

RUMO À MEDIÇÃO DE VAZÃO EM DUTOS SEM TRECHO RETO

RESUMO

O artigo descreve um experimento dentro de um projeto de longa duração que investiga possibilidades de medir vazão em sistemas de saneamento onde as orientações descritas em normas não podem ser obedecidas, e também busca investigar métodos alternativos ao uso do Pitot tipo Cole nas calibrações em campo. Foram realizadas medições em um trecho de duto com muitas singularidades próximas, por meio de um medidor ultrassônico do tipo *clamp on* colocado em vinte posições diferentes em um mesmo perímetro, comparado com medições realizadas com um Pitot Cole e investigadas com simulação digital por meio do código Ansys. Os resultados mostraram possibilidades muito boas, com diferenças pequenas entre os métodos, apesar das condições muito ruins para a medição, sem trechos retos e com flutuação de vazão com amplitude de $\pm 3,0\%$.

PALAVRAS-CHAVE: simulação digital de medição de vazão, medição com ultrassônico *clamp on*, medição de vazão em dutos.

INTRODUÇÃO

Sistemas de distribuição de água por empresas de saneamento costumam ser grandes e cada vez mais necessitam de controle metrológico de volumes de água transferidos, seja pelos custos envolvidos, pelo gerenciamento das vazões, pelo controle de perdas ou simplesmente por conta de processos de compra e venda de água. Geralmente são instalados medidores de grande porte (tubos de Venturi, eletromagnéticos, ultrassônicos, etc.) e que quase sempre não podem ser retirados para calibração. A alternativa é a calibração em campo, geralmente realizada com o uso de tubo de Pitot tipo Cole. Tanto para a medição com o medidor de grande porte como para a medição com o Pitot há a exigência de trechos retos, ou seja, devem-se ter escoamentos bem desenvolvidos, sem distorções do perfil de velocidades ou perturbações rotacionais. E, em muitas situações, não se tem trechos retos suficientes, o trecho recomendado pelas normas não assegura um perfil adequado ou se está próximo de sistemas de bombeamento que perturbam bastante o escoamento, ou ainda o diâmetro da tubulação é grande e escoamentos secundários podem se desenvolver. Dutos de grande diâmetro também podem exigir trechos retos muito maiores, devido ao menor impacto da perda de energia na “correção” dos perfis de velocidade. Foi então iniciado um projeto entre a SABESP e consultores, visando estudar e desenvolver novas formas de abordagem de medição de vazão em situações não ideais, utilizando um novo método de utilização de medidor ultrassônico aliado à simulação digital, que leva em consideração a topologia da tubulação.

OBJETIVO

O objetivo do trabalho é mostrar os resultados iniciais de uma investigação mais ampla sobre possibilidades de medir vazão em sistemas de saneamento onde não seja possível seguir as orientações descritas em normas, bem como investigar métodos alternativos ao uso do Pitot tipo Cole nas calibrações em campo.

MÉTODO

Foi escolhida uma antiga instalação da Sabesp que possuía uma estação Pitométrica já instalada, e com um sistema de tubulações bastante complexo, praticamente sem trechos retos e com duas bombas em paralelo, tudo em um espaço bem pequeno. As tubulações foram medidas e escolhido um local para a instalação de um medidor ultrassônico do tipo *clamp on*, conforme mostrado nas figuras em seguida.

Ensaio realizado

O ensaio foi parte do processo de avaliação do uso de um medidor ultrassônico por “clamp on” em substituição a uma medição com tubo de Pitot, especialmente em condições de tubulação com topologia 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.

O medidor ultrassônico utilizado é do tipo Clamp-on, baseado no princípio de medição da diferença de tempo de trânsito. Este medidor é composto por dois transdutores que são acoplados na parede externa da tubulação que emitem e recebem pulsos de ultrassom. A diferença dos tempos que a onda sonora leva para percorrer de um transdutor para o outro, no sentido a montante e a jusante, está relacionada diretamente com o valor da vazão.

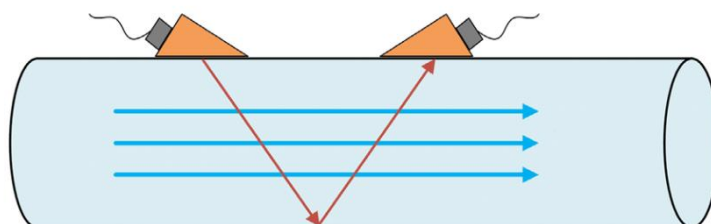


Fig. 1 - Os transdutores foram montados em modo V, que consiste em instalar os transdutores orientados axialmente na superfície da tubulação, e fazer a onda sonora atravessar o conduto por duas vezes.

Os ensaios foram acompanhados com medições com um tubo de Pitot do tipo Cole, com o perfil de velocidades determinado em um traverse vertical para o cálculo da vazão. A seguir, são apresentadas fotos da tubulação na região onde os medidores foram instalados.



Fig. 2 – 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. 3 – 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. 4 – Medidor ultrassônico instalado.



Fig. 5 – 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.

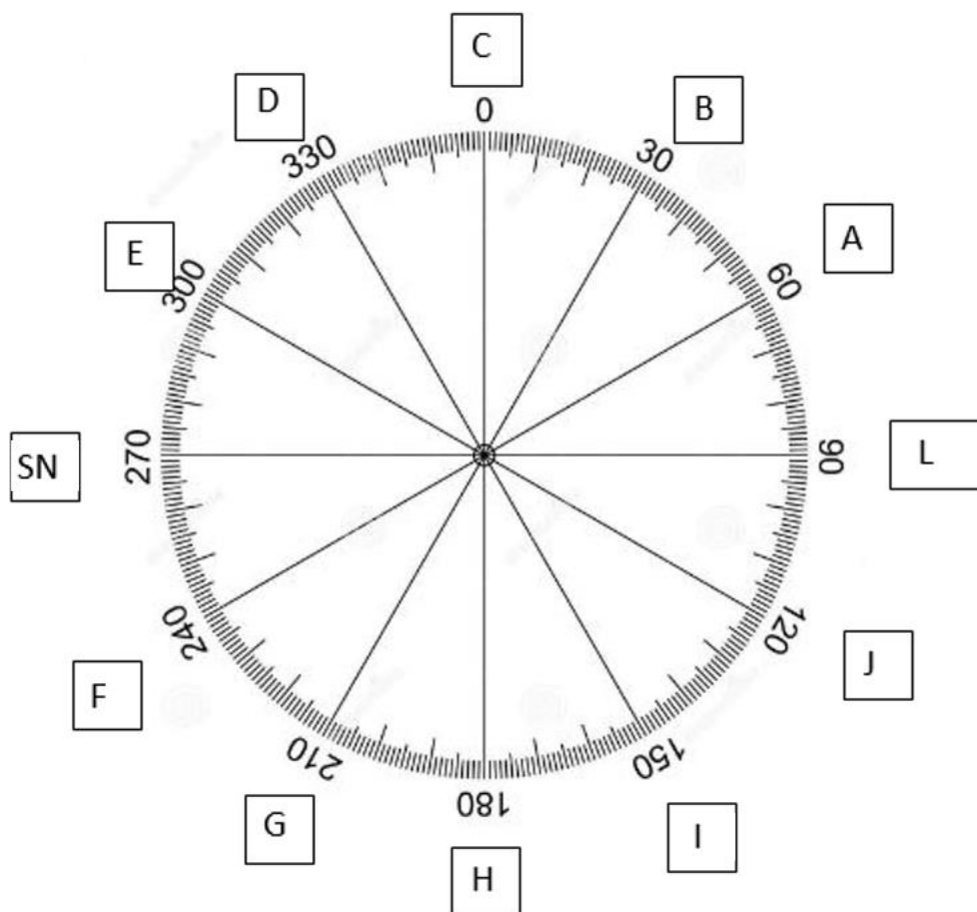


Fig. 6- Convenção adotada para os diversos posicionamentos radiais dos sensores do ultrassom. A figura mostra a visão de quem olha o escoamento saindo da seção, olhando do campo de medição do ultrassom para as bombas. Posições olhando de jusante para montante, C na parte superior. Posições L e SN com cordão de solda, sem possibilidades de fazer medições

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

- 1) A série temporal da vazão em m^3/s .
- 2) A diferença relativa da vazão em torno da média em porcentagem, que é calculada por:

$$Dif. Relativa (\%) = \frac{Q_i(t) - \bar{Q}_i}{\bar{Q}_i} * (100\%),$$

$$\text{Onde: } \bar{Q}_i = \frac{\sum_{j=1}^{N_i} Q_i(t_j)}{N_i}$$

$Q_i(t_j)$: registro da vazão na posição i no j -ésimo instante de tempo.

N_i : quantidade de registros de vazão aquisitados

Simulação numérica realizada

Para estimar qual é o perfil de velocidades na seção do medidor eletromagnético da estação consolação foi realizado um trabalho de simulação numérica utilizando o software ANSYS Fluent.

Devido à complexidade da geometria, e para poupar recursos computacionais, a tubulação foi dividida em duas partes: a primeira parte corresponde à tubulação desde a saída da bomba até o ponto de medição do tubo de Pitot; a segunda parte corresponde à tubulação do ponto de medição do tubo de Pitot até a saída da estação. Para manter a veracidade dos dados, é necessário que o perfil de velocidades seja exportado da primeira parte para a segunda. Dessa forma, quando for analisada a seção do ponto de medição do ultrassônico o perfil de velocidades estará o mais próximo possível da realidade.

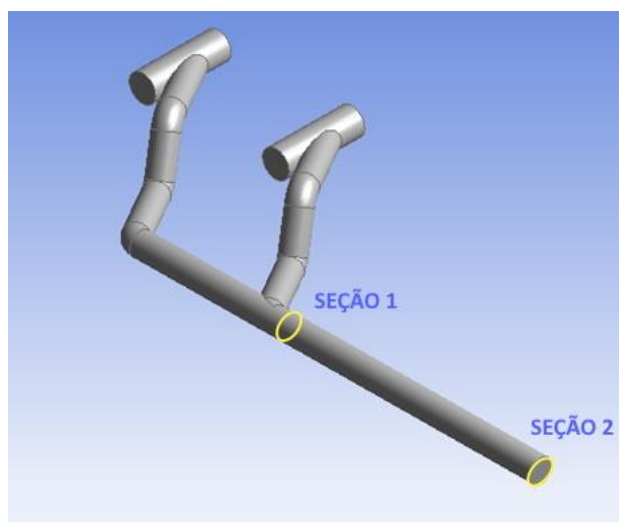


Fig. 7 - Parte 1 da simulação do modelo de tubulação, onde foi realizada a medição com tubo de Pitot. O contorno amarelo marcado como seção 2 indica a posição do tubo de Pitot Cole. Para a seção 1, logo após a junção do escoamento das duas bombas, também foi realizada simulação digital.

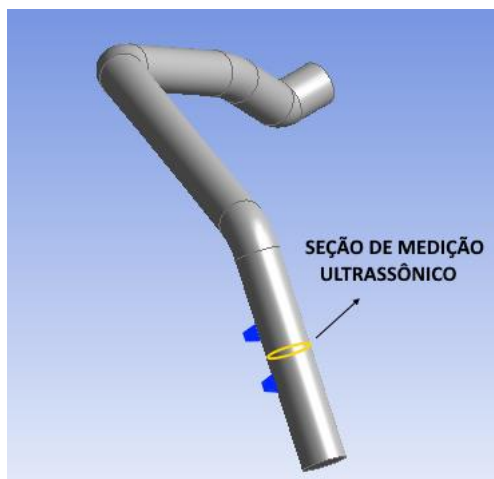


Fig. 8 - Parte 2 da simulação do modelo da tubulação, onde foi realizada a medição do ultrassônico. O contorno amarelo indica o local onde foi instalado o medidor ultrassônico.

Para reduzir a necessidade de uma malha extremamente detalhada, e reduzindo o consumo de recursos computacionais, algumas simplificações foram feitas na geometria, como a remoção de curvas e cantos muito pequenos, que não impactem no resultado final da simulação. O perfil de velocidades é influenciado principalmente pelos cotovelos e pelas bombas.

Para realizar a simulação foram usadas algumas hipóteses com o intuito de facilitar o entendimento e aumentar a precisão do modelo:

- Foi considerado que o perfil da saída das bombas é simétrico axialmente. Essa hipótese foi usada principalmente porque não é conhecido o perfil de velocidades na saída da bomba. Para descobrir esse perfil de velocidades, teria que ser simulada a bomba em si, o que consumiria um tempo excessivo, e não traria resultados satisfatórios. Para compensar esse efeito, foi considerado que o perfil é simétrico em velocidades mas com alta turbulência e vorticidade, como é esperado da saída de uma bomba.
- Foi considerado que as duas bombas apresentam vazões iguais de $0,27\text{m}^3/\text{s}$ (metade da vazão média calculada com o ultrassônico). Assumi-se que as bombas são idênticas.
- Foi considerado escoamento no regime hidraulicamente rugoso, devido ao alto número de Reynolds.
- O modelo utilizado para realizar as simulações foi o “*realizable k-ε*”. Esse modelo foi utilizado devido a sua eficácia em simular escoamentos fechados em tubulações, e também por apresentar boa convergência.

Parte 1 do modelo da simulação

A malha gerada para realizar a simulação na parte 1 do modelo contém 1,1 milhão de nós com a utilização de técnicas para capturar os efeitos da camada limite com maior precisão. Além disso, a malha próxima das singularidades apresenta elementos menores para capturar com mais precisão as alterações de gradientes de velocidade e turbulência. Na saída da bomba a malha também teve que ser mais refinada devido aos efeitos do “Y” de conexão. Em especial, essa característica geométrica dificulta a simulação do escoamento, devido aos grandes gradientes de velocidade gerados. Após cerca de 2000 iterações chegou-se à convergência dos resultados.

Para realizar o estudo dos perfis de velocidade foram capturadas 2 seções diferentes da tubulação, todas na mesma tubulação de diâmetro de 0.5m. A primeira seção fica logo no encontro entre as duas saídas das bombas e a segunda fica no ponto de medição do tubo de Pitot.

Parte 2 do modelo da simulação

A malha gerada para realizar a simulação na parte 2 contém 450 mil nós com a utilização de técnicas para capturar os efeitos da camada limite com maior precisão. Por causa da maior simplicidade da geometria na parte 2, é possível a utilização de um número menor de nós e uma simulação mais rápida. Após cerca de 1500 iterações os resultados convergiram. Na parte 2 foi analisada apenas a seção onde foi realizada a medição com o medidor ultrassônico, em amarelo na figura 8.

RESULTADOS

São apresentados em seguida os resultados dos ensaios realizados com o medidor ultrassônico e com o Pitot, e logo após esta sequência, os resultados da simulação.

Resultados dos ensaios

Para ilustração, na figura 9 são apresentados os gráficos de variação temporal referentes apenas às posições A e C, mostrando a vazão e a diferença percentual em relação à média em cada medição. A convenção adotada foi mostrada na figura 6. Os gráficos dos outros pontos não estão mostrados por economia de espaço, mas têm a mesma forma geral, embora difiram nos valores calculados, que são todos mostrados em tabela mais à frente.

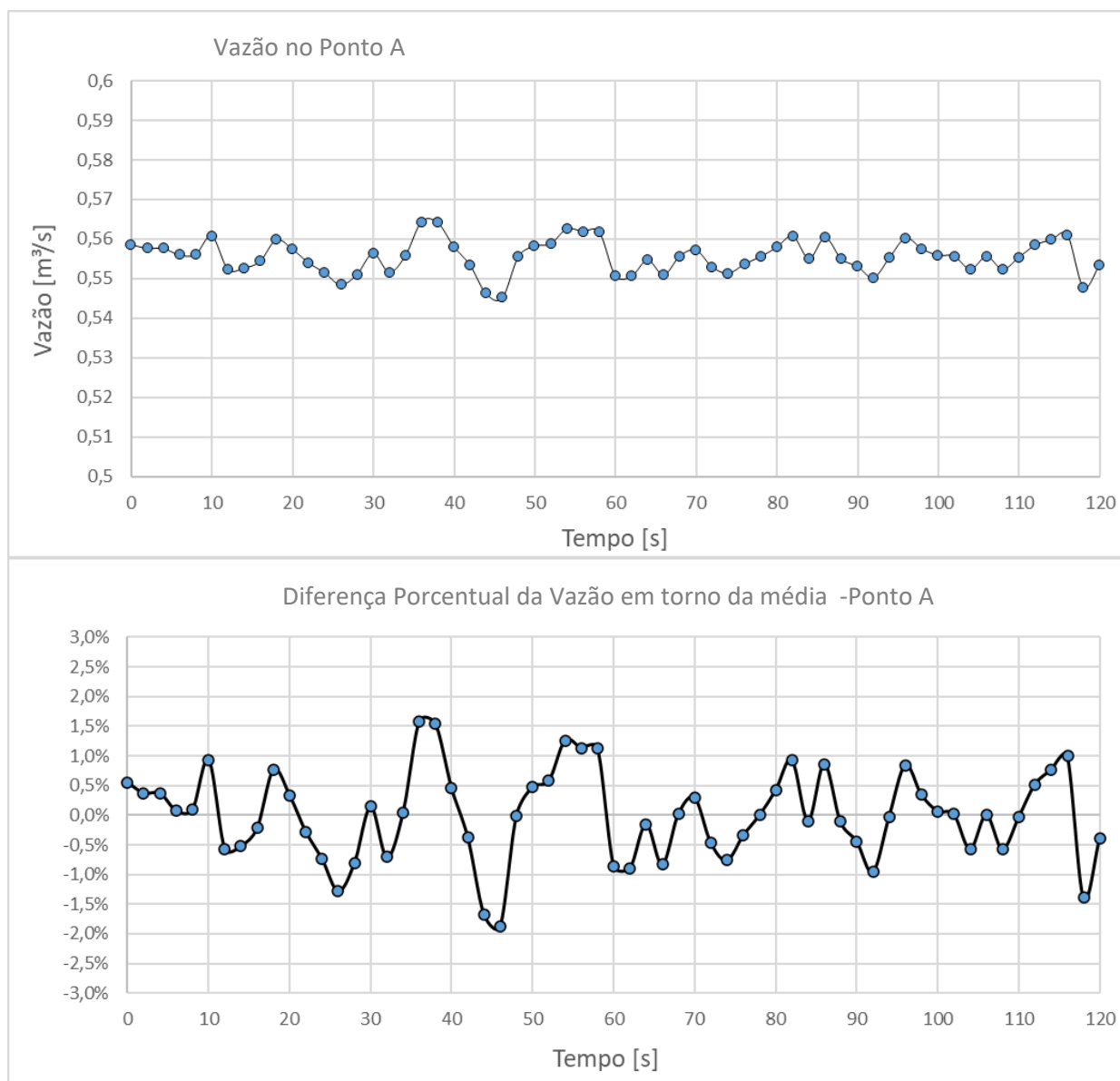


Figura 9. Valores de vazão e da diferença percentual em função da média, para o medidor na posição A. Observar que a vazão variou ao redor de $\pm 1,5\%$. Isto impacta na incerteza final, pois além do trecho estar repleto de singularidades e ser alimentado por duas bombas muito próximas, a vazão flutua.

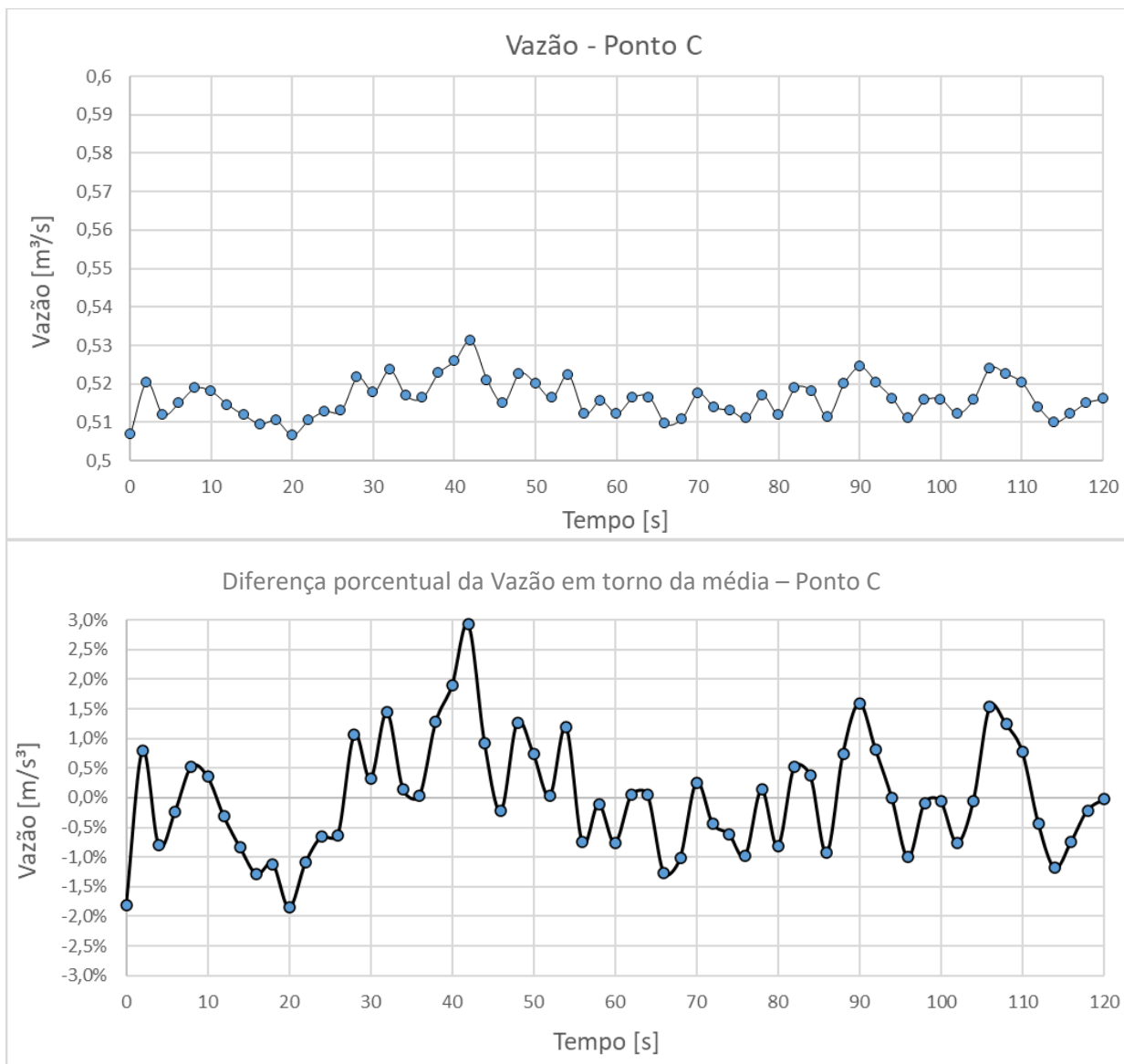


Figura 10. Valores de vazão e da diferença percentual em função da média, para o medidor na posição C. deve ser ressaltado que esta posição possui o menor valor de vazão dentre todas as posições de medição mostradas na figura 7. Mais à frente a simulação realizada vai mostrar que este diâmetro possui uma distribuição de velocidades muito variável e o menor valor de velocidade simulada, mostrando a coerência do método.

Pulsões introduzidas pelas bombas

Foram utilizadas duas bombas em paralelo para a geração do escoamento no ensaio. Para averiguação do comportamento do escoamento na seção da medição com o ultrassônico, a vazão foi medida ininterruptamente durante mais de 10 minutos com o medidor ultrassônico. Os resultados são apresentados na figura 11.

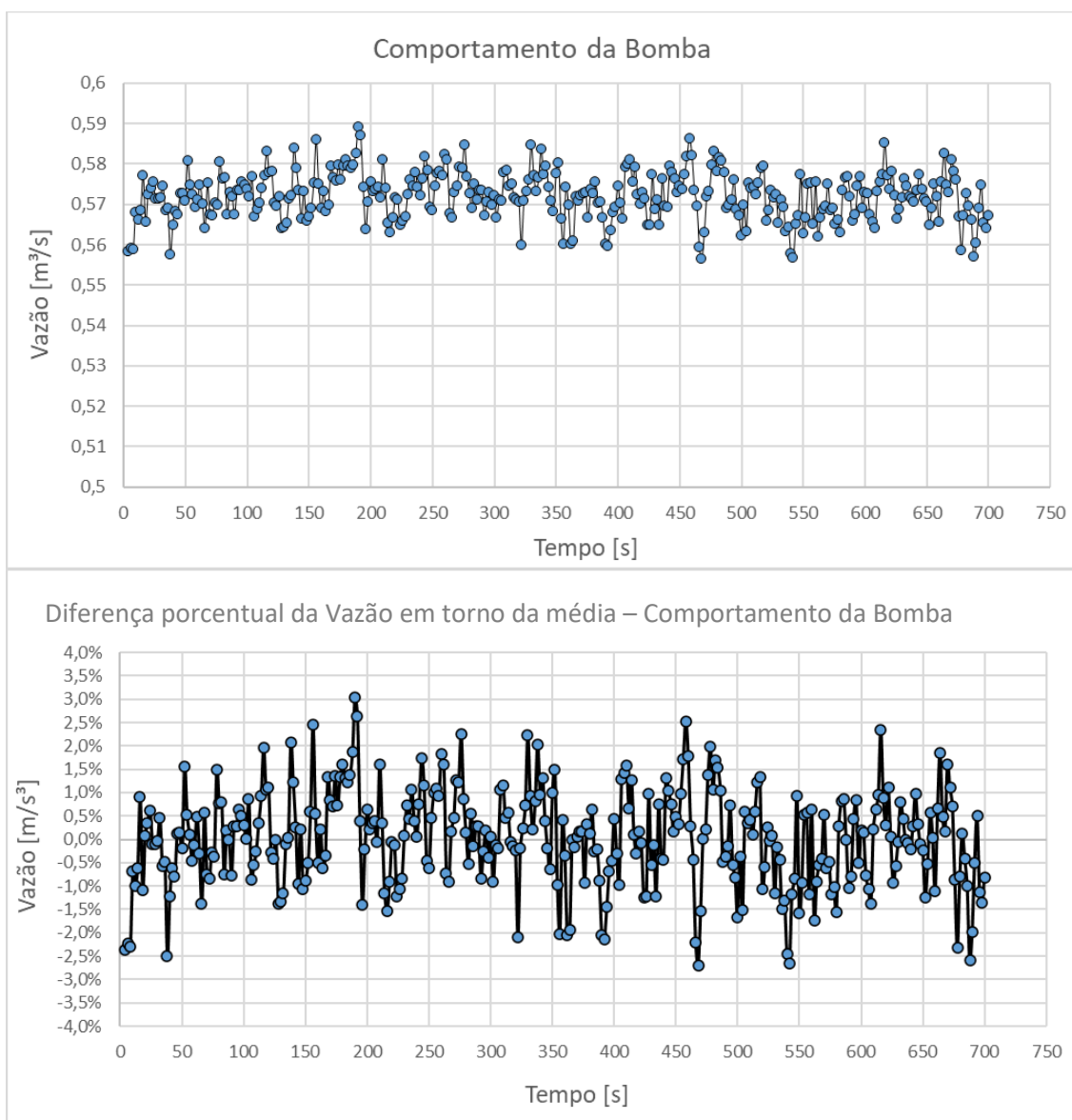


Figura 11 - Flutuação de vazão observada durante 10 minutos. A vazão apresentou oscilações com amplitude de $\pm 3,0\%$ do valor médio. Estas oscilações são significativas e impactam sensivelmente os resultados das medições, pois são da mesma ordem de grandeza das diferenças medidas entre as várias posições radiais em que o ultrassom foi instalado.

RESULTADOS DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA – Parte 1 do modelo: Região Tubo de Pitot

Para estimar qual é o perfil de velocidades na seção do medidor eletromagnético da estação consolação foi realizado um trabalho de simulação numérica utilizando o software ANSYS Fluent.

Para realizar o estudo dos perfis de velocidade foram capturadas imagens de duas seções diferentes da tubulação, todas com diâmetro de 0.5m. A primeira seção fica logo no encontro entre as duas saídas das bombas e a segunda fica no ponto de medição do tubo de Pitot.

Na seção 1, encontro entre as vazões das suas bombas, pode-se ver que o perfil de velocidades apresenta uma grande distorção, devido às singularidades a jusante das bombas e à interferência de uma corrente de fluido na outra.

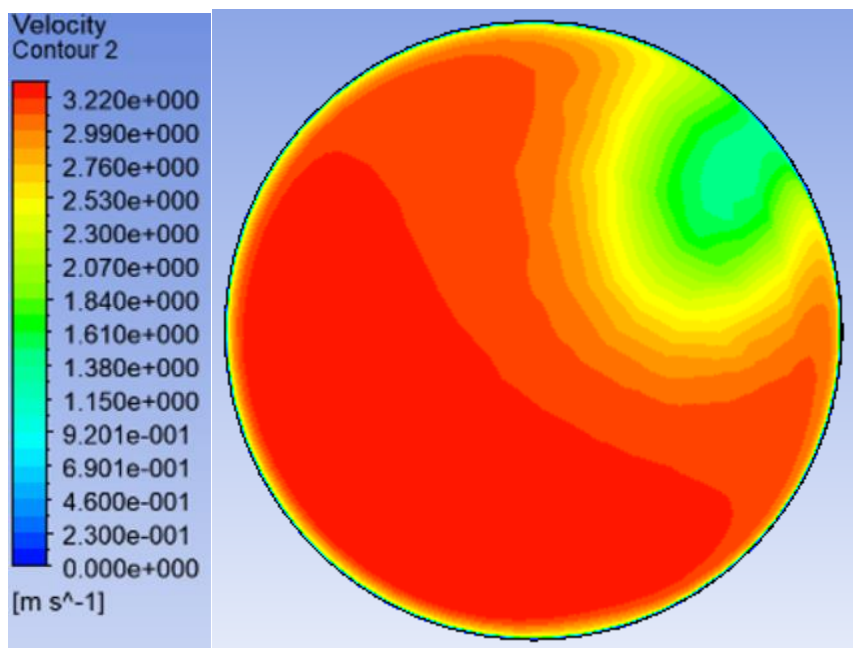


Fig. 12 - Perfil de velocidades na seção 1- Visão olhando da estação pitométrica para as bombas, ou seja, no sentido contrário ao do escoamento.

A maior distorção encontra-se no ponto superior direito, com um vale bem acentuado. Se for feita a simulação de velocidades (plotando o perfil de velocidades) no eixo vertical, como é feito usualmente na medição de um tubo de Pitot, se poderia ter a falsa impressão de que o perfil de velocidades não é tão distorcido, mesmo em um ponto logo na saída das bombas com alta distorção.

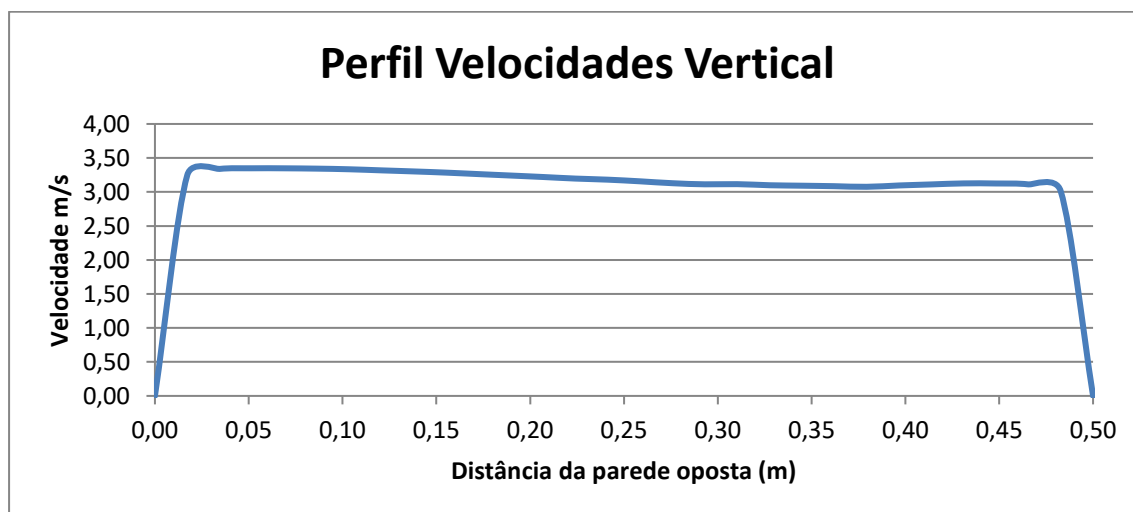


Fig. 13 - Simulação de Perfil de velocidades no eixo vertical para a seção 1, encontro dos escoamentos das duas bombas.

No entanto, capturando o perfil de velocidades na diagonal, pode se ver a grande distorção no perfil.

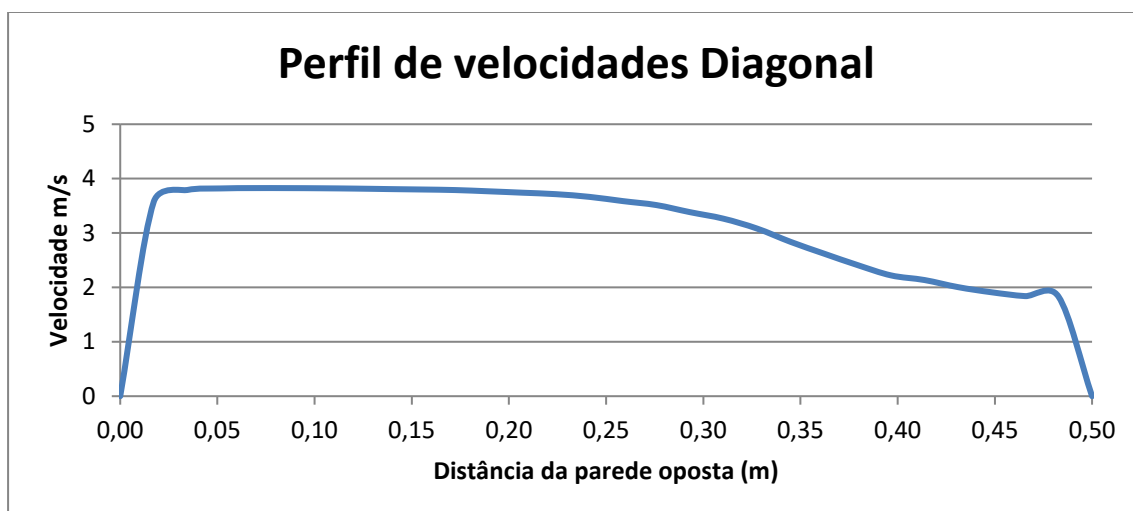


Fig. 14 - Simulação de Perfil de velocidades no eixo diagonal para a seção 1, mostrando a grande distorção do perfil em relação à simulação para o diâmetro vertical.

Analisando a simulação das velocidades tangenciais, que indicam movimento rotacional, pode-se perceber que existe um grande gradiente de velocidades próximo do vale. Como ainda está próximo da saída das bombas, a velocidade tangencial é da ordem de grandeza das velocidades normais ao plano de medição.

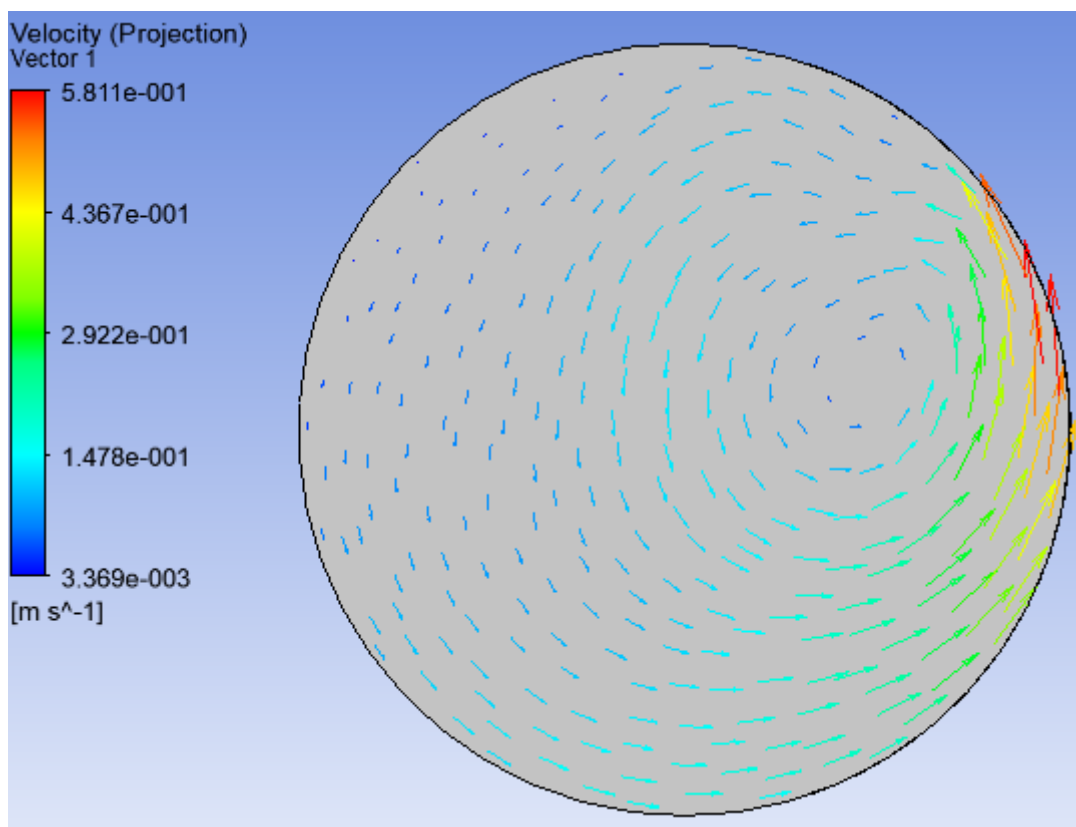


Fig. 15 - Velocidades tangenciais na seção 1. Deve ser observado a magnitude dos velocidades tangenciais no canto superior direito, resultado da configuração das tubulações e da movimentação das bombas.

A figura seguinte mostra a simulação para a seção 2, ponto onde foi realizada a medição com o tubo de Pitot. É possível observar que a distorção no perfil de velocidades já é bem menos acentuada. Também é possível observar

que o vale fica levemente deslocado em relação à seção 1, impulsionado pelo movimento de rotação mostrado na figura acima com as velocidades tangenciais.

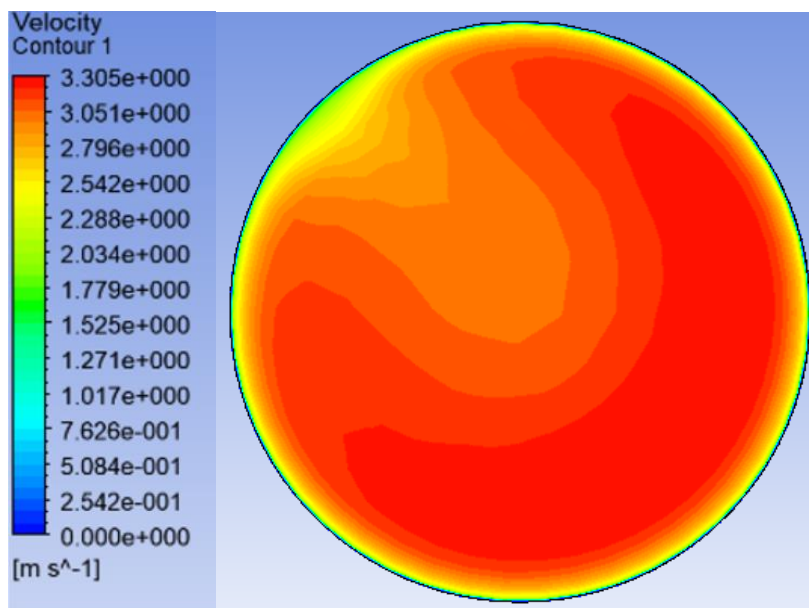


Fig. 16 - Perfil de velocidades na seção 2, onde está instalado o tubo de Pitot.

Realizando a mesma análise feita na seção 1, e extraindo o perfil de velocidades na direção vertical, percebe-se que o perfil de velocidades não se altera tanto em relação à seção 1, conforme mostra a figura seguinte. No entanto, ao se comparar com as medições realizadas utilizando-se o tubo de Pitot, pode-se perceber uma diferença entre os dois perfis.

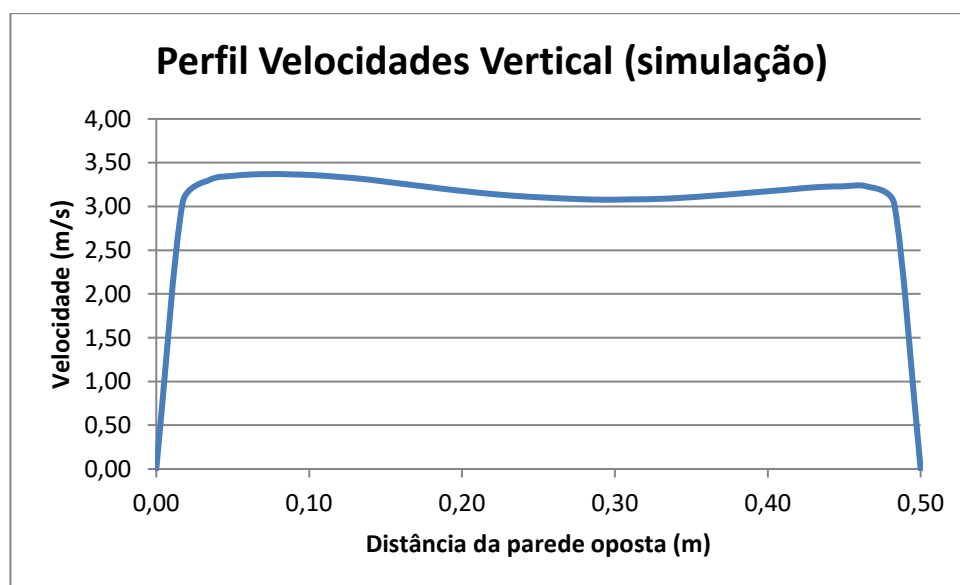


Fig. 17 - Perfil de velocidades vertical na seção 2

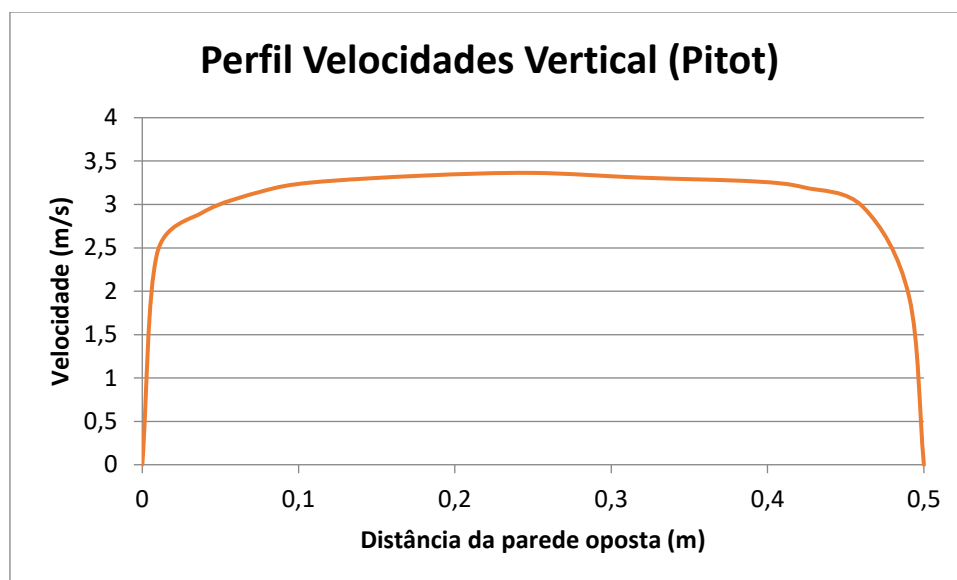


Fig. 18 - Perfil de velocidades medido com o tubo de Pitot

A medição realizada no tubo de Pitot mostrou um perfil praticamente simétrico, enquanto a simulação ainda apresentou um pequeno vale próximo ao centro. Esta diferença poderia ocorrer por dois motivos:

- A simulação pode ter subestimado a dissipação dos gradientes de velocidade no escoamento. Devido à complexidade da geometria, o modelo numérico pode não ter calculado a turbulência de forma ideal. Na fase seguinte do projeto será tentado a utilização de um modelo mais complexo para cálculos da turbulência, o que em contrapartida exigiria uma malha mais refinada, aumentando o tempo computacional.
- Pode-se também considerar que incertezas na medição com o Pitot poderiam afetar o perfil de velocidades. Uma observação que pode ser realizada ao comparar os dois perfis é a velocidade próxima a camada limite. Na simulação é possível observar claramente o aumento de velocidades na camada limite por causa de uma malha refinada próximo da parede da tubulação. Esses efeitos são dificilmente capturados em uma medição com o tubo de Pitot, o que causa um perfil de velocidades mais arredondado.

Em relação às velocidades tangenciais, na seção 2 já é possível observar uma grande redução nos gradientes de velocidade, indicando que o escoamento começa a ficar mais desenvolvido, sendo as velocidades tangenciais dissipadas pela rugosidade da tubulação.

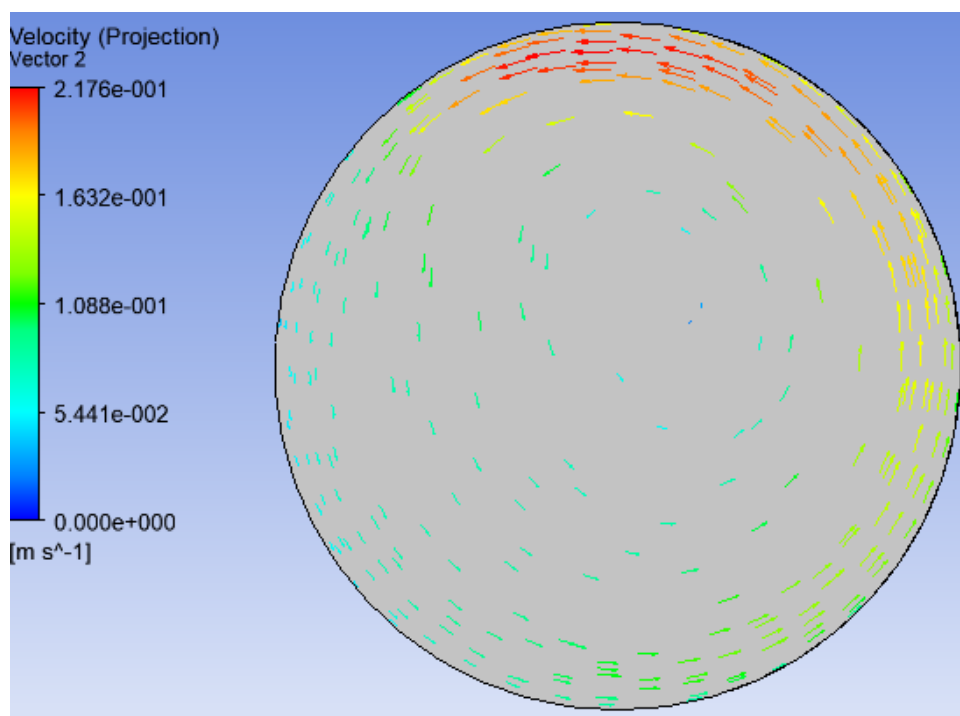


Fig. 19 - Velocidades tangenciais na seção 2

RESULTADOS DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA – Parte 2 do modelo: Região Medidor Ultrassônico

No ponto de medição do medidor ultrassônico, é esperado que o perfil de velocidades ainda seja distorcido devido à proximidade com as singularidades mais próximas. A figura 21 mostra o resultado das simulações numéricas.

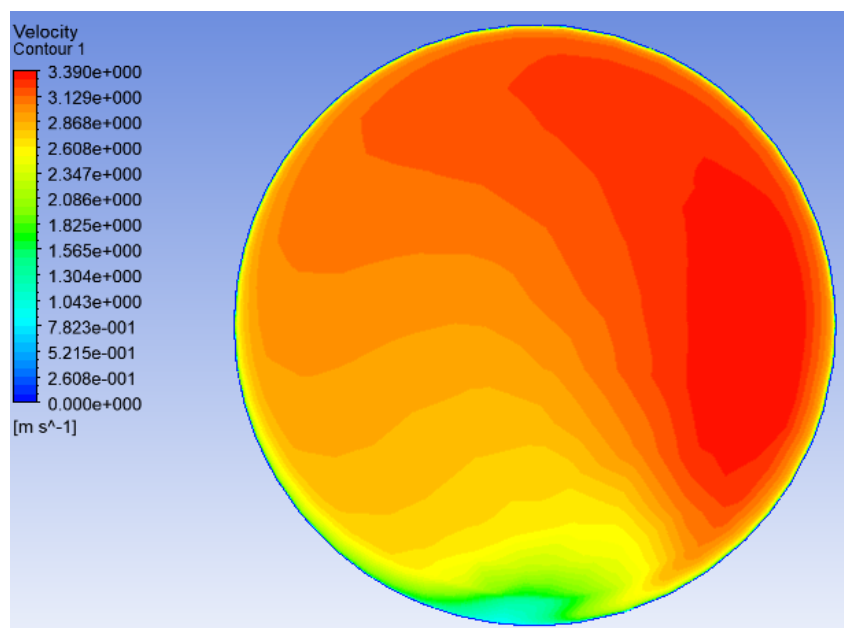


Fig. 20 - Perfil de velocidades na seção do ultrassônico

É possível observar um vale na parte inferior da tubulação e um pico na parte superior.

Olhando para as velocidades tangenciais, na próxima figura, é possível observar um grande gradiente de velocidades próximo do vale e também perto do pico, com velocidades da ordem de grandeza do vetor de velocidades normal.

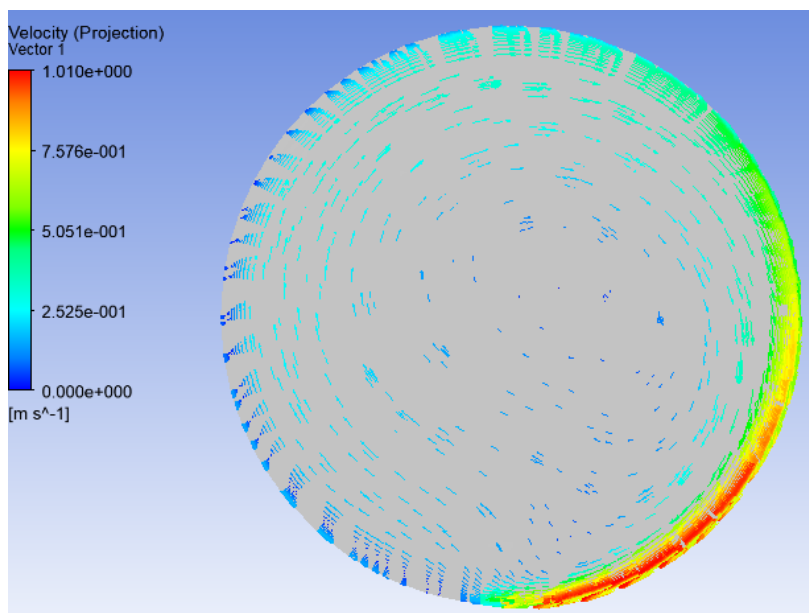


Fig. 21 - Velocidades tangenciais na seção do ultrassônico

ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste item serão analisados os resultados das medições com o ultrassom e Pitot e posteriormente os resultados da simulação, e finalmente a comparação entre os métodos de medição e simulação.

Análise dos resultados do medidor ultrassônico comparados com os do tubo de Pitot

A tabela 1 mostra resultados de cálculos e simulações, efetuados segundo as equações apresentadas em seguida.

- Vazão média US: consiste na média do registro temporal da vazão do ultrassom em certa posição de medição.

$$\bar{Q}_i = \frac{\sum_{j=1}^{N_i} q_i(t_j)}{N_i}$$

Onde:

\bar{Q}_i : a média entre os registros temporais da vazão na posição de medição i .

$q_i(t_j)$: registro da vazão na posição i no j -ésimo instante de tempo.

N_i : quantidade de registros de vazão aquisitados

- Desvio US Pitot: consiste na diferença relativa entre a média do US em certa posição e a vazão medida no ensaio com o tubo de Pitot.

$$\text{Desvio Pitot} = \frac{\bar{Q}_i - Q_{Pitot}}{Q_{Pitot}} * (100\%)$$

Onde: Q_{Pitot} é a vazão calculada com o tubo de Pitot

Tabela 1- Resultados das medições com o medidor ultrassônico

Posição de medição	Vazão Média US [m³/s]	Desvio US Pitot [%]
POSIÇÃO A	0,556	-1,8%
POSIÇÃO A-B	0,533	-5,8%
POSIÇÃO B	0,524	-7,4%
POSIÇÃO B-C	0,526	-7,0%
POSIÇÃO C	0,516	-8,7%
POSIÇÃO C-D	0,527	-6,7%
POSIÇÃO D	0,556	-1,7%
POSIÇÃO D-E	0,535	-5,5%
POSIÇÃO E	0,567	0,3%
POSIÇÃO E-F	0,562	-0,6%
POSIÇÃO F	0,541	-4,4%
POSIÇÃO F-G	0,552	-2,4%
POSIÇÃO G	0,531	-6,2%
POSIÇÃO G-H	0,524	-7,3%
POSIÇÃO H	0,522	-7,6%
POSIÇÃO H-I	0,520	-8,1%
POSIÇÃO I	0,551	-2,6%
POSIÇÃO I-J	0,565	-0,1%
POSIÇÃO J	0,542	-4,3%
POSIÇÃO J-A	0,571	0,9%

A tabela 2 apresenta outros resultados de comparação entre o ensaio com o tubo de Pitot e a medição com o ultrassônico a partir das seguintes equações apresentadas abaixo.

- Vazão média geral US: consiste na média entre todas as médias do registro temporal de cada posição.

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

Onde:

\bar{Q} : vazão média geral

n : número total de posições de medição

- A diferença relativa US-Pitot: consiste na diferença entre a vazão média geral US e a vazão medida no ensaio com o tubo de Pitot.

$$Def. Rel. US - Pitot = \frac{\bar{Q} - Q_{Pitot}}{Q_{Pitot}} * (100\%)$$

Tabela 2 – 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%

Como mostra a tabela 1, as vazões medidas com o ultrassônico apresentaram valores variando entre 0% e 8,7% quando comparadas com o tubo de Pitot. A simulação mostrada na figura 20 mostra que o campo de velocidades na região do ultrassônico é bastante perturbado, o que explica a variação mostrada pelo ultrassônico.

Quando a vazão é estimada pela média das 20 medições redundantes do ultrassônico, a vazão aproxima-se do valor do Pitot, sendo 4,3% inferior (tabela 2). Este valor deve ainda ser cotejado ainda com a incerteza elevada dos resultados obtidos com o Pitot 2,9 %, instalado em uma posição com perfil de velocidades bastante deformado como mostra a figura 16, somando se a isso o fato de a medição ser realizada em um único traverse, na direção vertical.

Análise dos resultados comparados entre as medições e a simulação

Pode se realizar um exercício para comparar a vazão medida com o ultrassom em cada posição com a vazão estimada nesta mesma posição, usando o modelo de simulação numérica. A vazão do modelo numérico em cada posição de medição foi determinada em dois passos: o primeiro consiste em extrair o perfil de velocidades correspondente à posição de medição e o segundo passo consiste em realizar a integração deste perfil na área da seção transversal do conduto para calcular finalmente a vazão.

A diferença relativa apresentada na tabela é calculada por:

$$Dif. \text{ relativa} = \frac{Q_{numérico,i} - Q_i}{Q_i}$$

Onde:

$Q_{numérico,i}$: vazão do modelo numérico na posição i

Q_i : vazão medida com medidor ultrassônico na posição i

A tabela 3 mostra a comparação entre os valores medidos pelo ultrassônico e o simulado para algumas posições de medição.

Tabela 3: Valores de vazão da simulação e da medição do ultrassônico

Posição de medição	Vazão Média US [m ³ /s]	Vazão Modelo Numérico [m ³ /s]	Dif. Relativa [%]
POSIÇÃO A	0,556	0,549	-1,26%
POSIÇÃO B	0,524	0,524	0%
POSIÇÃO C	0,516	0,511	-0,97%
POSIÇÃO D	0,556	0,540	-2,88%
POSIÇÃO E	0,567	0,543	-4,23%
POSIÇÃO F	0,541	0,549	1,5%
POSIÇÃO G	0,531	0,524	-1,3%
POSIÇÃO H	0,522	0,511	-2,1%
POSIÇÃO I	0,551	0,540	-2,0%
POSIÇÃO J	0,542	0,543	0,2%

Estes resultados são mostrados na figura 22, para maior clareza.

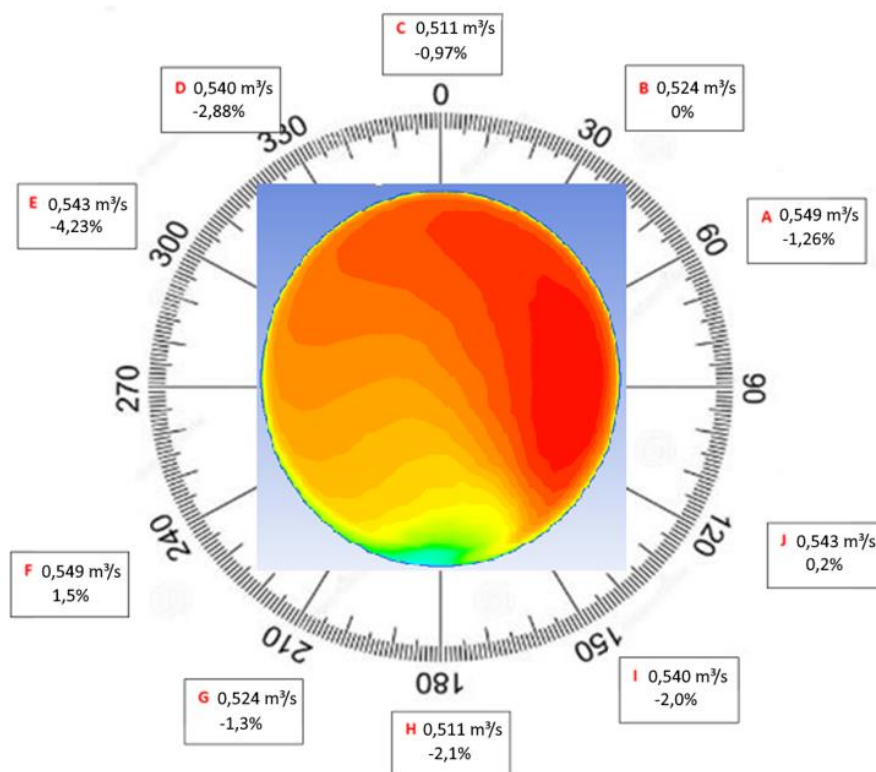


Fig. 22 - Simulação x medição. Nas posições de medição, estão indicados os valores de vazão obtidos com o modelo numérico e da diferença percentual em relação à vazão medida com o ultrassônico. Deve ser ressaltada a excelente concordância dos resultados.

Apesar da alta distorção do campo de velocidades, observa-se que as vazões medidas pelo ultrassônico se aproximaram em boa parte dos valores calculados pelo modelo numérico. Observa-se que o medidor ultrassônico foi capaz de resgatar em boa parte, o comportamento de distorção do campo de velocidade que foi apresentado pelo resultado numérico.

Estes resultados se mostraram promissores para o uso do medidor ultrassônico em associação com a simulação numérica para um desenvolvimento de uma metodologia mais robusta na determinação da vazão com ultrassônico.

CONCLUSÕES

Com este projeto se abriu uma possibilidade bastante interessante de uso de medidor ultrassônico por *clamp on*, com várias medições em torno de um mesmo perímetro, como se fossem realizados diversos traverses com tubos de Pitot, sem as dificuldades e perturbações que o Pitot ocasiona. Os resultados das medições com o ultrassônico nas diversas posições e os resultados numéricos apresentaram grande correlação, em se tratando de medição de vazão, que é uma variável sabidamente complicada.

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 que se sabe da literatura é que quanto maior o diâmetro da tubulação, maior deveriam ser os trechos retos para a instalação de medidores de vazão, por conta da menor influência da rugosidade na modificação dos perfis de velocidade. Com isso, a simulação numérica pode se mostrar uma ferramenta de muita utilidade tanto na escolha de locais para a instalação de medidores quanto na correção de valores medidos de vazão por meio de estudos de perfis de velocidade no local. Com isso será possível desenvolver métodos para reduzir as incertezas de medição. Talvez até chegar a uma metrologia virtual.

Como era esperado e pôde ser observado no modelo numérico, o campo de velocidades na seção do medidor ultrassônico apresenta um alto grau de distorção. Apesar desta situação, a redundância de medições com o medidor ultrassônico apresentou um valor médio próximo à vazão obtida com o tubo de Pitot.

O valor da média geral da vazão calculada com as vinte posições medidas com o ultrassônico é 4,3% menor que a vazão medida com o tubo de Pitot, mas deve-se no entanto observar que a posição em que o Pitot está instalado, com apenas um traverse na direção vertical implica certamente em erro, pois o perfil de velocidades é bastante deformado, conforme mostrado na figura 16 - Perfil de velocidades na seção 2. A estimativa de incerteza do Pitot, nestas condições de campo, forneceu resultados da ordem de 2,9%, e a estimativa da incerteza com o medidor ultrassônico nessas condições é da ordem de 3,5%, o que mostra que os resultados estão dentro da mesma faixa de incerteza.

O trabalho deverá ser continuado com outros ensaios e simulações para aprimorar a concepção de um modelo de estimativa que permita cruzar simulações e medições perimetrais com o uso de medidor ultrassônico e estimar a incerteza decorrente do método com outras entradas de dados.

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. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR ISO 9001:2008: *Sistemas de gestão da qualidade - requisitos*. Rio de Janeiro, 2008.
7. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO/IEC 17025: *Requisitos gerais para a competência de laboratórios de ensaios e calibração*. Rio de Janeiro, 2017