

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

MARCELO ALMEIDA AZEREDO

**SIMULAÇÃO DE ESCOAMENTO TURBULENTO E POR MEIO DA TÉCNICA DNS
AVALIAÇÃO DO FATOR DE CORREÇÃO DE MEDIDORES DE VAZÃO
ULTRASSÔNICOS**

VITÓRIA

2014

MARCELO ALMEIDA AZEREDO

**SIMULAÇÃO DE ESCOAMENTO TURBULENTO E POR MEIO DA TÉCNICA DNS
AVALIAÇÃO DO FATOR DE CORREÇÃO DE MEDIDORES DE VAZÃO
ULTRASSÔNICOS**

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. Dr. Rogério Ramos

VITÓRIA

2014

MARCELO ALMEIDA AZEREDO

**SIMULAÇÃO DE ESCOAMENTO TURBULENTO E POR MEIO DA TÉCNICA DNS
AVALIAÇÃO DO FATOR DE CORREÇÃO DE MEDIDORES DE VAZÃO
ULTRASSÔNICOS**

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Aprovado em 30 de Julho de 2014.

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Rogério Ramos
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador

Prof. Dr. Márcio Ferreira Martins
Universidade Federal do Espírito Santo

Prof. Dr. Rogério Silveira de Queiroz
Universidade Federal do Espírito Santo

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, Jumar Azeredo e Maria Nilda Almeida Azeredo, pelo suporte e incentivo que me deram ao longo de toda minha vida.

Ao meu orientador, Rogério Ramos, pelos ensinamentos, e pela oportunidade concedida de realizar esse projeto.

Ao Professor Gilmar Mompean, que apesar do breve contato, foi essencial no desenvolvimento deste trabalho, e ao Professor Márcio Martins pelo auxílio prestado na elaboração do presente projeto.

RESUMO

Na indústria de petróleo e gás há uma grande necessidade de medições de vazão como elevada precisão e confiabilidade, uma vez que a produção de tais fluidos é controlada por leis e afetam diretamente os custos e lucros. É sabido que acidentes de linhas, como curvas e válvulas, influenciam de forma significativa na qualidade da medição. Em instalações em que o controle de vazão é feito através de medidores ultrassônicos por tempo de trânsito é fundamental o conhecimento detalhado do perfil de velocidade do fluido transportado, pois esse tipo de instrumento exige calibração precisa que se adapte ao escoamento que atravessa a seção de medição. Neste trabalho é feita a simulação do escoamento turbulento em uma instalação de um queimador de gás (*flare*), composta por uma tubulação de 12" de diâmetro com duas curvas de 90°, em planos perpendiculares, entre as quais há um medidor de vazão ultrassônico. As simulações realizadas a partir da técnica DNS (*Direct Numerical Simulation*) e modelos de turbulência k- ϵ e RNG k- ϵ , visando investigar os efeitos da geometria da tubulação sobre o escoamento e suas consequências sobre o fator de correção (k) do medidor de vazão, calculado por meio de uma integração numérica, proposta por Martins (2012), com dados da simulação computacional, sendo considerado quatro ângulos de montagem (0°, 90°, 180° e 270°). Resultados mostram que a medição é sensível ao arranjo simulado e, além disso, também é observado a influência da flutuação transiente do perfil velocidade, a qual é uma característica dos escoamentos turbulentos, sendo possível observar casos em que o fator de correção apresenta diferença superior a 8% devido exclusivamente a flutuação. Tais desvios evidenciam a necessidade de serem considerados os fenômenos inerentes ao escoamento turbulento, como a flutuação da velocidade, no cálculo do fator de correção. Também foi possível verificar que tanto a técnica DNS quanto os modelos de turbulência testados são capazes de identificar qual arranjo induz maior desvio relativo no fator de correção.

LISTA DE FIGURAS

Figura 4.1 Geometria da instalação simulada	24
Figura 4.2 Aspecto da malha com a aplicação da ferramenta <i>inflation</i>	26
Figura 4.3 Dimensão dos volumes de controle diferencial próximo à parede	26
Figura 4.4 Refinamento nas curvas.....	27
Figura 5.1 Velocidade no centro da seção de medição: (a) componente u; (b) componente v; (c) componente w	31
Figura 5.2 Comparação entre diferentes passos de tempo: (a) Perfis velocidade no plano vertical; (b) Diferença percentual entre passos de tempo.....	32
Figura 5.3 Comparação entre diferentes passos de tempo: (a) Perfis velocidade no plano horizontal; (b) Diferença percentual entre passos de tempo	33
Figura 5.4 Mapa de contorno da velocidade global na seção de medição.....	34
Figura 5.5 Perfil de velocidade na seção de medição	34
Figura 5.6 Componente tangencial da velocidade global.....	35
Figura 5.7 - Comportamento transiente do fator de correção (k): (a) $\theta=0^\circ$; (b) $\theta=90^\circ$; (c) $\theta=180^\circ$ e $\theta=270^\circ$	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 Dados de entrada e propriedades do fluido.....	28
Tabela 5.1 – Fator de correção calculados com dados da simulação DNS	38
Tabela 5.2 – Desvio relativo dos fatores de correção máximo, mínimo e médio para diferentes ângulos de montagem, intervalo de tempo: 120 s	38
Tabela 5.3 - Desvio relativo dos fatores de correção para diferentes Re e θ	40

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	8
1.1	Histórico	8
1.2	Motivações e Objetivos	9
1.3	Revisão Bibliográfica.....	11
2	ESCOAMENTO TURBULENTO	13
2.1	Simulação Numérica Direta (DNS).....	13
2.2	Modelos de Turbulência	14
3	MEDIDORES DE VAZÃO ULTRASSÔNICOS POR TEMPO DE TRÂNSITO ..	17
3.1	Princípio de operação	17
3.2	Fator de Correção (k).....	20
4	METODOLOGIA	24
4.1	Geometria	24
4.2	Elaboração da Malha	25
4.3	Pré-processamento.....	27
4.4	Processamento	29
4.5	Pós-processamento	29
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	30
5.1	Caracterização do Perfil de Escoamento	30
5.2	Cálculo do Fator de Correção	35
5.2.1	<i>Fator de Correção (k) x DNS</i>	<i>35</i>
5.2.2	<i>Fator de Correção (k) x Modelos de Turbulência</i>	<i>40</i>
6	CONCLUSÃO	40
	REFERÊNCIAS.....	43

1 Introdução

1.1 Histórico

Os primeiros registros a respeito da medição de vazão ocorreram há muitos séculos. Seu surgimento se deu a partir do momento em que as civilizações começaram a canalização da água para consumo doméstico. Foi então que a administração pública iniciou o controle com a finalidade de cobrar taxas sobre o consumo. As primeiras referências à medição de vazão constam em um texto do governador romano Julius Frontinus (30-103 d.C.)

Depois de um longo intervalo sem registros científicos relevantes o assunto voltou a ser estudado no século XV por Leonardo da Vinci (1452-1519) e posteriormente, no século XVII, Galileu Galilei (1564-1642), que apresentou estudos sobre os fundamentos da medição de vazão, e seu discípulo Evangelista Torricelli (1608-1647) estabeleceu a equação sobre o escoamento livre da água através de orifícios.

Já no século XVIII a base da ciência denominada Mecânica dos Fluidos foi estabelecida de forma definitiva. Dois cientistas que contribuíram de forma significativa para isso foram Daniel Bernoulli (1700-1782) e Leonardo Euler (1707-1783). Bernoulli formulou, em 1738, a lei sobre o movimento dos líquidos, atualmente chamada de “equação de Bernoulli” e Euler desenvolveu equações diferenciais gerais que descrevem o movimento de fluidos sujeitos a diversas condições. Ainda durante o século XVIII, Henri Pitot apresentou um instrumento capaz de medir a velocidade da água. Este instrumento se desenvolveu e atualmente ele é comumente utilizado em diversas áreas na indústria tanto para medir velocidade quanto para medir vazão de fluidos, hoje ele é conhecido como “tubo Pitot”. Já no fim do século XVIII Giovanni Venturi (1746-1822) apresentou estudos sobre o desenvolvimento do “tubo Venturi”.

O século XIX foi marcado por diversos cientistas que contribuíram significativamente no desenvolvimento matemático da dinâmica dos fluidos, resultando num melhor entendimento do comportamento e das propriedades dos fluidos. Estes estudos foram fundamentais para o desenvolvimento de inovações na área de medição de vazão. Os principais nomes deste período foram: Jean Poiseuille (1797-1869), responsável

por estudos sobre escoamentos em tubos capilares e viscosidade dos fluidos; sir George Stokes (1819-1903), que publicou trabalho relacionados com a hidrodinâmica, e Osborne Reynolds (1842-1912), o qual propôs o número adimensional que indica a relação entre as forças de inércia e forças viscosas de um fluido submetido a um escoamento, conhecido hoje como “número de Reynolds”, sendo esse largamente utilizado como parâmetro em estudos científicos.

Durante o século XX a necessidade do desenvolvimento de métodos de medição de vazão se tornaram mais abrangentes, devido ao surgimento de variados processos industriais que exigiam medições mais confiáveis e precisas. As entidades relacionadas ao assunto realizaram diversos congressos e produziram trabalhos e normas com o intuito de promover o desenvolvimento dos processos de medição. A partir da aplicação de princípios e resultados de trabalhos publicados por cientistas que haviam estudados fenômenos de outras áreas foram desenvolvidos novos medidores, capazes de atender esses novos requisitos. Estudos de Theodor von Karman (1881-1963) sobre os vórtices; de Michael Faraday (1791-1867) a respeito do eletromagnetismo; de Johann Doppler (1803-1853) relativos ao comportamento de ondas sonoras e de Gaspard Coriolis (1792-1843) sobre a lei da cinética deram origem aos medidores vortex, eletromagnéticos, por ultrassom e coriolis.

1.2 Motivações e Objetivos

A medição de vazão é um processo de extrema importância e alta complexidade para a indústria de petróleo e gás, uma vez que exerce significativa influência sobre os processos de controle e fiscalização. Portanto, a medição de vazão está diretamente relacionada com custos de compra, venda, impostos a serem recolhidos e *royalties* de tudo que é produzido.

Diante desse contexto, no ano 2000, órgãos brasileiros de regulação publicaram um documento que trata exclusivamente sobre esse assunto: a Portaria Conjunta ANP/INMETRO N° 1. Esse documento tem a finalidade de estabelecer as condições e os requisitos técnicos, construtivos e metrológicos mínimos que os sistemas de medição de petróleo e gás natural devem observar, com o objetivo garantir a credibilidade dos resultados de medição. Já em 2013 houve uma atualização e

atualmente o que está em vigor é a Resolução Conjunta ANP/Inmetro N° 1. Dentre os medidores autorizados a serem utilizados com a finalidade de medição de vazão de gás está o medidor ultrassônico, desde que esteja de acordo com os parâmetros estabelecidos pelo documento publicado pela *American Gas Association* – AGA – em 1998: AGA Report N° 9 e o fabricante do instrumento garanta que o mesmo opere de acordo com os parâmetros de incerteza estabelecidos pela Resolução. Os medidores ultrassônicos representam, hoje, uma parcela importante do mercado de instrumentos destinados à medição de vazão, esses são alguns dos fatores motivadores deste trabalho.

Uma das aplicações dos medidores por ultrassom é a medição de vazão de gás em instalações de queimadores (*flare*) em plataformas de exploração de petróleo e gás. Frequentemente, plataformas sofrem com a limitação de espaço físico. Devido a isso é muito comum a inviabilidade da instalação de instrumentos em condições ideais, é frequente casos onde há acidentes de linha (dentre esses: curvas, válvulas ou flanges) próximos aos medidores. A presença desses acidentes implicando, diretamente, em alterações nos resultados da medição, uma vez que ao analisar-se o princípio de funcionamento desses medidores, apresentado pela AGA Report N° 9, entende-se que para garantir uma medição com baixa incerteza é necessário que o perfil de velocidade presente na seção de medição deve ser completamente desenvolvido, fato este que não é possível sem que haja um trecho mínimo de tubulação com a ausência de acidentes de linha, denominado trecho reto. O estudo do efeito de acidentes de linha também é uma motivação para o desenvolvimento deste trabalho.

Diante das motivações apresentadas, foram definidos como objetivos:

- a) Realizar simulações numéricas do escoamento turbulento que passa através da seção de medição de vazão de gás de um medidor ultrassônico em uma instalação com acidentes de linha, utilizando os modelos de turbulência $k-\epsilon$ e RNG $k-\epsilon$ e a técnica de simulação direta (DNS);
- b) Avaliar os efeitos da turbulência e da geometria da tubulação sobre o perfil de velocidade na seção de medição de vazão e
- c) Calcular valores do fator de correção k , considerando o método de cálculo proposto por Martins(2012), utilizando dados provenientes das simulações numéricas, e comparar com valores obtidos pela metodologia definida pela AGA Report N° 9.

1.3 Revisão Bibliográfica

Para a realização deste trabalho fez-se necessário uma revisão bibliográfica com a finalidade de se compreender qual o contexto do desenvolvimento dos estudos a respeito da tecnologia de medição de vazão por ultrassom, sendo considerado assunto como: tipos de medidores e efeitos de acidentes de linha.

Holm, Stang e Delsing (1995) apresentaram estudos sobre acidentes de linha e seus efeitos sobre o fator de calibração de medidores de vazão. Foram obtidos resultados experimentais, analíticos e numéricos para várias faixas de números de Reynolds. Os autores dizem que a análise numérica pode contribuir para o desenvolvimento de medidores ultrassônicos que sejam capazes de se adequarem a diversas condições de instalação.

Hilgenstock e Erns (1996) realizaram experimentos em laboratório e simulações numéricas e compararam os resultados obtidos. Concluindo que o desenvolvimento de estudos a partir de simulações numéricas mostra-se uma poderosa ferramenta de análise sobre a influência de acidentes de linha. Apresentam, também, um estudo sobre diferentes arranjos de montagem do medido ultrassônico e suas consequências no erro da medição. Além disso concluem que o tipo de modelo de turbulência adotado nas simulações pode ser determinante na qualidade dos resultados.

Yeh e Mattingly (1997) realizaram simulações numéricas com o objetivo de comparar o desempenho de medidores ultrassônicos submetidos a escoamentos em condições ideais e com perturbações. Eles concluíram que o desempenho desses medidores em condições não ideais está diretamente relacionando com as características de instalação, localização e orientação do medidor e do tipo de perturbação. Além disso confirmaram que medidores de múltiplos caminhos acústicos são mais precisos e possuem menor sensibilidade às condições não ideais.

Calogirou, Boekhoven e Henkes (2001) investigaram o da rugosidade da tubulação sobre os resultados da medição de vazão por ultrassom. Seus resultados mostram que os valores de vazão percebidos pelo medidos são aumentados quando há um aumento na rugosidade da parede interna da tubulação. Além disso, concluíram que a localização do caminho acústico tem influência significativa na sensibilidade à variação do perfil de velocidade.

Lansing (2004) apresenta estudos sobre a influência da velocidade do escoamento, dos parâmetros de instalação, da presença de acidentes de linha (válvula de controle), da temperatura do meio, das impurezas do fluido e da calibração sobre o desempenho do medidor de vazão e propõe meios de melhorar a confiabilidade. O autor alerta, ainda, para a necessidade da realização do projeto adequado e instalação correta do medidor para que se possa garantir uma boa confiabilidade.

Ruppel e Peters (2004) propõem um tipo de sistema de medição de vazão por ultrassom capaz de se adequar às condições de instalação, considerando a presença de acidentes de linha. O desenvolvimento baseia-se no levantamento do erro na medição para diversos números de Reynolds e comparação com dados obtidos em experimentos e simulações numéricas, para diferentes configurações de instalação. Os autores concluem que o método adotado é capaz de auxiliar na redução do erro na medição.

2 Escoamento Turbulento

A maioria dos escoamentos encontrados nos processos da engenharia são turbulentos, portanto é de extrema importância o estudo e a compreensão desse fenômeno como forma de buscar constantemente a melhoria de processos relacionados com esse tipo de escoamento, como a medição de vazão que é diretamente influenciada pelas características do fluxo.

Escoamentos turbulentos são caracterizados, principalmente, pela alta instabilidade, de forma que a velocidade das partículas de um fluido em um ponto do escoamento, quando observadas no transcorrer do tempo, apresenta valores aleatórios em torno de uma média, o que leva a conclusão que trata-se de um fenômeno transiente. Além disso, as flutuações dos fluxos turbulentos ocorrem em um amplo campo de escalas de comprimento e tempo, fato que aumenta a dificuldade da análise.

Há várias técnicas para se estimar as propriedades de um escoamento turbulento, entre elas está a simulação numérica direta (DNS) na qual as equações de Navier-Stokes são solucionadas numericamente sem a utilização de modelos de turbulência.

2.1 Simulação Numérica Direta (DNS)

A simulação numérica direta, DNS, é a mais precisa aproximação da solução das equações de Navier-Stokes para a simulação de escoamentos turbulentos, uma vez que não há médias ou aproximações além daquelas oriundas da discretização numérica as quais podem ser estimadas e controladas (Ferziger e Peric, 2002).

A solução do conjunto de equações que descrevem um escoamento turbulento sem modelo de turbulência (k - ϵ , RNG k - ϵ) implica na necessidade de se resolver todo o campo de escalas de comprimento e tempo, portanto o procedimento computacional trata-se de uma simulação transiente que deve ser capaz de captar desde as maiores até as menores estruturas da turbulência.

As escalas de Kolmogorov definem as menores dimensões de tempo e comprimento de um escoamento turbulento. Uma estimativa para essas escalas é demonstrada em

Lumley e Tennekes (1972), onde as escalas de tempo (τ) e comprimento (η) são dadas, respectivamente, por:

$$\frac{\tau u}{L} = (Re_L)^{-\frac{1}{2}} \quad (2.1)$$

$$\frac{\eta}{L} = (Re_L)^{-\frac{3}{4}} \quad (2.2)$$

Logo a simulação DNS exige que o passo de tempo e a distância entre os nós da malha sejam, respectivamente, menores que τ e η . Essas exigências são os principais motivos que tornam a aplicação desse tipo de técnica limitada, pois as escalas de Kolmogorov são muito menores do que as escalas do domínio e do tempo em que ocorrem o escoamento, o que resulta em uma malha muito refinada e a necessidade de uma grande quantidade de passos de tempo para se obter uma simulação de poucos segundos de fluxo. Em consequência disso faz-se necessário computadores com elevada velocidade de processamento e memória.

2.2 Modelos de Turbulência

Um escoamento de um fluido contínuo e viscoso é descrito pelas equações de continuidade e de quantidade de movimento (Navier-Stokes) (Mendonça e Medeiros, 2008) as quais são apresentadas pelas equações (2.1) e (2.2), respectivamente. Essas equações descrevem, então, até mesmo as flutuações da turbulência.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (2.3)$$

$$\rho \left[\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial(u_i u_j)}{\partial x_j} \right] = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (2.4)$$

Onde

- ρ é a densidade do fluido [kg/m^3];
- t é o tempo [s];
- u_i é a componente da velocidade na direção i [m/s];
- x_i é a coordenada cartesiana na direção i [m];
- p é a pressão estática do fluido [N/m^2];
- μ é a viscosidade dinâmica do fluido [$Pa.s$]

O modelamento das equações que representam o escoamento turbulento, ocorre devido ao alto custo computacional para se obter a solução em todas as escalas desse fenômeno utilizando a simulação numérica direta, uma vez que, para isso, faz-se necessário a utilização de malhas computacionais e passos de tempo muito refinados para que seja possível capturar as menores escalas. Assim, para que os efeitos que não são percebidos, ou são *filtrados*, sejam de alguma considerados é necessário um modelamento da turbulência.

Para uma aplicação típica da indústria a flutuações da turbulência não são de interesse prático, o objetivo das simulações computacionais para esses casos é a obtenção de um valor médio das propriedades do escoamento.

Uma abordagem clássica sobre a modelagem da turbulência é a desenvolvida por Reynolds, conhecido como média de Reynolds (em inglês, *Reynolds-average Navier-Stokes (RANS) equations*). A proposta do modelo é baseada na expansão das variáveis dependentes em duas componentes: uma componente média e outra de flutuação a qual possui uma média temporal nula. Genericamente as propriedades do fluido podem ser expressas pela equação (2.4).

$$q = \bar{q} + q' \quad (2.5)$$

Onde $\bar{q}$ é a propriedade média e q' a flutuação, que são definidas, respectivamente, pelas equações (2.6) e (2.7).

$$\bar{q} = \lim_{\Delta t \rightarrow \infty} \frac{1}{\Delta t} \int_{t_0}^{t_0 + \Delta t} q \, dt \quad (2.6)$$

$$\bar{q}' = \lim_{\Delta t \rightarrow \infty} \frac{1}{\Delta t} \int_{t_0}^{t_0 + \Delta t} (q - \bar{q}) \, dt \equiv 0 \quad (2.7)$$

Para um caso onde as condições de contorno indicam que o escoamento se em regime permanente tem-se que a média de uma propriedade no tempo é constante, logo $(\partial \bar{u}_i / \partial t = 0)$. Portanto, substituindo a equação (2.5) nas equações (2.3) e (2.4), para a velocidade e pressão, e realizando algumas considerações matemáticas e manipulações, obtém-se:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.8)$$

$$\rho \frac{\partial (\bar{u}_j)}{\partial x_i} = - \frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{u'_i u'_j} \right] \quad (2.9)$$

O termo $-\rho \overline{u'_i u'_j}$ que aparece na equação (4.10) representa um tensor de tensões simétrico, conhecido como tensor de tensões de Reynolds.

A maior parte dos modelos de turbulência utilizados em simulações típicas da indústria são baseados no modelamento proposto por Reynolds, entre esses estão o modelos k-ε e RNG k-ε, que são aplicados nesse trabalho. A diferença principal entre eles é o tratamento dado ao tensor de tensões.

3 Medidores de Vazão Ultrassônicos por Tempo de Trânsito

Os medidores de vazão ultrassônicos estão presentes no mercado desde da década de 80, apesar do seu desenvolvimento ter sido iniciado no início do século XX. A grande vantagem deste tipo de medidor é tornar possível a medição de vazão sem a necessidade promover qualquer obstrução na tubulação por onde passa o fluxo, dessa forma não induz qualquer perda de carga no escoamento. Quartzos piezelétricos localizados nos transdutores os quais são alojados em um aparato acoplado à parede externa da tubulação são responsáveis pela produção das ondas ultrassônicas na faixa de 200 kHz a 4 MHz.

3.1 Princípio de operação

Existem diferentes configurações de instalação para os medidores de vazão por ultrassom, de maneira que cada uma delas corresponde a diferentes princípios e parâmetros de medição. As técnicas mais comuns na indústria são as que utilizam o efeito Doppler e o tempo de trânsito. Neste trabalho será considerado um medidor com a configuração apresentada na figura 3.1 – baseada no tempo de trânsito. Os transdutores A e B possuem uma inclinação (α) de 45 graus em relação à direção principal do escoamento e estão à uma distância L , denominada caminho acústico, A e B agem tanto como emissores quanto receptores de pulsos ultrassônicos. O tempo de trânsito do sinal emitido pelo transdutor A para o transdutor B (t_{AB}) é computado, assim como o tempo de trânsito do sinal inverso (t_{BA}). Quando comparados os tempos de trânsito percebe-se que t_{AB} é menor que t_{BA} . Tal fato ocorre em consequência do aumento ou diminuição da velocidade do pulso quando esse é emitido a favor ou contra a direção do escoamento, respectivamente.

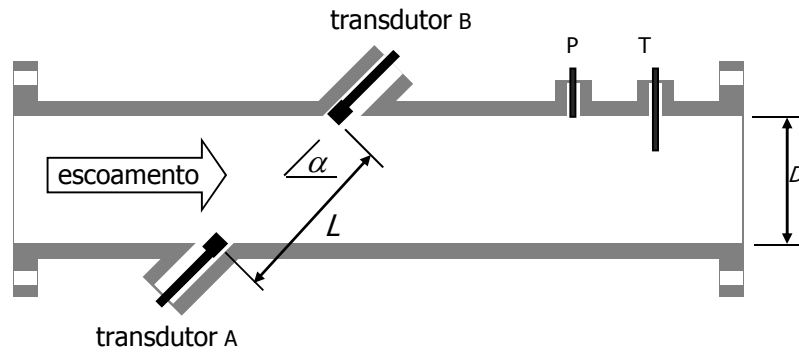


Figura 3.1: Desenho esquemático de um medidor de vazão ultrassônico por tempo de trânsito com indicação de alguns parâmetros de instalação e medição.

Conhecendo-se a distância entre A e B e os tempos t_{AB} e t_{BA} é possível calcular as velocidades medias de trânsito $\bar{v}_{AB}$ (a jusante) e $\bar{v}_{BA}$ (a montante) por meio das equações (3.1) e (3.2). O cálculo é realizado considerando-se que as velocidades serão iguais à velocidade do som no meio (fluido) somada ou subtraída à velocidade (V_{CA}) que representa a influência da velocidade do escoamento sobre o pulso ultrassônico.

$$\bar{v}_{AB} = \frac{L}{t_{AB}} = c + \bar{V}_{CA} \quad (3.1)$$

$$\bar{v}_{BA} = \frac{L}{t_{BA}} = c - \bar{V}_{CA} \quad (3.2)$$

Matematicamente, as variáveis c e V_{CA} podem ser calculadas por meio da solução do sistema representado pelas equações (3.1) e (3.2). Conhecendo-se o diâmetro (D) da tubulação, é possível determinar a seguinte relação:

$$D = L \cdot \text{sen} \alpha \quad (3.3)$$

Então, resolvendo o sistema para c e V_{CA} são obtida as equações (3.4) e (3.5)

$$c = \frac{D}{2 \sin \alpha} \left(\frac{t_{AB} + t_{BA}}{t_{AB} \cdot t_{BA}} \right) \quad (3.4)$$

$$\bar{V}_{CA} = \frac{D}{2 \sin \alpha} \left(\frac{t_{BA} - t_{AB}}{t_{AB} \cdot t_{BA}} \right) \quad (3.5)$$

Devido ao princípio de medição, os medidores de vazão ultrassônicos por tempo de trânsito calculam c e $\bar{V}_{CA}$. A velocidade do som (c) é uma propriedade termodinâmica conhecida para uma grande quantidade de fluidos. Entretanto, $\bar{V}_{CA}$ é um parâmetro intrínseco desse tipo de medidor. Portanto, faz-se necessário apresentar uma definição formal da velocidade $\bar{V}_{CA}$, a qual é dada pela equação (3.6).

$$\bar{V}_{CA} = \frac{1}{L} \int_L \vec{v}(x, y, z) \cdot d\vec{L} \quad (3.6)$$

Pela definição apresentada na equação (3.6) pode-se concluir que $\bar{V}_{CA}$ é o valor médio, ao longo do caminho acústico, da velocidade do escoamento projetada sobre o caminho acústico. Contudo, para o cálculo da vazão é necessário a velocidade média na direção principal do escoamento (perpendicular à seção transversal da tubulação). Dessa forma a velocidade $\bar{V}$ é introduzida para representar a velocidade média do fluido sobre o caminho acústico na direção principal do fluxo. A relação entre $\bar{V}$ e $\bar{V}_{CA}$ é dada pela equação (3.7).

$$\bar{V} = \frac{\bar{V}_{CA}}{\cos \alpha} \quad (3.7)$$

O cálculo da vazão volumétrica é dado pela equação (3.8), onde $\bar{v}_m$ representa a velocidade média do escoamento através da seção transversal da tubulação a qual possui uma área A .

$$\dot{Q} = \bar{v}_m \cdot A \quad (3.8)$$

Desse for há a necessidade de uma relação entre $\bar{u}_m$ e $\bar{V}$ para que seja possível o cálculo da vazão. Essa é uma relação entre duas diferentes médias de uma mesma variável: $\bar{V}$ representa a velocidade média do escoamento ao longo do caminho acústico e $\bar{u}_m$ representa a velocidade média do perfil de velocidade que atravessa a seção transversal. Portanto, o medidor ultrassônico utiliza um fator k para relacionar essa duas médias, de acordo com a equação (3.9).

$$k = \frac{\bar{v}_m}{\bar{V}} \quad (3.9)$$

O fator k , também chamado de fator de correção, como apresentado na equação (3.9), é definido em AGA 9 e também é utilizado pela norma ABNT.

Uma vez que a área da seção transversal da tubulação pode ser expressa por $\pi D^2/4$, a vazão volumétrica ($\dot{Q}$) pode ser obtida substituindo-se as equações (3.5) e (3.9) na equação (3.8), resultando na equação (3.10).

$$\dot{Q} = k \frac{\pi D^3}{4 \sin 2\alpha} \left(\frac{t_{BA} - t_{AB}}{t_{AB} \cdot t_{BA}} \right) \quad (3.10)$$

Entretanto, após uma rápida análise conclui-se que Q e k são variáveis desconhecidas. Como o objetivo principal é a obtenção da vazão volumétrica, o fator k deve ser conhecido. A determinação de k será discutida na próxima seção deste trabalho.

3.2 Fator de Correção (k)

O conhecimento preciso do fator k é fundamental para se garantir uma medição de vazão com precisão. Matematicamente o k pode ser definido de acordo com a formulação geral dada pela equação (3.11)

$$k = \frac{\bar{v}_m}{\bar{V}} = \frac{\bar{v}_m}{\frac{\bar{V}_{CA}}{\cos \alpha}} = \frac{\frac{1}{A} \int_A \vec{v}(x, y, z) \cdot d\vec{A}}{\frac{1}{\cos \alpha} \frac{1}{L} \int_L \vec{v}(x, y, z) \cdot d\vec{L}} \quad (3.11)$$

Analisando o a integral do numerador da equação (3.11) conclui-se que as componentes v e w do vetor velocidade não exercem influência sobre o valor do fator k , uma vez que o perfil de velocidade é projetado na direção do vetor unitário de área. Entretanto, essas mesmas componentes podem afetar a integral do denominador, pois a projeção se dá na direção do caminho acústico. Sendo assim os ângulos α e θ , sendo o segundo definido como o ângulo de montagem dos transdutores em relação à vertical. Dessa forma Martins (2012) propõe que essa integral seja representada de acordo com a equação (3.12).

$$\bar{V}_{CA} = \frac{1}{L} \left(\cos \alpha \int_L \bar{u} dL + \sin \alpha \cos \theta \int_L \bar{v} dL + \sin \alpha \sin \theta \int_L \bar{w} dL \right) \quad (3.12)$$

Martins (2012), recomenda, ainda, que a equação (3.12) seja resolvida por meio da aplicação da Regra do Trapézio (Frederico, 2007). A formulação geral para a integração numérica é então apresentada pela equação (3.13).

$$\bar{V} = \frac{\bar{V}_{CA}}{\cos \alpha} = \frac{1}{L} \sum_{p=2}^{N+1} \left[\frac{(\bar{u}_p + \bar{u}_{p-1})}{2} + \frac{(\bar{v}_p + \bar{v}_{p-1})}{2} \tan \alpha \cos \theta + \frac{(\bar{w}_p + \bar{w}_{p-1})}{2} \tan \alpha \sin \theta \right] \Delta L \quad (3.13)$$

Onde

- N é o número de pontos da integração
- o subscrito p indica o valor da componente da velocidade no ponto p -ésimo da interação

- ΔL é dado por $L_p - L_{p-1}$

Uma outra forma de se obter o fator de calibração é sugerida pela AGA Report N° 9 e que também é recomendada pelo órgão de regulação brasileiro (ABNT). O procedimento proposto não considera a influência das componentes v e w . Portanto a equação (3.11) pode tomar a forma da equação (3.14)

$$k = \frac{\frac{1}{A} \int_A \bar{u} dA}{\frac{1}{L} \int_L \bar{u} dL} \quad (3.14)$$

Percebe-se que para o cálculo do fator k é necessário o conhecimento do perfil de velocidade, o qual é desconhecido. Diante disso, a AGA 9 propõem a utilização de um perfil completamente desenvolvido. A sugestão é de que seja adotado o perfil proposto por Nikuradse, representado pela equação (3.15).

$$\bar{u}(r) = \bar{u}_{max} \left(1 - \left|\frac{r}{R}\right|\right)^{\frac{1}{n}} \quad (3.15)$$

Onde

- $\bar{u}_{max}$ é a velocidade máxima [m/s];
- r é a coordenada radial [m];
- R é o raio interno da tubulação [m];
- n é o expoente de *power law* [-];

Uma vez que o perfil de velocidade considerado é completamente desenvolvido, ou seja, é constante ao longo do comprimento longitudinal da tubulação, então a integral do denominador da equação (3.14), que representa a velocidade média do escoamento sobre o caminho acústico, pode ser representada pela integral sobre o diâmetro. Assim, o fator k pode ser calculado pela equação (3.16).

$$k = \frac{\frac{1}{A} \int_A \bar{u}_{max} \left(1 - \left|\frac{r}{R}\right|\right)^{\frac{1}{n}}}{\frac{1}{D} \int_D \bar{u}_{max} \left(1 - \left|\frac{r}{R}\right|\right)^{\frac{1}{n}}} = \frac{\bar{u}_{max} \frac{2n^2}{(n+1)(2n+1)}}{\bar{u}_{max} \frac{n}{(n+1)}} = \frac{2n}{2n+1} \quad (3.16)$$

O expoente n é dado em função do número de Reynolds e da rugosidade da tubulação. Após realizar um estudo o comportamento do desse expoente, Prandtl propôs a chamada “lei universal do atrito para tubos lisos”, apresentada pela equação (3.17)

$$n = 2,0 \log \left(\frac{Re}{n} \right) - 0,8 \quad (3.17)$$

Substituindo a equação (3.16) na equação (3.10) obtém-se uma relação direta entre a vazão volumétrica e n .

$$\dot{Q} = \frac{\pi D^3}{4 \sin 2\alpha} \left(\frac{t_{BA} - t_{AB}}{t_{AB} \cdot t_{BA}} \right) \left(\frac{2n}{2n+1} \right) \quad (3.18)$$

A AGA Report N° 9 ainda traz uma aproximação para se obter o fator k diretamente em função do número de Reynolds.

$$k \approx \frac{1}{1,12 - 0,011 \log Re} \quad (3.19)$$

Diante de todo o equacionamento apresentado fica evidente a importância do conhecimento do perfil de velocidade presente na seção de medição de vazão para que seja possível a realização de uma calibração que garanta boa confiabilidade e baixas incertezas.

4 Metodologia

4.1 Geometria

A primeira etapa para a realização de uma simulação é a construção da geometria a qual corresponde o domínio do problema. Para isso foi utilizado o software DesingModeler. Na figura 4.1 pode ser observado a geometria criada com suas dimensões relativas ao diâmetro e a posição da seção de medição do medidor ultrassônico.

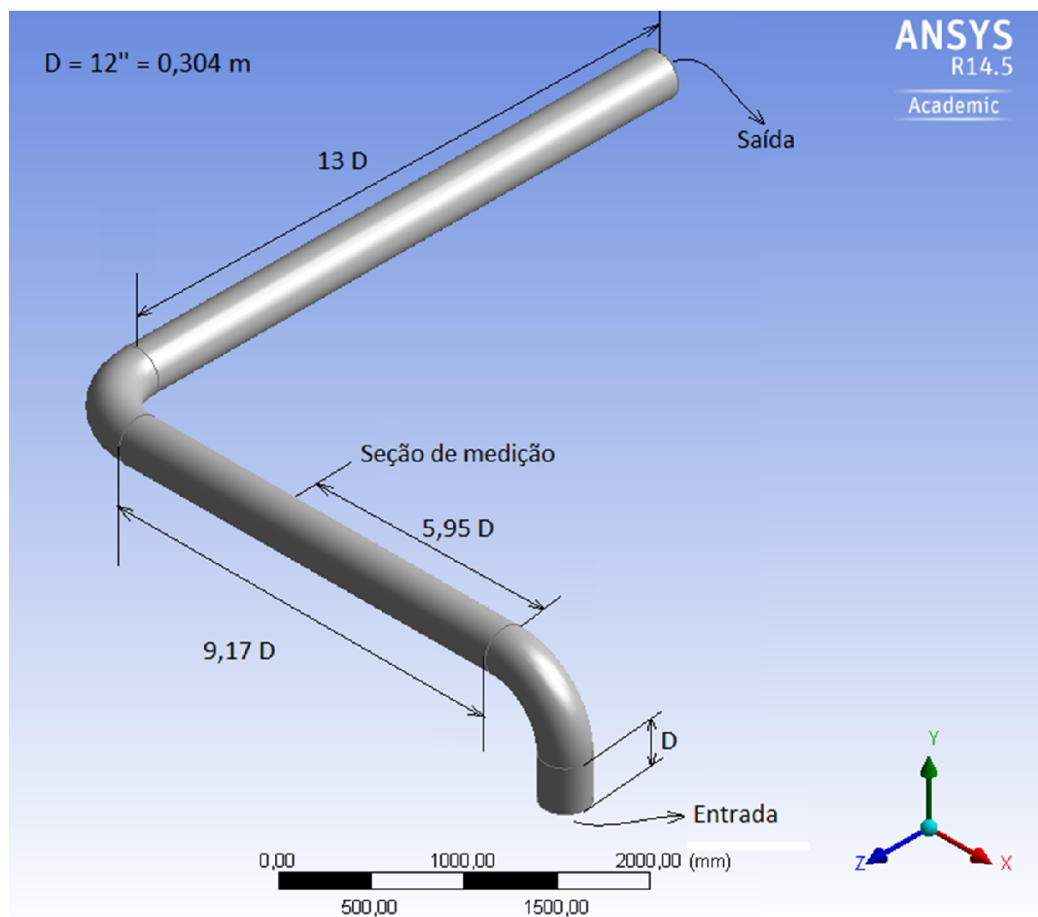


Figura 4.1 Geometria da instalação simulada

Tal geometria corresponde à uma tubulação responsável pelo transporte de gás em uma instalação de um queimador pertencente à uma plataforma de exploração de petróleo localizada na costa brasileira. O arranjo localiza-se logo após um tanque

separador e é composto por uma tubulação de 12" de diâmetro com duas curvas de 90°, em planos perpendiculares, entre as quais há um medidor de vazão ultrassônico por tempo de trânsito.

4.2 Elaboração da Malha

Após a construção da geometria a etapa a ser executada é a criação da malha computacional que será utilizada na simulação numérica. Para o caso estudado utilizou-se o software *Meshing*.

Em uma malha a ser aplicada em uma simulação a partir da técnica DNS é importante que a mesma atenda parâmetros dimensionais. Para o caso em análise foi determinado que os menores elementos da malha devem possuir uma dimensão menor que 0,53 mm, valor este que corresponde à escala de comprimento de Kolmogorov a qual pode ser estimada com os dados apresentados da seção 4.3 deste trabalho.

A região em que encontra-se as menores dimensões da malha localiza-se nas proximidades da parede (onde ocorrem os vórtices de menor escala), para se alcançar essas dimensões foi utilizado a ferramenta *inflation* que permite realizar o refinamento da malha próximo à parede do duto. O resultado desse procedimento pode ser observado na figura 4.2 e na figura 4.3 é apresentado uma ampliação da malha nas proximidades da parede da tubulação.

Vale ressaltar que a faixa a ser refinada nas proximidades da parede não possui uma dimensão bem definida, uma vez que essa distância é ainda uma questão discutida por pesquisadores dentro do âmbito da ciência. Portanto, nesse quesito, ainda há questionamentos a serem feitos, porém essa discussão não faz parte do escopo deste trabalho. Dessa forma aplicou-se um refinamento da ordem de $\eta/3$ a fim de garantir que os efeitos de menor escala da turbulência fossem captados.

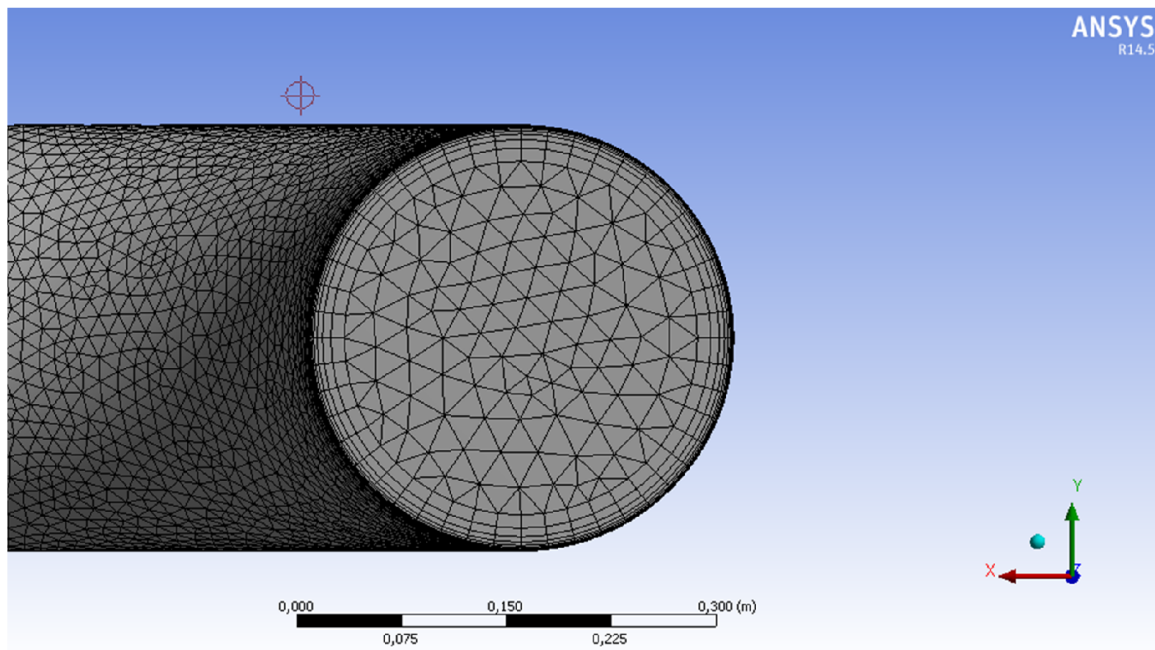


Figura 4.2 Aspecto da malha com a aplicação da ferramenta *inflation*

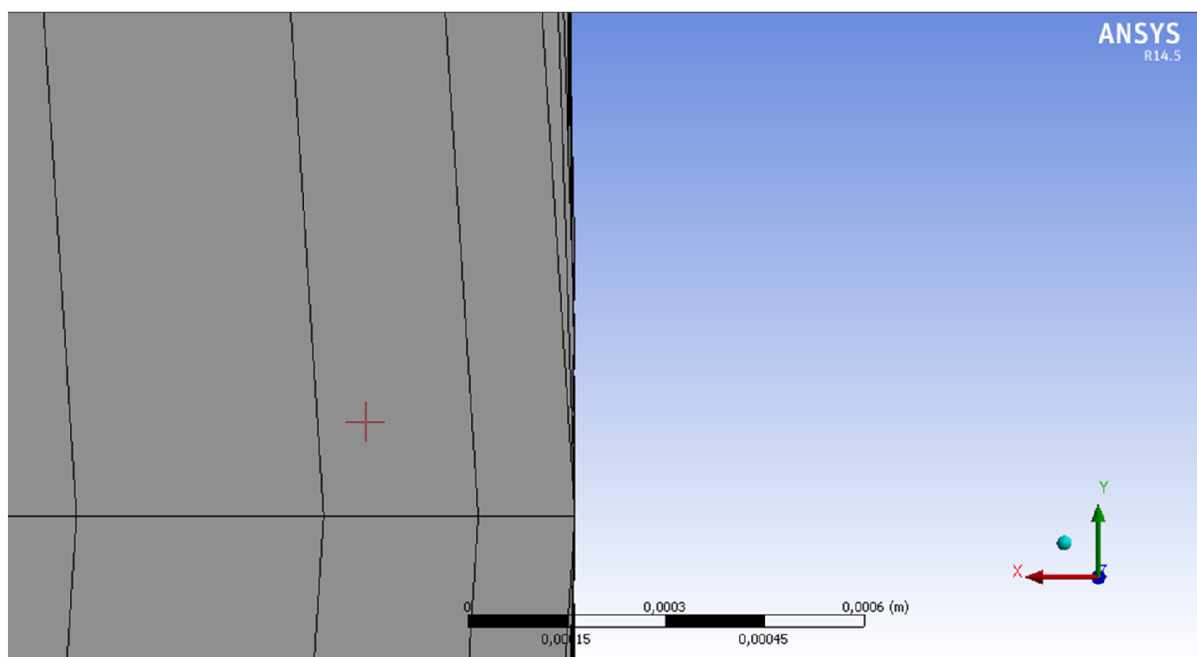


Figura 4.3 Dimensão dos volumes de controle diferencial próximo à parede

Utilizou-se, ainda, outra ferramenta de refinamento de malha: *sphere of influence*, a qual promove uma redução do tamanho dos elementos que estão contidos em um determinado volume (esfera de influência). Essa técnica foi utilizada nas curvas para

que o efeito das mesmas sobre o escoamento fosse captado com maior precisão. O resultado desse procedimento pode ser observado na figura 4.4.

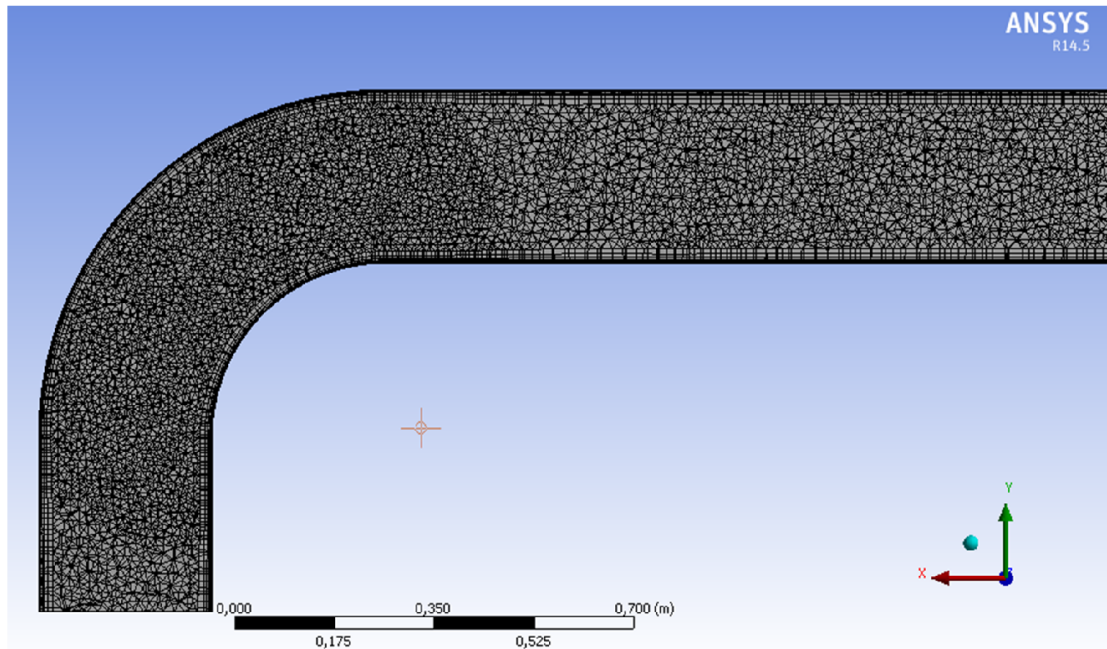


Figura 4.4 Refinamento nas curvas

O procedimento de elaboração de malha para as simulações realizadas com o auxílio de modelos dos turbulência $k-\epsilon$ e RNG $k-\epsilon$ seguiu as mesmas etapas descritas para a simulação DNS, porem a malha utilizada foi mais refinada, com aproximadamente 1 milhão de nós, para a obtenção de resultados de maior confiabilidade, de acordo como demonstrou Martins (2009) para a mesma geometria.

4.3 Pré-processamento

É nesta etapa que se entra com todas as informações necessárias para a realização do processamento o qual será executado a partir do software Fluent. Os dados de entrada são relativos:

- a) ao fluido: o fluido escolhido para a simulação foi o ar o qual já era disponível na biblioteca do software (Fluent) com todas suas propriedades definidas, como viscosidade e densidade;

- b) às condições de contorno: na modelagem do problema físico foi imposto como condições de contorno a velocidade de entrada constante com perfil uniforme e saída com pressão manométrica igual a zero;
- c) aos fenômenos que ocorrem no escoamento: o único fenômeno que ocorre no escoamento é devido à velocidade imposta na entrada não havendo, portanto, troca de calor com o meio externo, ou seja, o fenômeno é adiabático;
- d) à solução e ao critério de convergência: critério de convergência escolhido foi de 10^{-5} , além disso, para a solução do caso DNS o passo de tempo determinado foi $0,008 \text{ s} \approx \tau/2$ com dez iterações por passo de tempo.

Considerando a simulação a realizada pelo método DNS, foi definido uma velocidade de entrada igual a $0,28 \text{ m/s}$ que corresponde a um número de Reynolds baseado no diâmetro da tubulação igual a $Re_D = 4756,9$ o que garante que o escoamento será turbulento, uma vez que a transição de laminar para turbulento se dá próximo ao $Re_D = 2300$ (Fox e McDonald, 2010). A baixa velocidade de entrada adotada deve-se a limitação computacional, como mencionado na seção 2.2 deste trabalho, pois o refinamento da malha é estimado de acordo com o número de Reynolds, de forma que quanto maior for Re mais refinada deve ser a malha e menor deve ser os passos de tempo da simulação. Na tabela 4.1 estão alguns dados de entrada utilizados na simulação. Com esses dados é possível calcular as escalas de Kolmogorov aplicando-se as equações 2.1 e 2.2, obtendo-se dessa forma $\tau = 0,01574 \text{ s}$ e $\eta = 0,53 \text{ mm}$. Vale ressaltar que o passo de tempo e o refinamento da malha próximo a parede da tubulação estão abaixo da metade dos valores das escalas de Kolmogorov garantindo que todas as escalas de tempo e espaços do fenômeno serão captadas.

Tabela 4.1 Dados de entrada e propriedades do fluido

Fluido	Ar, 25°C
Densidade (kg/m^3)	1,225
Viscosidade (kg/m.s)	$1,79 \times 10^{-5}$
Velocidade na entrada (m/s)	0,28
Passo de tempo (s)	0,008
Critério de convergência	10^{-5}

Nas simulações realizadas com a utilização dos modelos de turbulência o fluido selecionado é o indicado na tabela 4.1 e o trata-se de um procedimento com a condição de regime permanente e a partida do procedimento computacional . Foram realizadas simulações para os números de Reynolds 1×10^4 , 1×10^5 e 6×10^5 .

4.4 Processamento

O procedimento de processamento foi realizado utilizando-se o software *Fluent*. Essa etapa ocorreu da seguinte forma para a simulação DNS: inicialmente utilizou-se o modelo de turbulência k- ϵ e a condição de regime permanente, assim foi possível estimar as propriedades do escoamento em todo o domínio. A partir dessa estimativa a técnica DNS foi aplicada, ou seja, a análise passou a ser transiente e sem modelo de turbulência. O processamento foi realizado no cluster, disponível no Laboratório de Fenômenos de Transporte Computacional (LFTC) da Universidade Federal do Espírito Santo, o qual tem disponível 32 núcleos. O tempo necessário para se obter 450 segundos de simulação do fluxo foi de aproximadamente 4 dias.

4.5 Pós-processamento

O software utilizado na etapa de pós-processamento foi o CFX-Post. A partir dos dados salvos a cada 10 passos de tempo da simulação (essa medida foi tomada devido a limitação para o armazenamento dos dados) foi possível a elaboração de gráficos e vídeos que caracterizam de forma detalhada os fenômenos do escoamento. Onde fica evidente a não formação de um perfil de velocidade completamente desenvolvido e o caráter transiente do fenômeno.

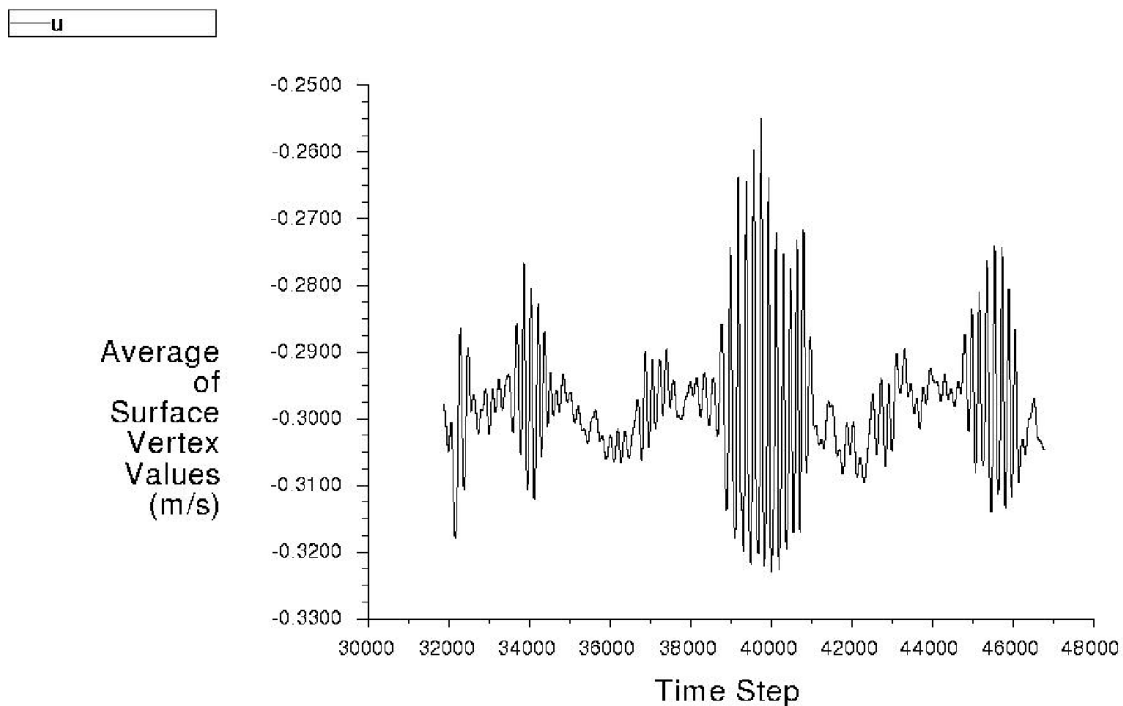
5 Resultados e Discussão

5.1 Caracterização do Perfil de Escoamento

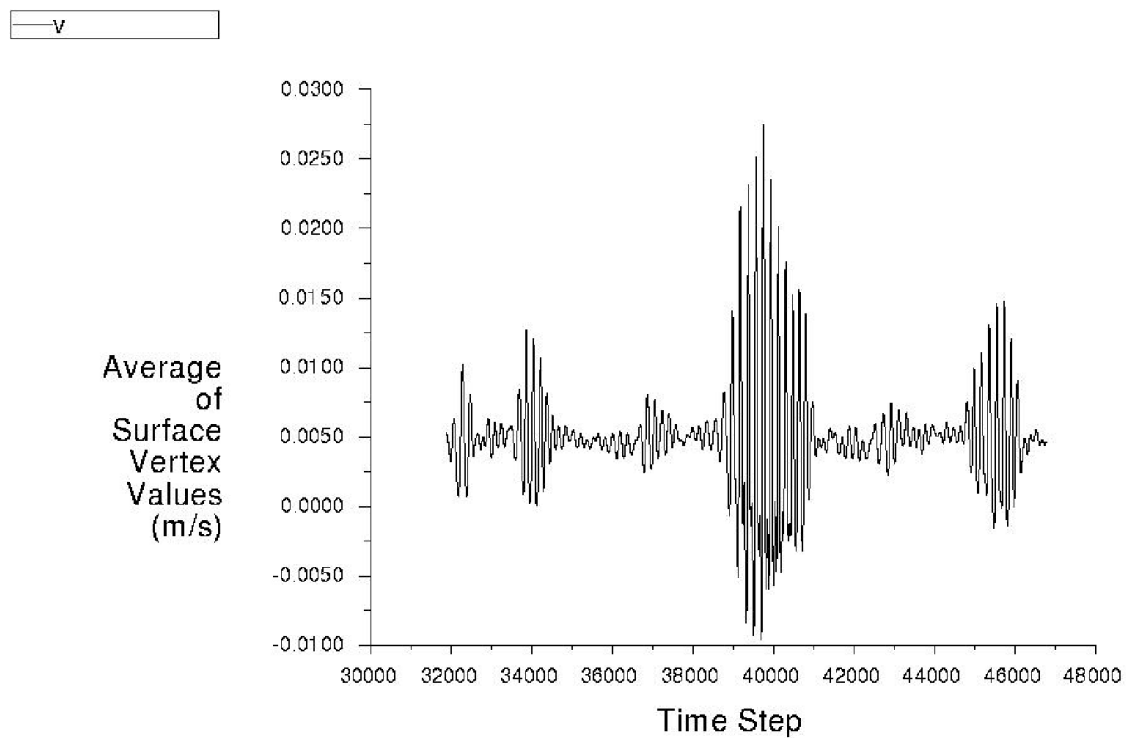
Os resultados apresentados a seguir são todos relativos à seção de medição que fica localizada a 5,95D após a primeira curva, considerando aos dados obtidos na simulação DNS.

Abaixo, nas figuras 5.1 (a), (b) e (c), observa-se o comportamento aleatório das componentes u , v e w provenientes da projeção nos eixos x , y e z , respectivamente, no ponto central da seção de medição, comportamento esse que não é possível ser captado em uma simulação a partir de modelos de turbulência com a condição de regime permanente.

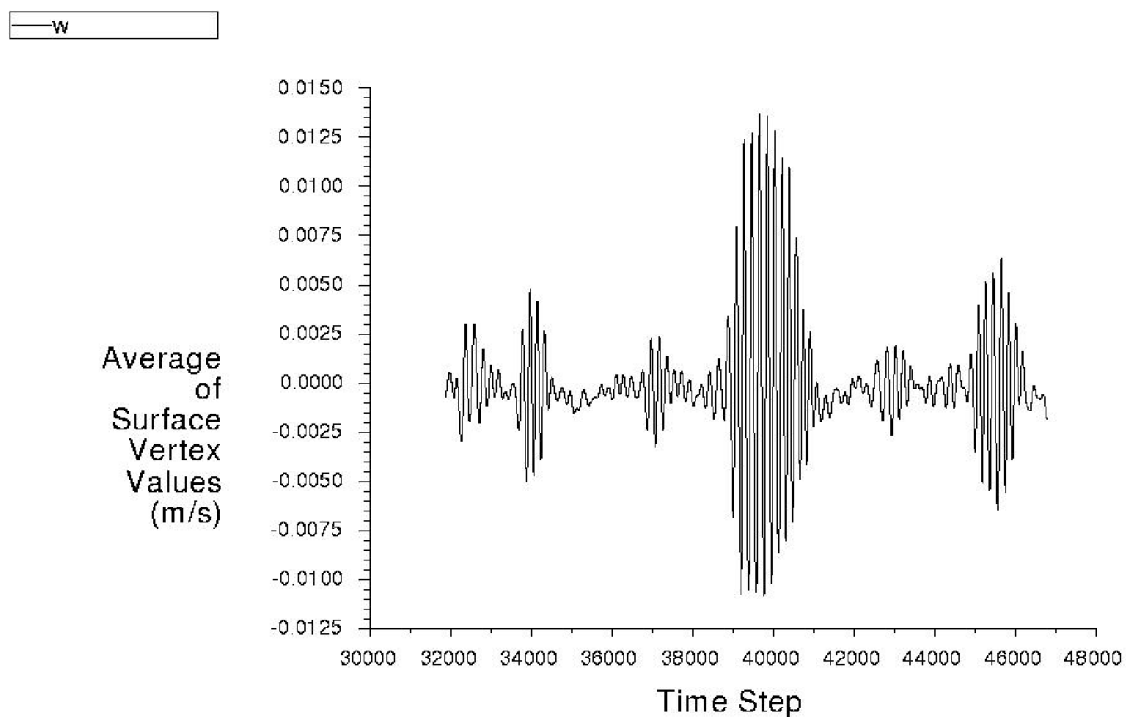
É possível perceber que apesar da aleatoriedade do fenômeno há um comportamento característico onde ocorre um aumento periódico da amplitude de variação da velocidade simultaneamente nas três componentes. Este fenômeno é, possivelmente, causado por vórtices que surgem intermitentemente criados pela presença de acidentes de linha.



(a)



(b)

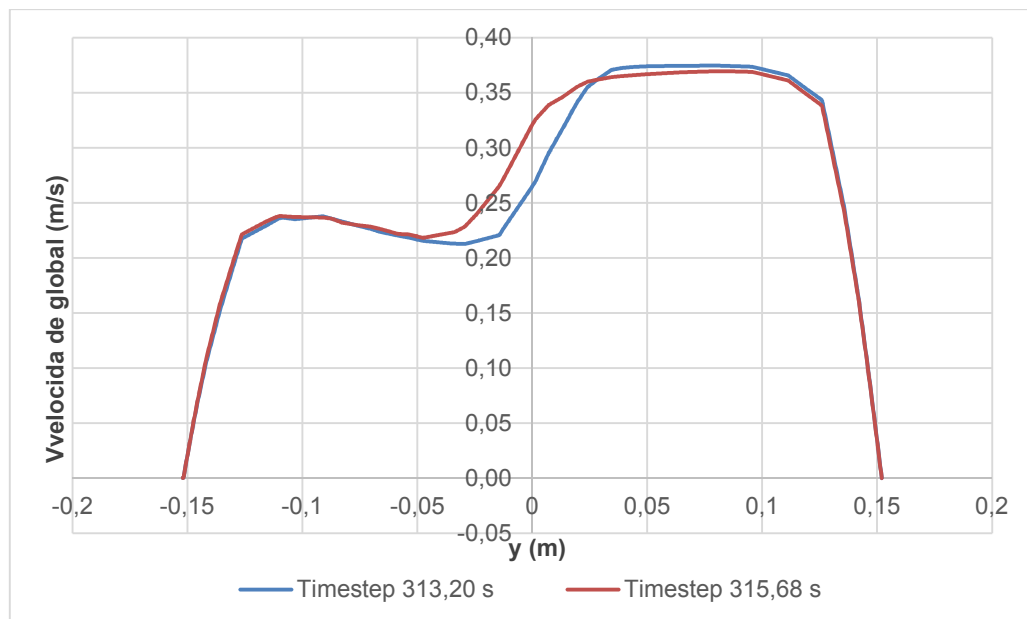


(c)

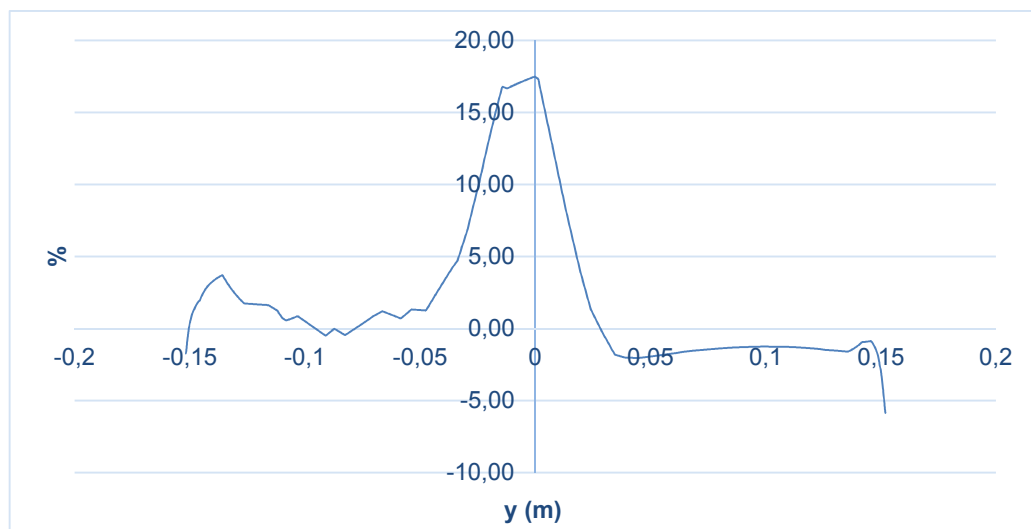
Figura 5.1 Velocidade no centro da seção de medição: (a) componente u ; (b) componente v ; (c) componente w

A seguir, nas figuras 5.2 (a) e 5.3 (a), tem-se a comparação dos perfis de velocidade nas direções dos eixos y (vertical) e z (horizontal) em dois instantes separados por

2,48 segundos. Devido à flutuação característica da turbulência, é evidente a diferença entre as curvas a qual pode ser constada nas figuras 5.2 (b) e 5.3 (b) onde estão plotadas as diferenças percentuais entre os passos de tempo, que demonstram diferenças acima de 10% para a região central da seção de medição, onde ocorre a maior taxa de transporte do fluido. Portanto é possível afirmar que as flutuações geram mudanças significativas no perfil de velocidade, acarretando, por consequência, mudanças no fator k de um medidor ultrassônico.

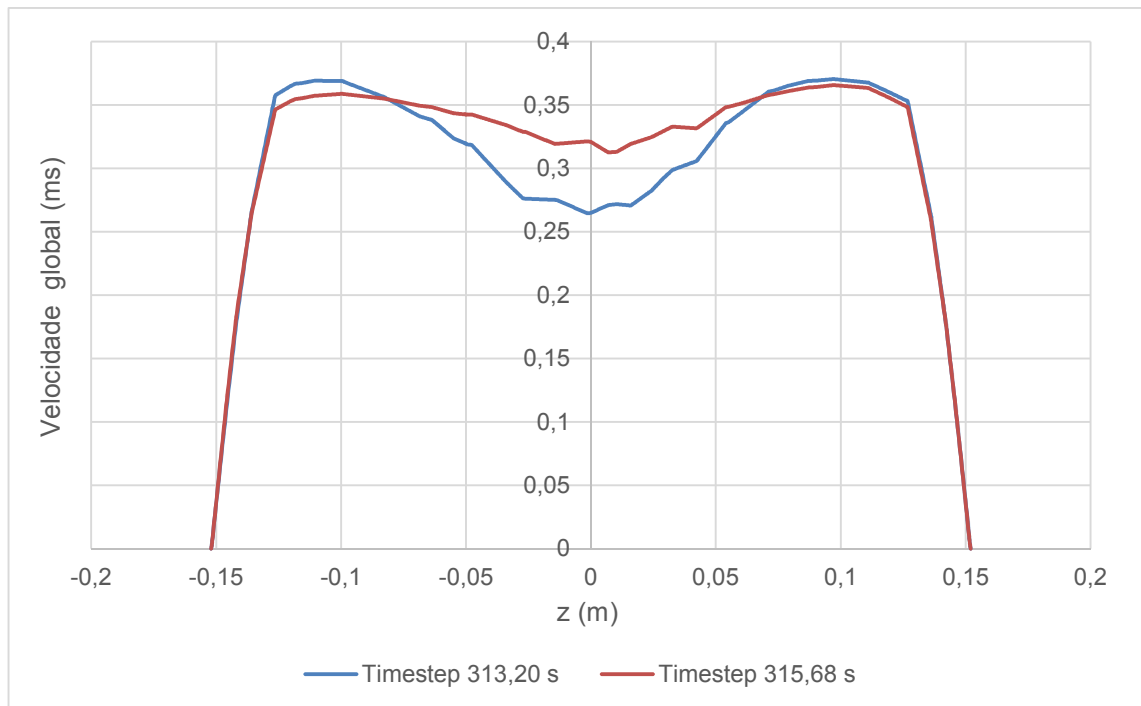


(a)

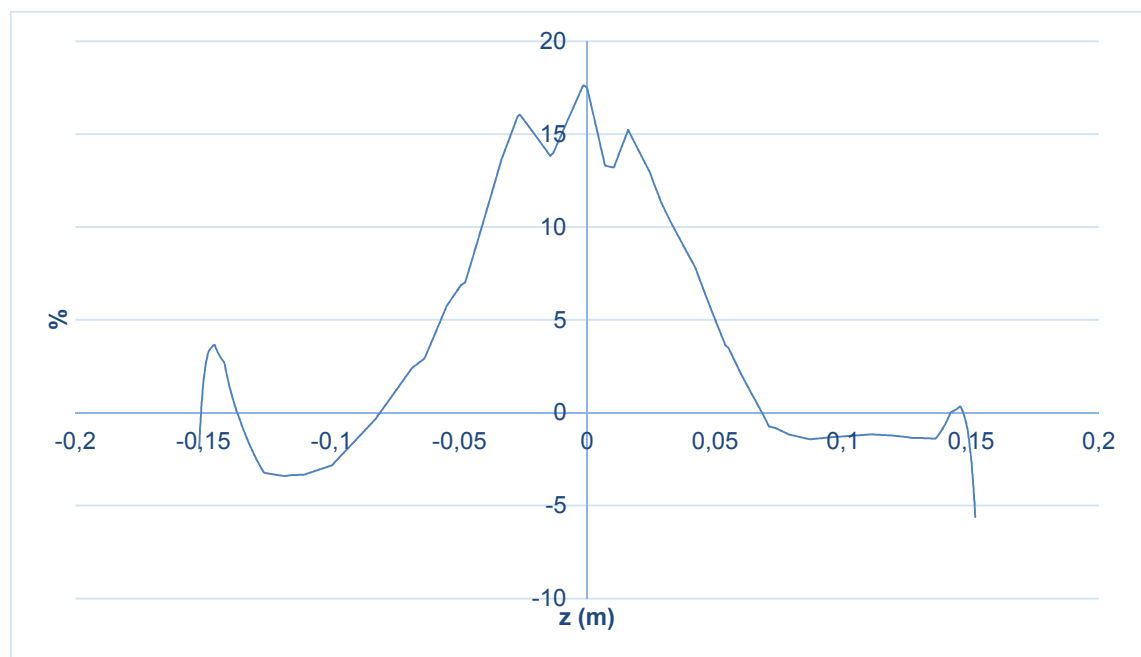


(b)

Figura 5.2 Comparação entre diferentes passos de tempo: (a) Perfis velocidade no plano vertical; (b) Diferença percentual entre passos de tempo



(a)



(b)

Figura 5.3 Comparação entre diferentes passos de tempo: (a) Perfis velocidade no plano horizontal; (b) Diferença percentual entre passos de tempo

As figuras 5.4 e 5.5 trazem o mapa da velocidade e o perfil de velocidade em 3D, respectivamente, as quais mostram a assimetria da distribuição de velocidade.

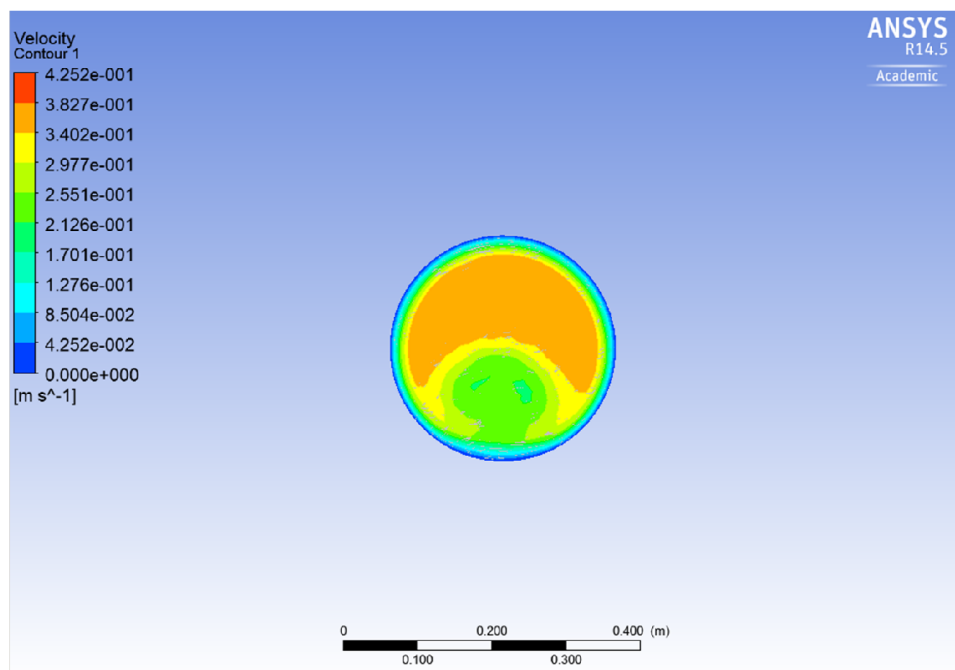


Figura 5.4 Mapa de contorno da velocidade global na seção de medição

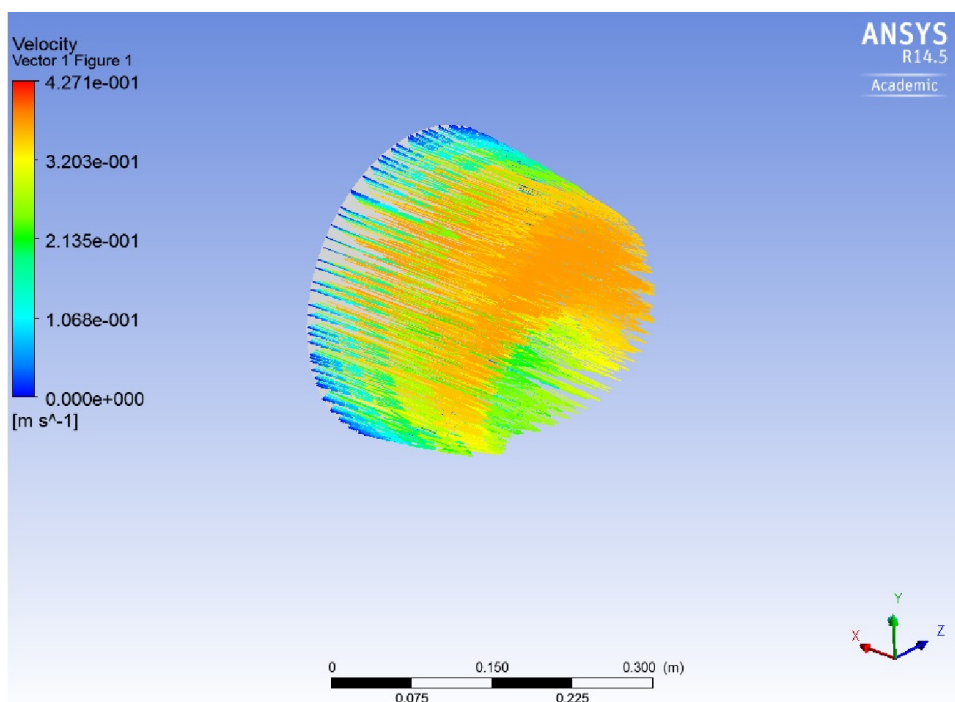


Figura 5.5 Perfil de velocidade na seção de medição

A figura 5.6 mostra as componentes tangenciais da velocidade no plano de medição que formam dois grandes vórtices dominantes.

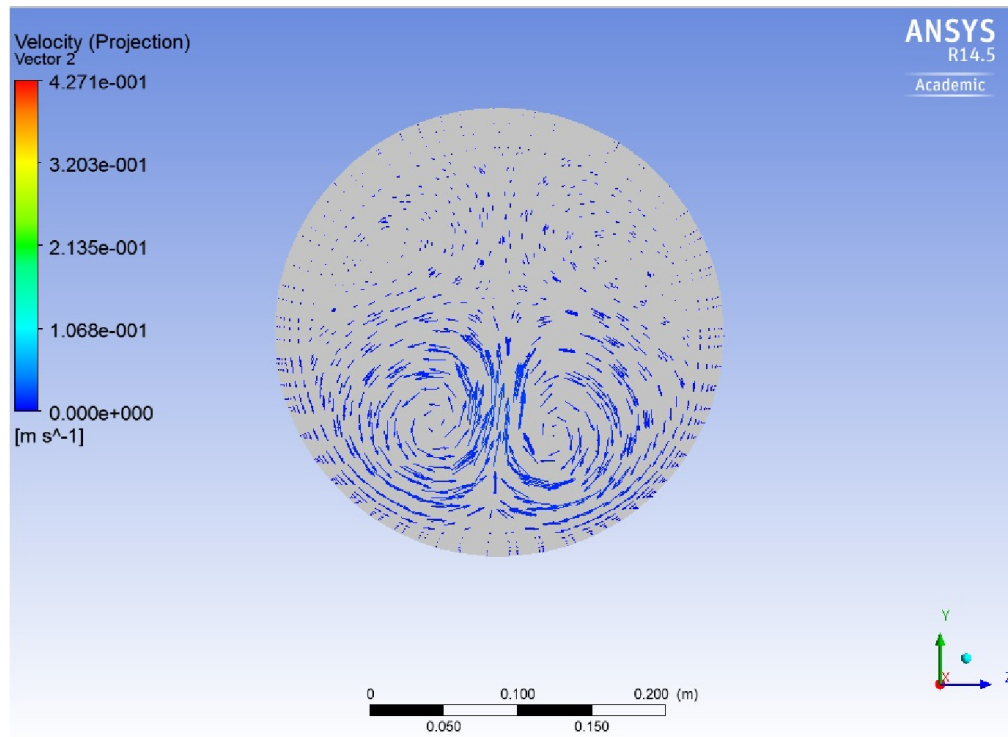


Figura 5.6 Componente tangencial da velocidade global

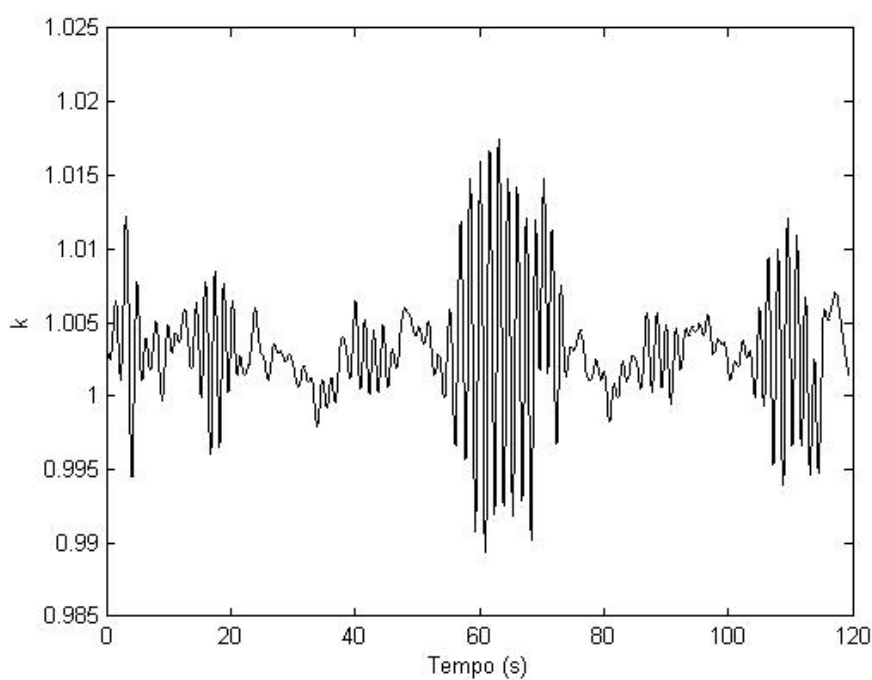
5.2 Cálculo do Fator de Correção

A seguir serão apresentados resultados referentes ao cálculo do fator de correção seguindo as metodologias propostas por Martins (2012), utilizando a integração numérica de dados obtidos nas simulações, e pela AGA Report N° 9.

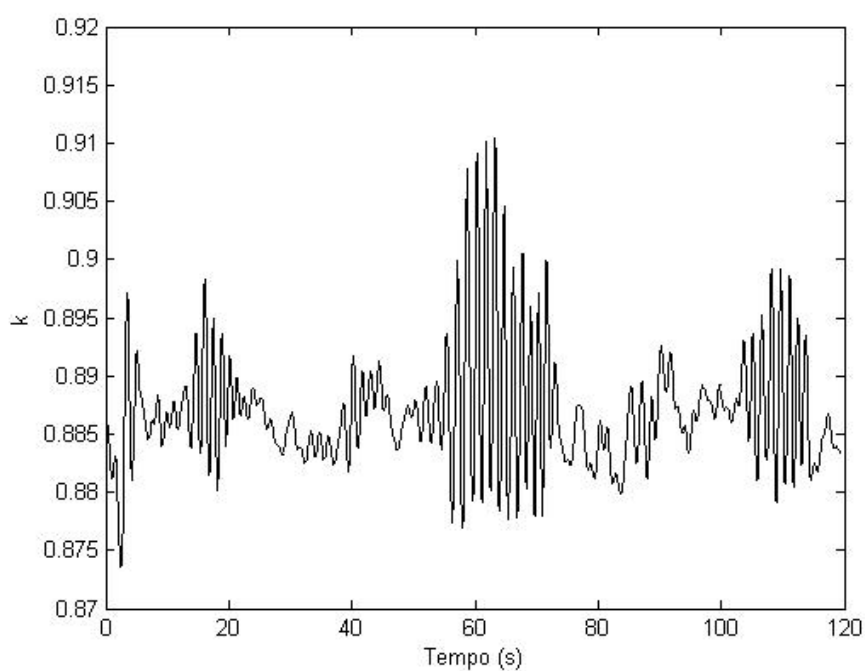
5.2.1 Fator de Correção (k) x DNS

A principal motivação deste trabalho para a adoção do método de simulação numérica direta, DNS, é a possibilidade de obter-se informações sobre as características transientes do escoamento turbulento, ou seja, as flutuações que não são previstas por modelos de turbulência. De acordo com os resultados apresentados na seção 5.1 deste trabalho, que evidenciam o caráter transiente do escoamento estudado, e

considerando o princípio de operação do medidor ultrassônico por tempo de trânsito, foi possível caracterizar o comportamento do fator k em função do tempo. As figuras 5.7 (a), (b), (c), e (d) apresentam a variação do fator k em função do tempo para os ângulos $\theta = 0^\circ$, 90° , 180° e 270° de montagem dos transdutores.



(a)



(b)

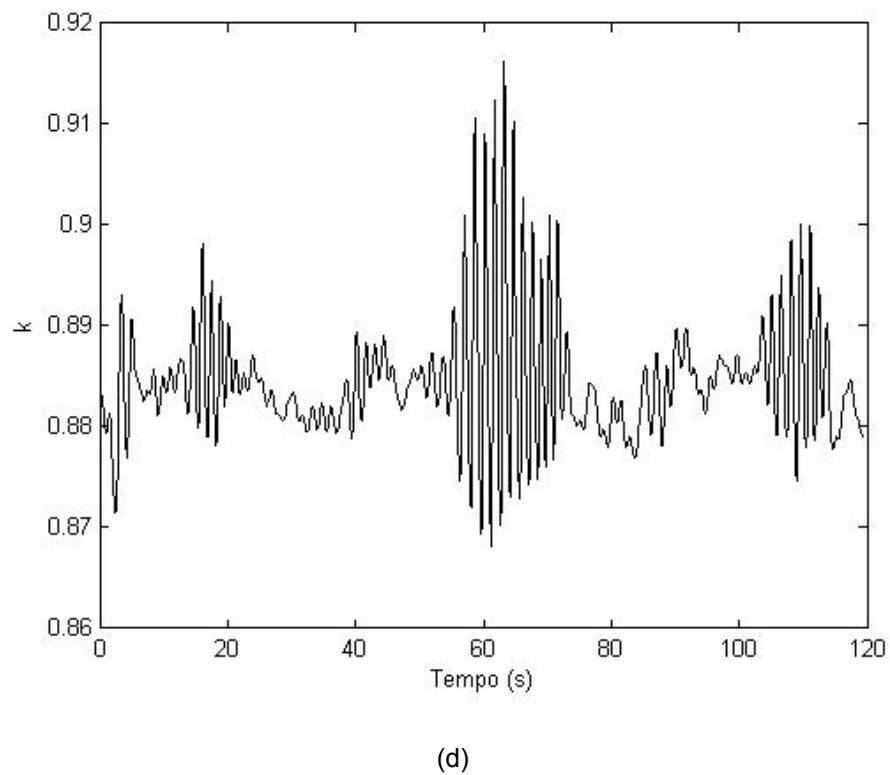
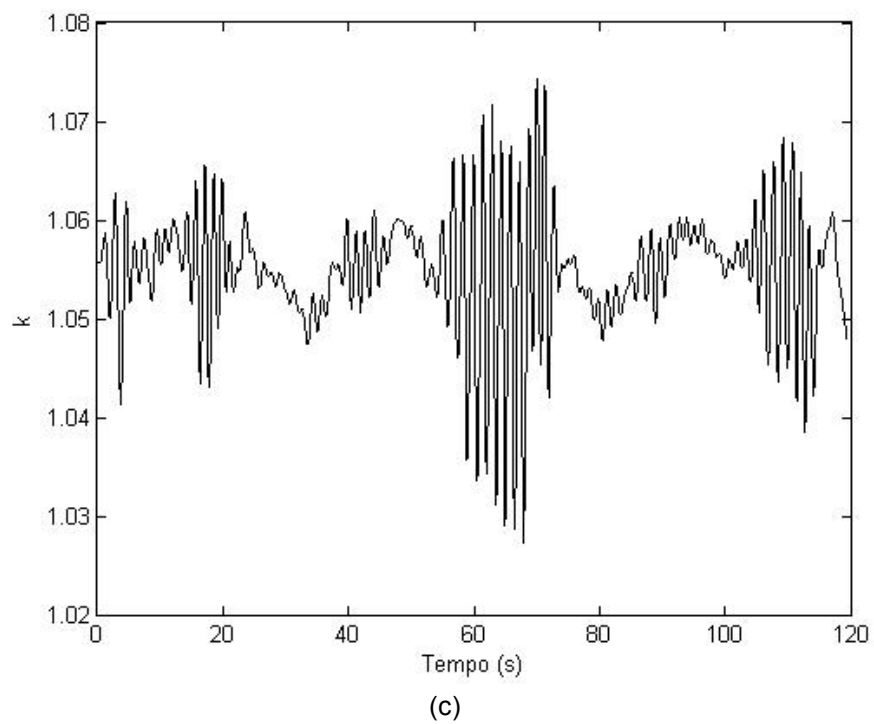


Figura 5.7 - Comportamento transiente do fator de correção (k): (a) $\theta=0^\circ$; (b) $\theta=90^\circ$; (c) $\theta=180^\circ$ e $\theta=270^\circ$

É possível perceber que o comportamento transiente do fato k é semelhante ao da velocidade. Confirmando sua dependência em relação ao perfil de velocidade. A tabela 5.1 traz valores do fator de correção em dois instantes de tempo, separados por 2,48 segundos, para casos de diferentes ângulos de montagem. A diferença percentual dos valores é significativa, pois a vazão é calculada pela equação (3.2). Então as variações no valor do fator k acarretam em variações de mesma magnitude no valor da vazão computada. Logo, tomando como exemplo o caso de $\theta = 270^\circ$, a medição vazão entre os instantes apresentados terá uma diferença de 8,04% somente devido a flutuação da velocidade, caso o fator de k não seja corrigido.

Tabela 5.1 – Fator de correção calculados com dados da simulação DNS

Tempo (s)	DNS - Re = 4756,9			
	Ângulo θ			
	0°	90°	180°	270°
313,20 s	1,0121	0,8882	1,0635	0,9425
315,68 s	0,9727	0,8713	1,0644	0,8724
$\Delta\%$	4,05	1,94	-0,085	8,04

É importante também avaliar o desvio relativo, definido pela equação (5.1), do fator k calculado com os dados da simulação numérica em relação ao valor obtido pela metodologia indicada pela AGA Report N° 9. Essa comparação é apresentada na tabela 5.2. para valores máximo, mínimo e médio obtidos para um intervalo de tempo de 120 segundo. A figura 5.8 traz um gráfico com a distribuição desses valores em relação a curva do fator k analítico em função do número de Reynolds. Verifica-se que o arranjo com $\theta = 180^\circ$ corresponde à maior diferença, indicando que esse arranjo é a escolha menos indicada para instalação de um medidor calibrado de acordo com a AGA Report N° 9.

Tabela 5.2 – Desvio relativo dos fatores de correção máximo, mínimo e médio para diferentes ângulos de montagem, intervalo de tempo: 120 s

θ	DNS - Re = 4756,9						
	Analítico	$k_{\min}$	$\Delta\%_{\min}$	$k_{\max}$	$\Delta\%_{\max}$	k_{med}	$\Delta\%_{\text{med}}$
0°	0,926312375	0,9894	6,81	1,0175	9,84	1,0030	8,28
90°	0,926312375	0,8735	-5,70	0,9104	-1,72	0,8869	-4,25
180°	0,926312375	1,0273	10,90	1,0744	15,99	1,0548	13,87
270°	0,926312375	0,8682	-6,27	0,9162	-1,09	0,8844	-4,52

$$\Delta\% = 100 \left(\frac{k_{num} - k_{ref}}{k_{ref}} \right) \quad (5.1)$$

Onde

- $\Delta\%$ é o desvio relativo percentual
- k_{num} é o fator de correção calculado com dados da simulação
- k_{ref} é o fator de correção calculado de acordo com a AGA Report N°9

Vala ressaltar que a comparação dos valores calculados numericamente (Martins, 2012) e analiticamente é relevante, pois atualmente, na prática, a calibração dos medidores é feita com base nas condições ideais, ou seja, considerando o perfil de velocidade na seção de medição como turbulento completamente desenvolvido.

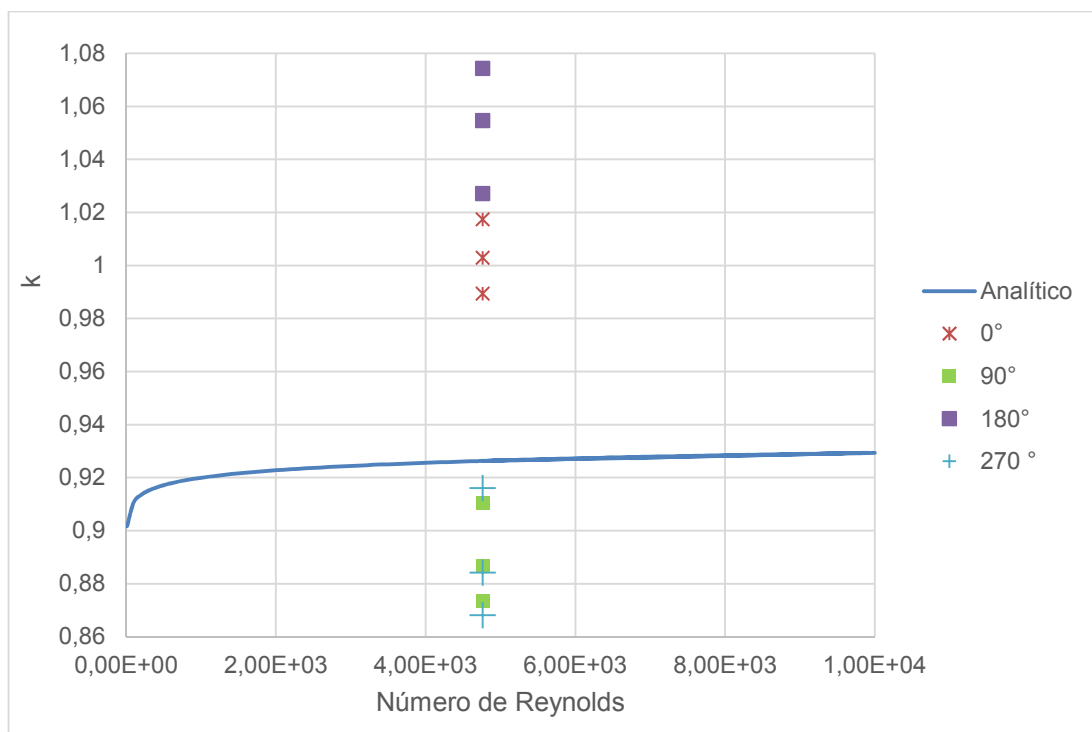


Figura 5.8 – Valores máximo, mínimo e médio do fator k para o caso DNS sobre a curva analítica

5.2.2 Fator de Correção (k) x Modelos de Turbulência

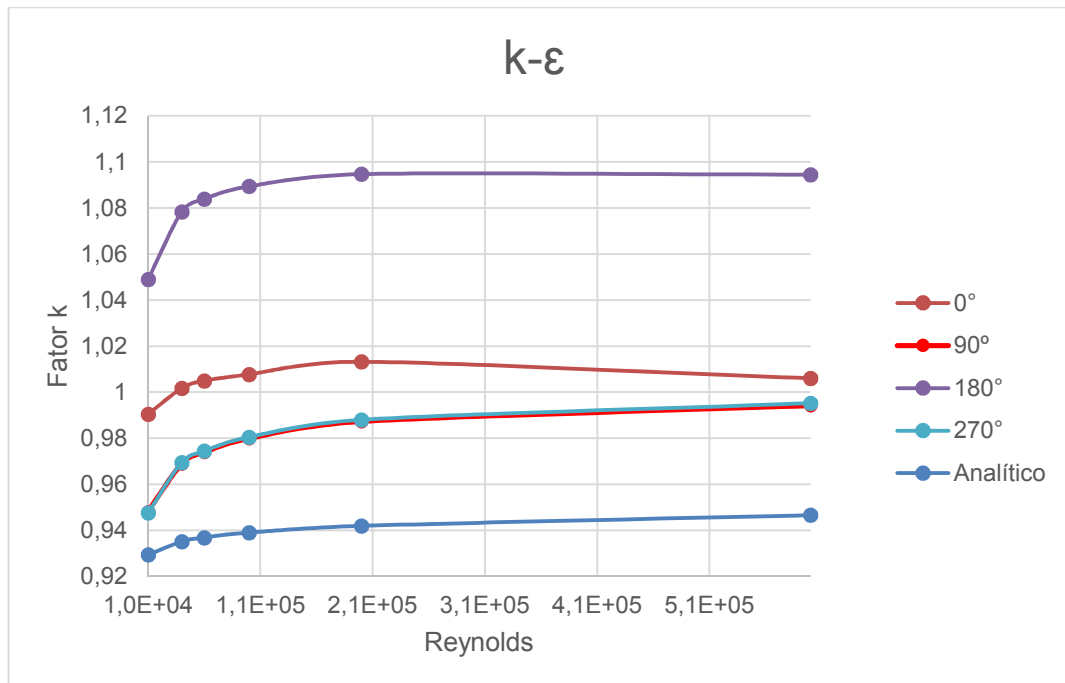
A seguir é apresentada a tabela 5.3 com valores do fator de correção calculados por integração numérica (Martins, 2012) e os respectivos desvios relativos, considerados dados das simulações com os modelos de turbulência k - ϵ e RNG k - ϵ . O comportamento observado é semelhante ao visto para o caso da simulação DNS, com os maiores desvios ocorrendo no arranjo com $\theta = 180^\circ$. Portanto, nesse quesito, pode-se afirmar que os resultados obtidos pelos modelos de turbulência são capazes de identificar, tanto quanto pelo método DNS, qual o arranjo de induz um maior desvio na medição.

Tabela 5.3 - Desvio relativo dos fatores de correção para diferentes Re e θ

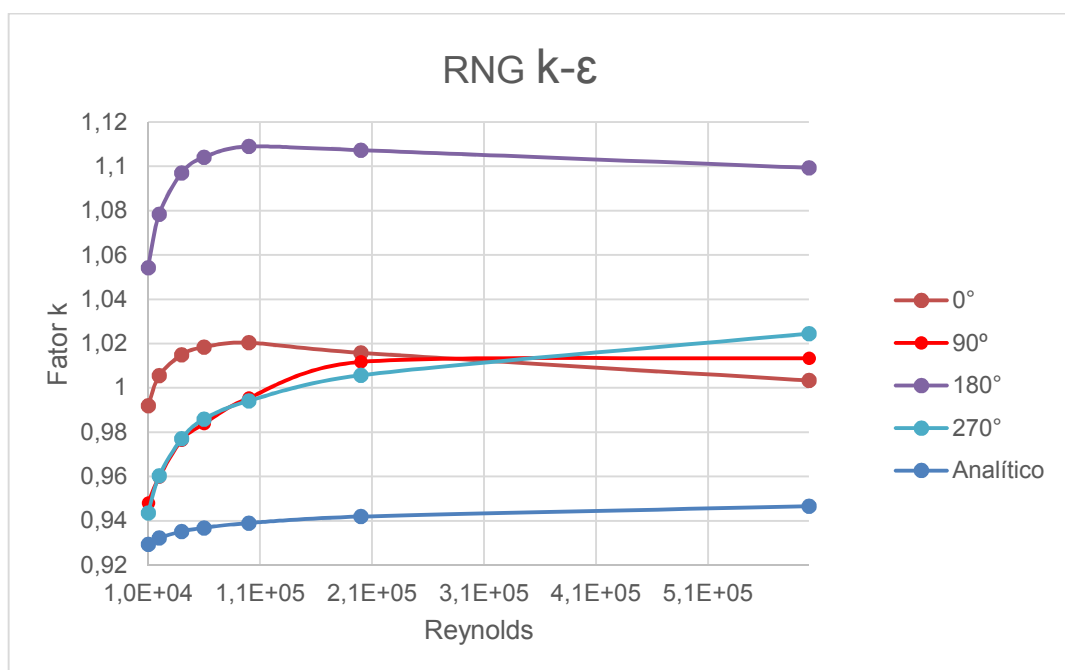
θ	Analítico	RNG	$\Delta\%_{\text{RNG}}$	k - ϵ	$\Delta\%_{k-\epsilon}$
$Re = 1 \times 10^4$					
0°	0,92936803	0,9919	6,73	0,9904	6,57
90°	0,92936803	0,9480	2,00	0,9473	1,93
180°	0,92936803	1,0542	13,43	1,0490	12,87
270°	0,92936803	0,9436	1,53	0,9476	1,96
$Re = 1 \times 10^5$					
0°	0,93896714	1,0204	8,67	1,0077	7,32
90°	0,93896714	0,9954	6,01	0,9799	4,36
180°	0,93896714	1,1090	18,11	1,0894	16,02
270°	0,93896714	0,9941	5,87	0,9805	4,42
$Re = 6 \times 10^5$					
0°	0,94657499	1,0033	5,99	1,0060	6,28
90°	0,94657499	1,0134	7,06	0,9942	5,03
180°	0,94657499	1,0993	16,13	1,0945	15,63
270°	0,94657499	1,0245	8,23	0,9952	5,14

As figuras 5.9 (a) e (b) mostram o comportamento do fator de correção em função do número de Reynolds para os modelos de turbulência k - ϵ e RNG k - ϵ comparados com curva analítica. É possível verificar que o perfil construído com dados das simulações

numéricas apresenta o mesmo comportamento do perfil analítico para os dois modelos.



(a)



(b)

Figura 5.9 - Curvas do fator k calculado com dados da simulação com modelo de turbulência: (a) k-ε; (b) RNG k-ε

6 Conclusão

Diante dos resultados apresentados fica evidente que a natureza do escoamento turbulento é transiente mesmo quando as condições de contorno indiquem que o fenômeno se dá em regime permanente. Esse fato aliado a presença de acidentes de linha nas instalações de gás influenciam de maneira significativa no valor do fator de correção.

Logo a qualidade da medição de vazão por meio de um medidor ultrassônico por tempo de trânsito nessas condições pode apresentar uma baixa confiabilidade, chegando a mais 8% de desvio no fator k para um mesmo arranjo em consequência unicamente dos efeitos transientes do escoamento, fato esse que gera, conseqüentemente, um desvio de mesma grandeza na vazão lida. Portanto é fundamental a identificação de todas as características do escoamento para que se possa garantir uma medição satisfatória através de uma calibração que considere todas as particularidades da instalação, para dessa forma seja possível atingir incertezas menores com confiabilidade satisfatória.

Quanto à aplicação da técnica de simulação numérica direta, DNS, foi possível constatar que a mesma é de grande valia para a análise de escoamentos em seções de medição, apesar do elevado custo computacional, pois este método é capaz de fornecer informações detalhadas sobre o escoamento que possibilitam o melhor entendimento do fenômeno e possíveis causas de erros de medição. Já as simulações com a utilização dos modelos de turbulência para identificação de arranjos de instalação de medidores ultrassônicos que geram desvios no fator de correção relativos aos valores para as condições ideais mostraram-se tão efetivas quanto a simulação DNS, apesar da impossibilidade de identificar os efeitos transientes.

Uma recomendação final deste trabalho é a realização de simulações DNS para faixas de números de Reynolds maiores. Além disso, seria interessante uma investigação experimental dos efeitos transientes do escoamento turbulento sobre os resultados de medidores de vazão ultrassônicos.

REFERÊNCIAS

ANP/INMETRO, “Portaria Conjunta ANP/INMETRO N° 1.” 20.06.2011 - DOU - Diário Oficial da União, 2000.

ANP/INMETRO, “Resolução Conjunta ANP/Inmetro N°.1”, de 10.06.2013

AGA, “Measurement of Gas by Multipath Ultrasonic Meters,” Report No. 9, American Gas Association, Arlington, Virginia, 1998.

MARTINS, R. S. “Installation effects of upstream elbows on the correction factor of single-path transit-time ultrasonic flow meters” Tese de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitoria, 2012

HOLM, M., STANG, J. e DELSING, J. Simulation of flow meter calibration factors for various installation effects. *Measurement*. 1995, Vol. v. 15, pp. p. 235-244.

HILGENSTOCK, A. e ERNST, R. Analysis of installation effects by means of computational fluid dynamics - CFD vs experiments? *Flow Measurement and Instrumentation*. 1996, Vol. v. 7, pp. p. 161-171.

YEH, T. T. e MATTINGLY, G. E. Computer Simulations of Ultrasonic Flow Meter Performance in Ideal and Non-ideal Pipeflows. *ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting*. 1997.

CALOGIROU, A., BOEKHOVEN, J. e HENKES, R. A. W. M. Effect of wall roughness changes on ultrasonic gas flowmeters. *Flow Measurement and Instrumentation*. 2001, Vol. v. 12, pp. p. 219-229.

LANSING, J. *Ultrasonic Meter Station Design Considerations*. Design Considerations for USMs, AGA. 2004.

RUPPEL, C. e PETERS, F. Effects of upstream installations on the reading of an ultrasonic flowmeter. *Flow Measurement and Instrumentation*. 2004, Vol. v. 15, pp. p. 167-177.

FERZIGER, J. H. e PERIC, M. Computacional Methods for Fluid Dynamics 3. ed. Berlin: Springer, 2002.

LUMLEY, J e TENNEKES, H. A First Course in Tubulence. 1. ed. USA: MIT, 1972.

F. C. FILHO, Algoritmos Num´ ericos. LTC, 2nd ed., 2007.

MEDEIROS, M. A. F. e MENDONÇA, M. T. (Org.) Turbulência. 1. ed. São José dos Campos: Espiral, JAC, 2008. v. 2. 123, 296p

ABNT, “ABNT NBR 15855:2010 - Medição de gás por medidores do tipo ultrassônicos multitrajetórias” Norma Brasileira, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, Brasil, Julho 2010.

MARTINS, R. S. “Simulações numéricas em seções de medição de vazão de escoamentos a baixa pressão” Projeto de Graduação, Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitoria, 2009

FOX, R.W., PRITCHARD, P. J. e MCDONALD, A. T. Introdução à Mecânica dos Fluidos 7. ed. LTC Editora, 2010