até a tubulação principal. Como a topologia da tubulação após cada uma das bombas é praticamente idêntica, essa

simulação facilita a modelagem. Todas as informações de pressão, velocidade e turbulência são exportados para criar um perfil na entrada do escoamento para a tubulação principal. O diâmetro da tubulação é de 0,8m e o seu comprimento até a tubulação principal é de aproximadamente 25m

- A tubulação principal é simulada com até cinco bombas em funcionamento, importando o perfil obtido na primeira simulação em cada um dos cinco pontos como condição de entrada. Como a tubulação principal tem fortes efeitos de turbulência e vorticidade devido a combinação dos cinco escoamentos (considerando as cinco bombas em funcionamento) essa simplificação se mostrou adequada.
- O diâmetro da tubulação principal é de 2m e seu comprimento total é de aproximadamente 150m

A topologia de cada simulação tem o aspecto mostrado nas figuras 1 e 2.

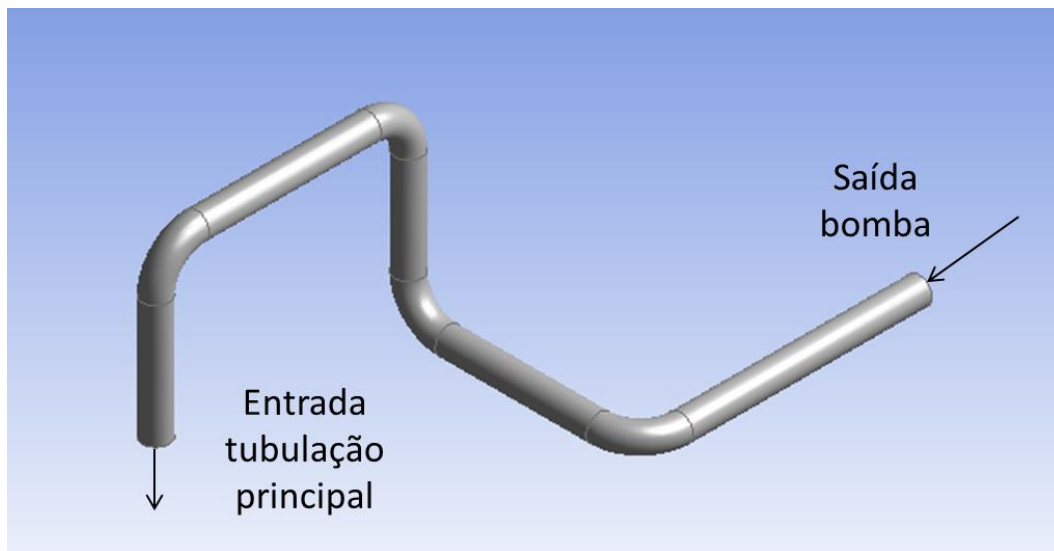


Figura 1 – Topologia da saída de cada bomba até a entrada no distribuidor.

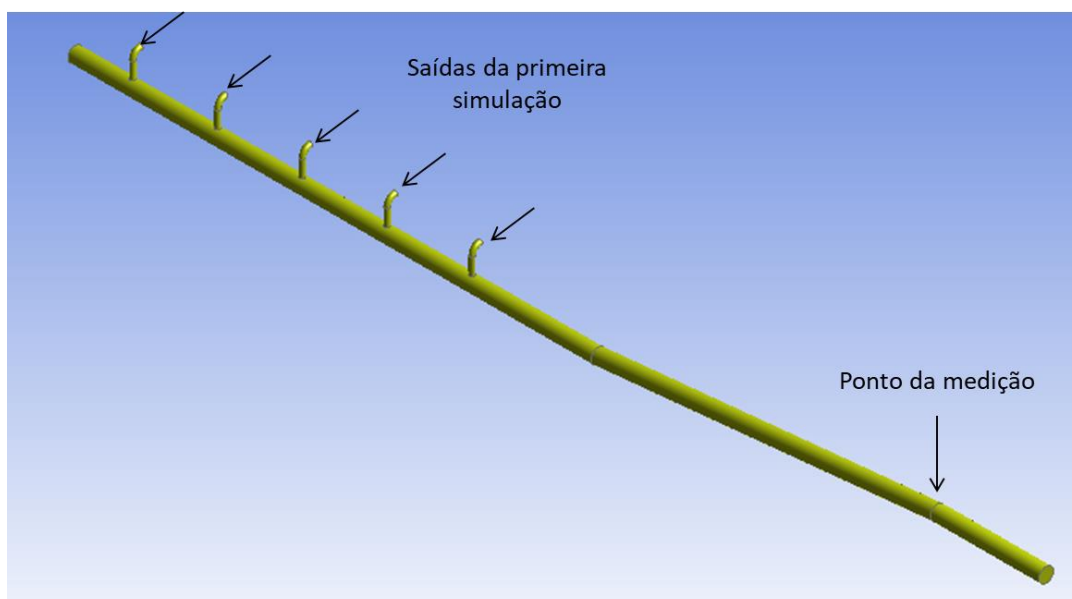


Figura 2 – Topologia da tubulação no distribuidor e ponto de medição. Diâmetro de 2m e comprimento aproximado de 150m.

Foram simuladas três diferentes situações de funcionamento, com cinco, três, e uma bomba em funcionamento. Essas três situações foram simuladas com o objetivo de estudar o impacto que diferentes configurações de bombeamento podem ter no ponto de medição.

Espera-se que esse impacto decorra tanto da variação no número de Reynolds quanto porque as cinco bombas em funcionamento produzem cinco escoamentos que se encontram em pontos diferentes, impactando na vorticidade e na distorção do perfil de velocidades. No caso com cinco bombas o número de Reynolds é cerca de $4,48 \times 10^6$ enquanto para o caso com uma bomba é de $8,95 \times 10^5$.

A análise foi realizada com os perfis de velocidades (axiais) em cada uma das três situações, e também das velocidades tangenciais, que representam de certa forma a vorticidade no interior da tubulação.

Para os perfis de velocidade foram analisadas 4 direções: vertical, horizontal, a 45° e a 135° . Essa análise é essencial para comparar os perfis de velocidades com possíveis medições de tubos de Pitot e Ultrassônicos do tipo “clamp on”, e avaliar possíveis erros que a distorção no campo de velocidades pode trazer.

RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

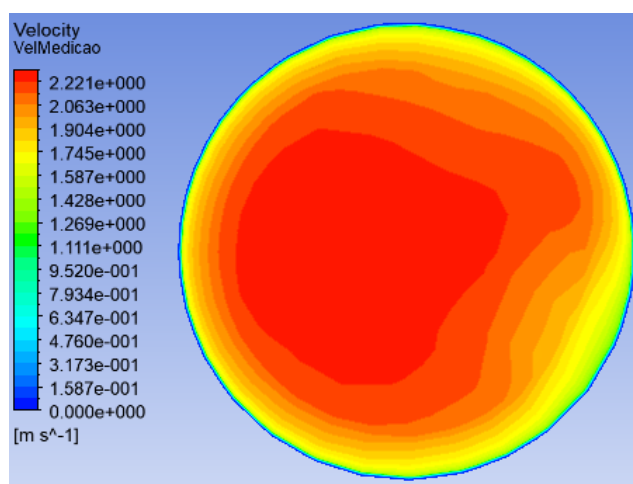


Figura 3 - Perfil de velocidades no ponto de medição (apontado na figura 2) com cinco bombas em funcionamento

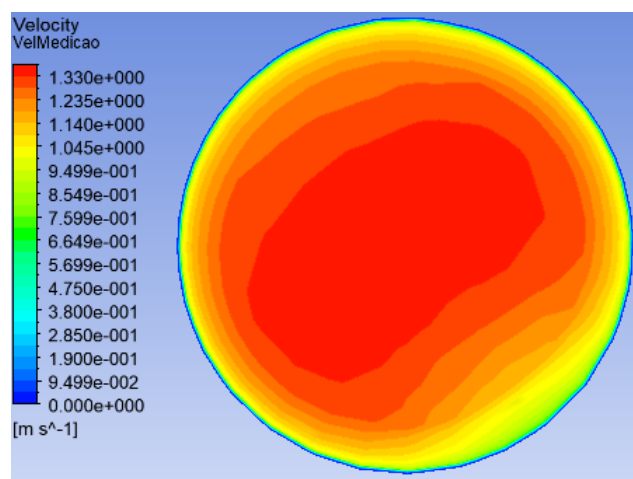


Figura 4 - Perfil de velocidades com três bombas em funcionamento

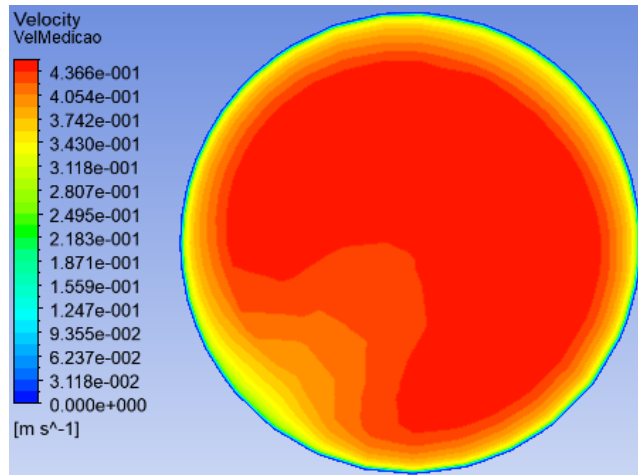


Figura 5 - Perfil de velocidades com uma bomba em funcionamento

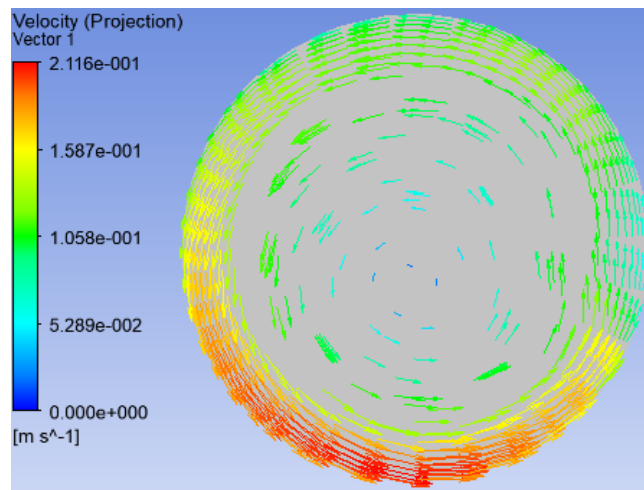


Figura 6 - Velocidades tangenciais no ponto de medição com cinco bombas em funcionamento

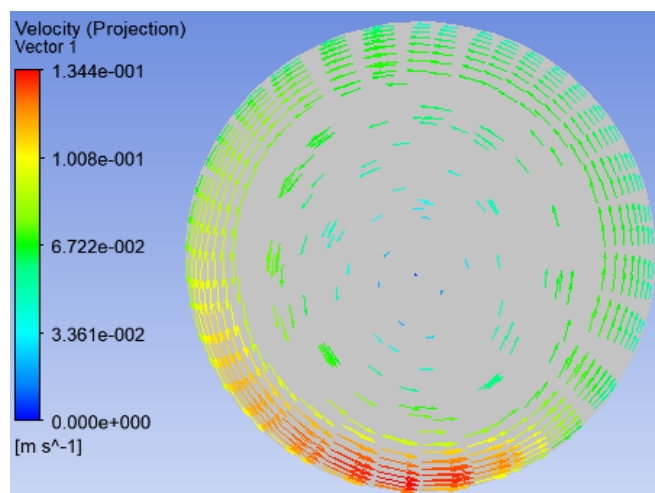


Figura 7 - Velocidades tangenciais com três bombas em funcionamento

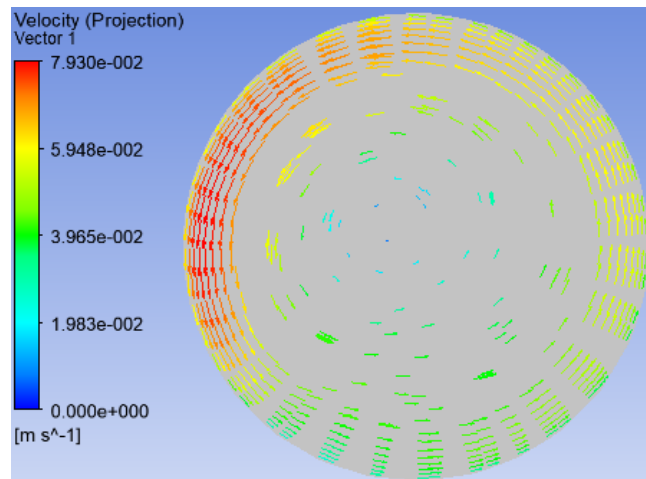


Figura 8 - Velocidades tangenciais com uma bomba em funcionamento

As figuras 3; 4 e 5 (perfis de velocidades axiais) mostram claramente como os perfis de velocidade podem se alterar de maneira significativa com a variação da velocidade média e como são deformados pelas singularidades a montante do ponto de medição, mesmo que as singularidades estejam situadas, como essas, a grande distância do ponto de medição.

SIMULAÇÃO DE TRAVERSES EM 3 EIXOS

A seguir são apresentados os resultados das simulações dos resultados que seriam obtidos se fossem realizados traverses com tubos de Pitot nas direções horizontal, vertical e a 45°, que são as possibilidades clássicas de posicionamento de tubos de Pitot. O objetivo é verificar como o perfil de velocidades pode influenciar o resultado da medição de vazão.

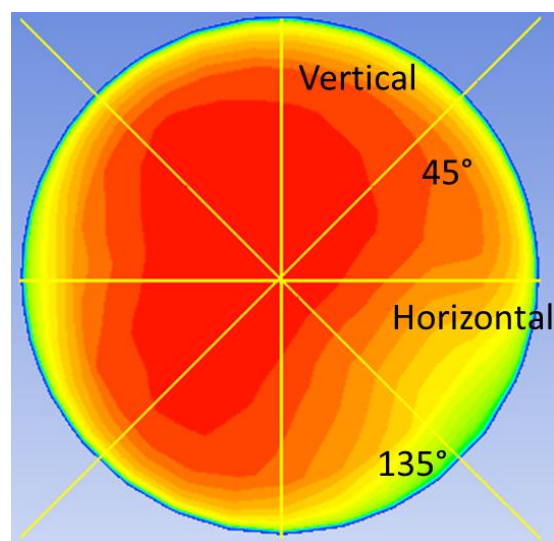


Figura 9 – Exemplo de posicionamento dos traverses na tubulação para averiguar o perfil de velocidade

A figura seguinte representa uma simulação do perfil de velocidades que seia encontrado ao fazer o traverse do tubo de Pitot.

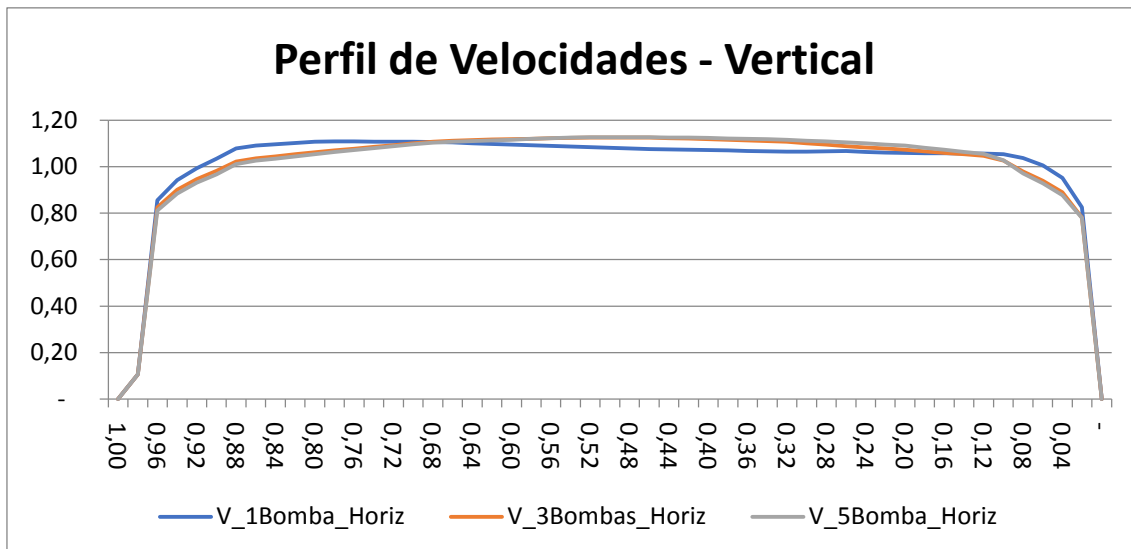


Figura 10 – Simulação do perfil de velocidades ao longo do traverse vertical, para três vazões diferentes.

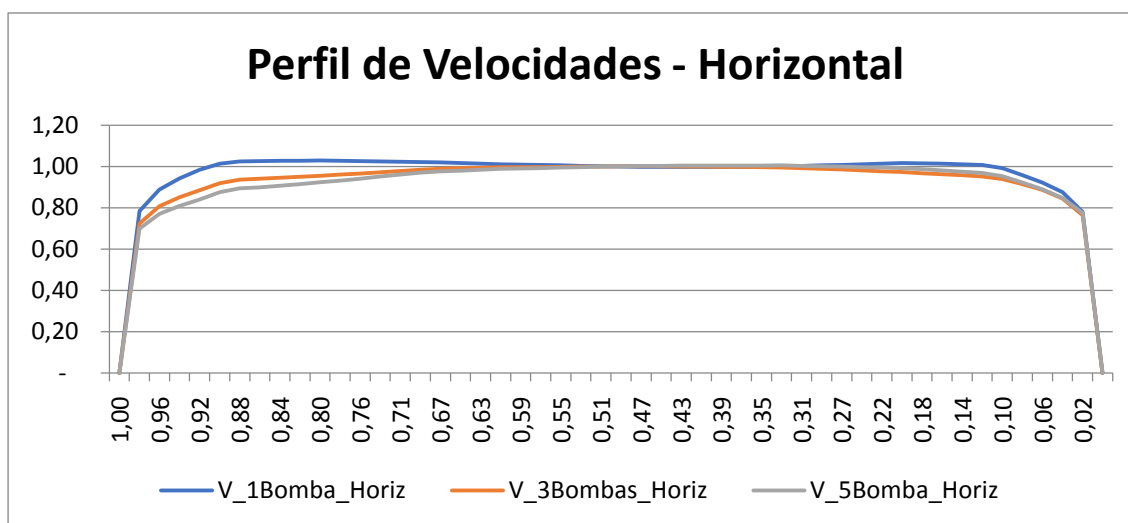


Figura 11 – Simulação do perfil de velocidades ao longo do traverse horizontal, para três vazões diferentes.

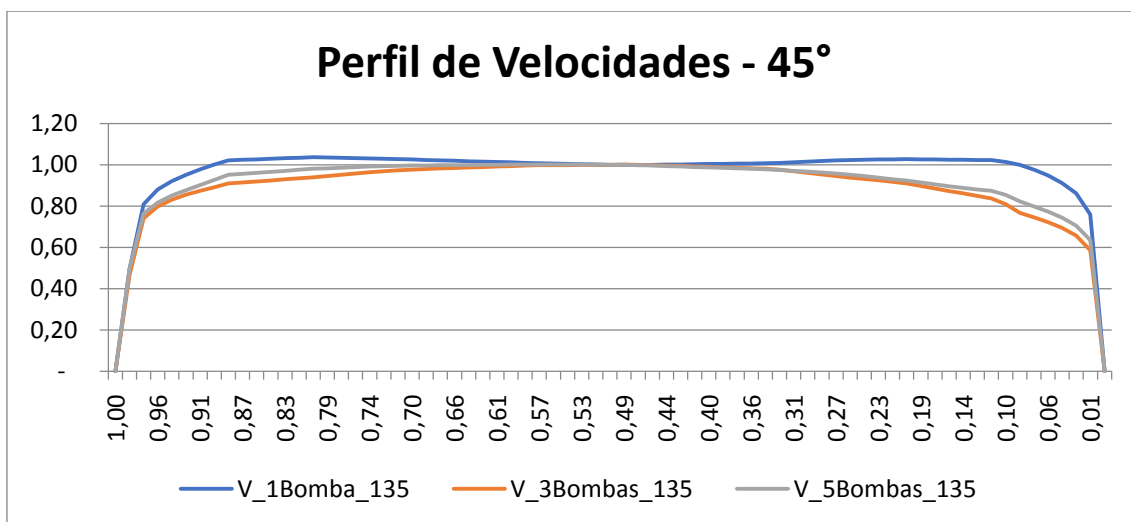


Figura 12 – Simulação do perfil de velocidades ao longo do traverse a 45°, para três vazões diferentes.

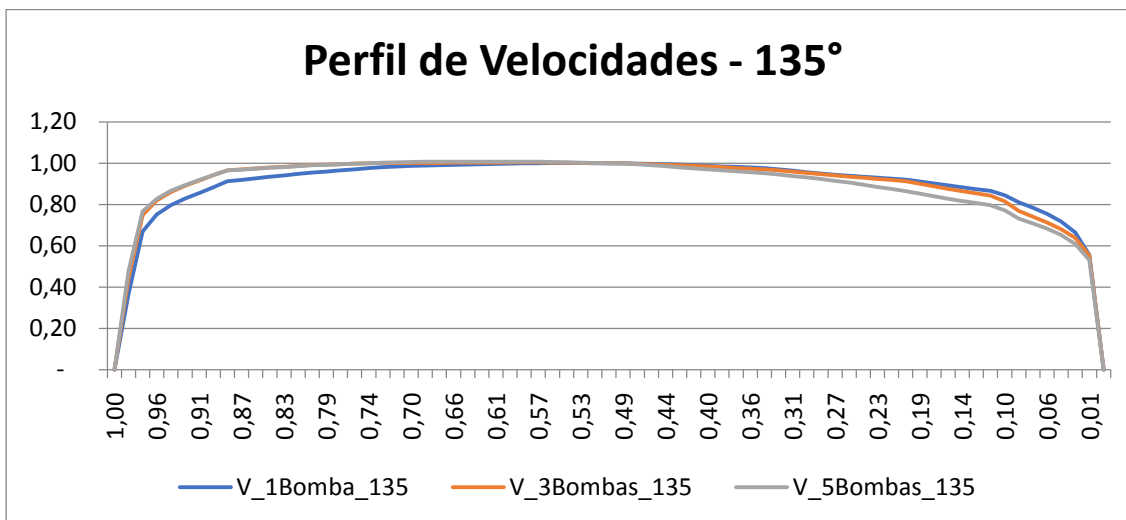


Figura 16 - Perfil de velocidades ao longo do traverse.

ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os perfis de velocidades mostram que existe uma diferença pronunciada de distorção entre os três cenários com vazões diferentes.

Com cinco bombas em funcionamento o perfil de velocidades está bem distorcido, mesmo com a relativa grande distância entre a última singularidade no escoamento e o ponto de medição. Isso ocorre pois o número de Reynolds é elevado, a tubulação possui diâmetro grande, e também por causa das cinco singularidades onde os escoamentos de encontram na tubulação principal, no distribuidor, que introduzem uma severa perturbação.

Em cada singularidade ocorre um incremento na vorticidade e aumento da turbulência. Devido ao número de Reynolds mais elevado esses efeitos se propagam por distâncias muito grandes, impactando o ponto de medição, e a rugosidade da tubulação é muito pequena face ao diâmetro, incapaz de consumir energia do escoamento em valor suficiente para abrandar as perturbações.

Por fim, outro comportamento que consegue ser observado é que nos casos com uma e três bombas em funcionamento o perfil de velocidades se aproxima mais de uma parábola do que o caso com cinco bombas. Isso é de se esperar pois escoamentos com números de Reynolds mais baixos tendem a ter um perfil de velocidade mais parabólico, e a medida que o número de Reynolds se eleva o perfil de velocidades se torna mais achatado.

Observando as velocidades tangenciais é possível concluir que elas são mais intensas no caso com cinco bombas do que com apenas uma bomba em funcionamento. Proporcionalmente, inclusive, o caso com uma bomba apresenta uma velocidade tangencial ainda maior do que no caso com cinco bombas. A tabela 2 mostra o quanto a velocidade tangencial máxima ainda pode representar em relação ao módulo da velocidade máxima:

Tabela 2: Proporção da velocidade tangencial (m/s)

	V_Max	Vtang_Max	Proporção
5 Bombas	2,221	0,212	9,5%
3 Bombas	1,330	0,134	10,1%
1 Bomba	0,437	0,079	18,2%

De acordo com a Tabela 2, pode-se observar que no caso com cinco bombas em funcionamento a velocidade tangencial pode representar cerca de 10% da velocidade total. Isso mostra o quanto o perfil de velocidades ainda não está completamente desenvolvido. No caso com uma bomba, a proporção de 18,2% da velocidade tangencial pode representar a baixa dissipação que ocorre, por conta da velocidade mais baixa no conduto.

Para analisar os perfis nos diferentes traverses, horizontal, vertical, 45°, e 135°, foram geradas tabelas para avaliar o quanto de distorção uma medição em cada uma dessas direções é produzida. Foram obtidas quatro velocidades para realizar essa avaliação, similar ao método de medição com um tubo de Pitot:

- A velocidade central;
- A velocidade média;
- A velocidade média da parede do tubo até o centro (Seção 1);
- A velocidade média do centro até a parede oposta do tubo (Seção 2)

Os resultados estão mostrados na tabela a seguir.

Tabela 3: Distorções de velocidade traverse Vertical

Vertical	1 Bomba	3 Bombas	5 Bombas
V_Central	0,404	1,226	2,034
V_Media	0,421	1,276	2,117
V_Medio_Seção1	0,401	1,200	1,978
V_Medio_Seção2	0,406	1,246	2,080
Distorção Máxima	1,32%	3,88%	5,19%

Tabela 4: Distorções de velocidade traverse Horizontal

Horizontal	1 Bomba	3 Bombas	5 Bombas
V_Central	0,437	1,376	2,288
V_Media	0,433	1,313	2,169
V_Medio_Seção1	0,419	1,251	2,031
V_Medio_Seção2	0,413	1,270	2,134
Distorção Máxima	1,43%	1,50%	5,09%

Tabela 5: Distorções de velocidade traverse a 135°

135°	1 Bomba	3 Bombas	5 Bombas
V_Central	0,436	1,379	2,293
V_Media	0,433	1,260	2,140
V_Medio_Seção1	0,419	1,243	2,117
V_Medio_Seção2	0,422	1,202	2,037
Distorção Máxima	0,74%	3,43%	3,96%

Tabela 6: Distorções de velocidade traverse a 45°

45°	1 Bomba	3 Bombas	5 Bombas
V_Central	0,436	1,379	2,292
V_Media	0,420	1,318	2,174
V_Medio_Seção1	0,417	1,271	2,077
V_Medio_Seção2	0,398	1,289	2,143
Distorção Máxima	4,74%	1,41%	3,16%

Analisando os resultados das tabelas 3 a 6, é possível observar algumas das conclusões obtidas com a análise das figuras dos contornos de velocidade. No caso com uma bomba a distorção é relativamente menor do que nos outros casos, exceto para o traverse a 45°, onde a distorção é bem elevada. No caso com 3 bombas as distorções maiores estão na vertical e a 135°. E no caso com cinco bombas, as distorções foram as maiores em ordem de grandeza, sendo um pouco menor a 45°.

Calculando a vazão utilizando o mesmo método utilizado ao se calcular a vazão com um tubo de Pitot para cada um dos traverses têm-se os seguintes resultados:

Tabela 7: Vazões calculadas para os traverses

m ³ /s	1 Bomba	3 Bombas	5 Bombas
Vazão Nominal	1,500	4,500	7,500
Vertical	1,504	4,562	7,569
Horizontal	1,549	4,694	7,756
45°	1,500	4,714	7,771
135°	1,548	4,506	7,652

Tabela 8: Variação percentual das vazões para cada traverse

%	1 Bomba	3 Bombas	5 Bombas
Vazão Nominal	1,500	4,500	7,500
Vertical	0,26%	1,38%	0,93%
Horizontal	3,28%	4,31%	3,41%
45°	0,03%	4,75%	3,62%
135°	3,18%	0,13%	2,03%

Em todos os casos observados é possível observar que o método de cálculo que é utilizado ao calcular a vazão com o tubo de Pitot introduz um erro na vazão, sempre superestimando o valor real de vazão. Esse erro reduz à medida que o número de Reynolds sobe, mas desde que o perfil esteja completamente desenvolvido.

O resumo pode ser encontrado na Tabela 9.

Tabela 9: Resumo do cálculo das vazões pelo método dos traverses

Máximo	3,28%	4,75%	3,62%
Mínimo	0,03%	0,13%	0,93%
Melhor opção	45°	135°	Vertical

Pior opção	Horizontal	45°	135°
------------	------------	-----	------

A “melhor opção” seria o traverse com a menor variação da vazão calculada para a vazão nominal. Em cada caso, com uma, três ou cinco bombas, o traverse “ótimo” varia, sendo que não existe uma solução óbvia para o caso e dependeria da configuração das bombas em uma situação real. No entanto, na média o traverse Vertical apresenta a menor distorção no cálculo de vazão (0,86%), além de ser o traverse ótimo para o caso com cinco bombas. Isso ocorre pois o traverse vertical seria o melhor para capturar os efeitos de distorções provocados pelo escoamento.

Portanto, caso seja possível, um tubo de Pitot deveria estar posicionado verticalmente em relação ao plano do solo para trazer os resultados mais consistentes e com menores erros. Caso não seja possível, o segundo melhor posicionamento seria à 135°. Caso seja possível, a utilização de dois traverses à 90° entre eles traria resultados ainda melhores.

CONCLUSÕES

Foi mostrado por meio de simulações digitais de situações reais de medições com tubos de Pitot, que perfis distorcidos podem representar problemas, mas podem ser estudados e permitir correções para diminuir as incertezas de medição.

A simulação digital ainda não está em um estágio em que se possa confiar plenamente em termos metrológicos, havendo a necessidade de experimentos controlados para situações comuns, e depois de um período de validação de resultados em campo. Há a necessidade de experimentos controlados com medições com Pitot e comparação com simulação para algumas geometrias básicas de perturbação a montante e a jusante, como curvas, reduções e válvulas.

O importante é que estes resultados preliminares mostram muito claramente que mesmo medições com perfis muito distorcidos podem ser tratadas e aproveitadas, o que pode acabar levando a medição a um novo patamar: não haverá casos impossíveis de tratar. Deve-se sem dúvida melhorar o método, deve-se trabalhar para incorporar a simulação na análise de incerteza (o que vai consumir um certo esforço), mas o caminho é claro à frente.

Não se pode esquecer que para a Mecânica dos Fluidos de escoamentos incompressíveis se é conhecido o campo de velocidades, todas as informações importantes podem ser resolvidas. A equação mais completa da área, que é a equação de Navier-Stokes, trata de um conjunto de derivadas parciais das velocidades, e se o campo de velocidades for conhecido, como nessa mistura de medições com tubo de Pitot e simulação digital, os resultados podem ser extraordinariamente melhorados.

Os próximos passos do projeto se concentram justamente na realização de mais medições com Pitot e simulações, para validar resultados e avançar na análise da incerteza.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. SALAMI, L A Errors in the velocity-area method of measuring asymmetric flows in circular pipes University of Southampton Interim Report I, 1971