

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO TECNOLÓGICO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

RAFAEL STANGE

ESTIMATIVA DO FATOR DE PERFIL K NA MEDIÇÃO  
ULTRASSÔNICA POR TEMPO DE TRÂNSITO EM ESCOAMENTOS  
ASSIMÉTRICOS UTILIZANDO A TÉCNICA DE PROBLEMAS  
INVERSOS ACOPLADA A SIMULAÇÃO NUMÉRICA

VITÓRIA

2017

**RAFAEL STANGE**

**ESTIMATIVA DO FATOR DE PERFIL K NA MEDIÇÃO  
ULTRASSÔNICA POR TEMPO DE TRÂNSITO EM ESCOAMENTOS  
ASSIMÉTRICOS UTILIZANDO A TÉCNICA DE PROBLEMAS  
INVERSOS ACOPLADA A SIMULAÇÃO NUMÉRICA**

Trabalho apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Rogério Ramos

Co-orientador: Prof. Dr. Wellington Beten-curte da Silva

VITÓRIA

2017

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)  
(Biblioteca Setorial Tecnológica,  
Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

---

S784e Stange, Rafael, 1988 -  
Estimativa do fator de perfil k na medição ultrassônica por tempo de trânsito em escoamentos assimétricos utilizando a técnica de problemas inversos acoplada a simulação numérica / Rafael Stange. – 2017.  
126 f. : il.

Orientador: Rogério Ramos.  
Coorientador: Wellinton Betencurte da Silva.  
Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) –  
Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Medidor ultrassônico de vazão. 2. Escoamento turbulento.  
3. Problemas inversos (Equações diferenciais). I. Ramos, Rogério. II. Silva, Wellinton Betencurte da. III. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. IV. Título.

CDU: 621

---

**RAFAEL STANGE**

**ESTIMATIVA DO FATOR DE PERFIL K NA MEDIÇÃO  
ULTRASSÔNICA POR TEMPO DE TRÂNSITO EM ESCOAMENTOS  
ASSIMÉTRICOS UTILIZANDO A TÉCNICA DE PROBLEMAS  
INVERSOS ACOPLADA A SIMULAÇÃO NUMÉRICA**

Trabalho apresentado ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica.

**COMISSÃO EXAMINADORA**

---

**Prof. D.Sc Rogério Ramos - Orientador**  
Universidade Federal do Espírito Santo

---

**Prof. D.Sc Wellington Betencurte da Silva - Co-Orientador**  
Universidade Federal do Espírito Santo

---

**Prof. Ph.D Marcio Ferreira Martins - Avaliador interno**  
Universidade Federal do Espírito Santo

---

**Prof. D.Sc Icaro Pianca Guidolini - Avaliador externo**  
Universidade Federal do Espírito Santo

VITÓRIA

2017

# Agradecimentos

Agradeço em primeiro lugar a Deus que iluminou o meu caminho durante esta caminhada.

À meus pais, Irineu e Edith, e ao meu irmão, Gabriel, por todo carinho e incentivo para a conclusão de mais uma etapa da vida.

À minha noiva, Renata, que de forma especial e carinhosa me deu força e coragem, me apoiando nos momentos de dificuldade.

Agradeço também a todos os professores que me acompanharam durante esta etapa, em especial aos professores Rogério Ramos e ao Wellington Betencurte da Silva, responsáveis pela realização deste trabalho, pelo auxílio e conhecimentos compartilhados.

Aos amigos e colegas, pelo incentivo e pelo apoio constantes.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de estudos e financiamento de recursos para a realização da pesquisa.

# Resumo

A medição de vazão é uma importante operação no escopo das aplicações industriais, sendo regulamentado por diversos órgãos reguladores. Para satisfazer tais exigências, a tecnologia por medição ultrassônica tem passado por grande evolução nos últimos anos, muito em função de sua característica de baixa perda de carga associada, devido à sua configuração. Contudo, acidentes de linha causam interferência em suas leituras, devido a alterações no perfil de velocidades do escoamento. Novas pesquisas e modelos são apresentados de forma a entender e considerar tais perturbações, e adaptar as condições das instalações industriais. De modo a agregar novos esforços, o presente trabalho apresenta uma aproximação do fator de perfil  $k$  através de técnicas de problemas inversos. Essa abordagem busca quantificar as alterações no perfil de velocidade e considerar tais efeitos no fator  $k$ . Neste trabalho foram abordadas simulações de escoamentos com Número de Reynolds entre  $1 \times 10^4$  a  $2 \times 10^6$  sob influência de curvas. Aproximações foram feitas com simulações a  $10D$ ,  $20D$  e  $80D$  à jusante da curva. Os resultados encontrados mostram-se promissores, sendo que, as diferenças entre as simulações obtidas através da presente proposta para o fator  $k$  e os valores de vazão de referência, ficaram abaixo de 2% na maioria dos casos simulados.

**Palavras-chave:** *Medidor de vazão ultrassônico, canal acústico, escoamentos turbulentos, problema inverso, Levenberg-Marquardt.*

# Abstract

Flow measurement plays an important operation in the scope of industrial applications, being regulated by several organizations. In order to satisfy such requirements, ultrasonic measurement technology has undergone great evolution in recent years, strongly motivated by its inherent low pressure drop, due to its configuration. However, line accidents cause interference in flow readings, due to changes in the velocity profile. New research and models are developed in order to understand and consider such disturbances, and to adapt the conditions of industrial facilities. In order to add new efforts, the present work presents an approximation for the so called profile factor  $k$ , through techniques of inverse problems. This approach seeks to quantify changes in velocity profile and to consider such disturbance effects on factor  $k$ . In this work, simulations of Reynolds Number between  $1 \times 10^4$  and  $2 \times 10^6$  under influence of an upstream curves were approached. Approximations were made with simulations at  $10D$ ,  $20D$  and  $80D$  downstream from the curve. The results obtained are promising. The differences between the simulations obtained by the present proposal for the factor  $k$  and the reference flow values were below 2% in most of the simulated cases.

**Keywords:** *Ultrasonic flow meter, acoustic channel, turbulent flow, inverse problem, Levenberg-Marquardt.*

# Lista de Figuras

3.1	Diagrama de operação de um medidor de vazão ultrassônico. (Weissenbrunner et al., 2016) . . . . .	26
3.2	Exemplos de propagação das ondas ultrassônicas submetidas à diferentes perfis de velocidade. (GERG, 2000) . . . . .	27
5.1	Fluxograma do problema inverso. . . . .	47
5.2	Fluxograma representando as etapas presentes em Fluent / CFD-Post na Figura (5.1). . . . .	49
5.3	Geometria do caso 2. . . . .	56
5.4	Plano de entrada das malhas da geometria com curva - Caso 2. . . . .	57
6.1	Convergência da componente axial do campo de velocidades da amostra SP 1 - 80D . . . . .	66
6.2	Convergência da componente axial do campo de velocidades da amostra SP 5 - 80D . . . . .	67
6.3	Convergência da componente axial do campo de velocidades da amostra SP 10 - 80D . . . . .	67
6.4	Evolução da componente axial da velocidade, $u[m/s]$ , no centro da tubulação com base nos resultados das simulações com coleta de dados a $10D$ . . . . .	75
6.5	Perfil da componente axial de velocidade, $u[m/s]$ , a $10D$ . . . . .	77
6.6	Evolução da componente axial da velocidade, $u[m/s]$ , no centro da tubulação com base nos resultados das simulações com coleta de dados a $20D$ . . . . .	78
6.7	Perfil da componente axial de velocidade, $u[m/s]$ , a $20D$ . . . . .	79



6.8	Evolução da componente axial da velocidade, $u$ [ $m/s$ ], no centro da tubulação com base nos resultados das simulações com coleta de dados a $80D$ . . . . .	80
6.9	Perfil da componente axial de velocidade, $u$ [ $m/s$ ], a $80D$ . . . . .	81
6.10	Perfil da componente axial de velocidade, $u$ [ $m/s$ ], da amostra SE 1 - 10D .	82
6.11	Perfil da componente axial de velocidade, $u$ [ $m/s$ ], da amostra SE 5 - 10D .	84
6.12	Perfil da componente axial de velocidade, $u$ [ $m/s$ ], da amostra SE 10 - 10D .	84
6.13	Perfil do fator de perfil $k$ - SE 10D . . . . .	90
6.14	Perfil da componente axial de velocidade, $u$ [ $m/s$ ], da amostra SE 1 - 20D .	91
6.15	Perfil da componente axial de velocidade, $u$ [ $m/s$ ], da amostra SE 5 - 20D .	91
6.16	Perfil da componente axial de velocidade, $u$ [ $m/s$ ], da amostra SE 10 - 20D .	95
6.17	Perfil do fator de perfil $k$ - SE 20D . . . . .	97
6.18	Perfil da componente axial de velocidade, $u$ [ $m/s$ ], da amostra SE 1 - 80D .	99
6.19	Perfil da componente axial de velocidade, $u$ [ $m/s$ ], da amostra SE 5 - 80D .	103
6.20	Perfil da componente axial de velocidade, $u$ [ $m/s$ ], da amostra SE 10 - 80D .	103
6.21	Perfil do fator de perfil $k$ - SE 80D . . . . .	104

# Lista de Tabelas

5.1	Referência dos casos estudados em função do número de $Re$ (Martins, 2012)	53
5.2	Dados das geometrias. . . . .	55
5.3	Tamanhos das malhas para geometria de trecho reto - Caso 1. . . . .	55
5.4	Tamanhos das malhas para geometria com curva - Caso 2 . . . . .	56
5.5	Parâmetros do ambiente Ansys Fluent. . . . .	58
5.6	Propriedades do ar atmosférico a $25^{\circ}C$ . . . . .	58
6.1	Convergência da componente axial do campo de velocidades, $u$ [m/s], para diferentes malhas a 80D - Amostra SP 1. . . . .	64
6.2	Convergência da componente axial do campo de velocidades, $u$ [m/s], para diferentes malhas a 80D - Amostra SP 5. . . . .	65
6.3	Convergência da componente axial do campo de velocidades, $u$ [m/s], para diferentes malhas a 80D - Amostra SP 10. . . . .	68
6.4	Fator de perfil $k$ para o trecho reto (SP), em posições a 80D. . . . .	70
6.5	Efeito da variação do número de pontos na coleta de dados. . . . .	71
6.6	Efeito da variação do termo TFJ no resultado do PI. . . . .	73
6.7	Efeito da variação do erro de amostragem. . . . .	74
6.8	Perfil da componente axial de velocidade, $u$ [m/s], para diferentes malhas a 10D - Amostra SE 1. . . . .	83
6.9	Perfil da componente axial de velocidade, $u$ [m/s], para diferentes malhas a 10D - Amostra SE 5. . . . .	85
6.10	Perfil da componente axial de velocidade, $u$ [m/s], para diferentes malhas a 10D - Amostra SE 10. . . . .	86
6.11	Convergência do fator de perfil $k$ a 10D da curva, comparada aos resultados encontrados pela equação da AGA (2007). . . . .	88

6.12	Convergência do fator de perfil $k$ a $10D$ da curva, comparado aos resultados de Martins (2012). . . . .	89
6.13	Perfil da componente axial de velocidade, $u$ [ $m/s$ ], para diferentes malhas a $20D$ - Amostra SE 1. . . . .	92
6.14	Perfil da componente axial de velocidade, $u$ [ $m/s$ ], para diferentes malhas a $20D$ - Amostra SE 5. . . . .	93
6.15	Perfil da componente axial de velocidade, $u$ [ $m/s$ ], para diferentes malhas a $20D$ - Amostra SE 10. . . . .	94
6.16	Convergência do fator de perfil $k$ a $20D$ da curva, comparada aos resultados encontrados pela equação da AGA (2007). . . . .	96
6.17	Convergência do fator de perfil $k$ a $20D$ da curva, comparado aos resultados de Martins (2012). . . . .	98
6.18	Perfil da componente axial de velocidade, $u$ [ $m/s$ ], para diferentes malhas a $80D$ - Amostra SE 1. . . . .	100
6.19	Perfil da componente axial de velocidade, $u$ [ $m/s$ ], para diferentes malhas a $80D$ - Amostra SE 5. . . . .	101
6.20	Perfil da componente axial de velocidade, $u$ [ $m/s$ ], para diferentes malhas a $80D$ - Amostra SE 10. . . . .	102
6.21	Convergência do fator de perfil $k$ a $80D$ da curva, comparada aos resultados encontrados pela equação da AGA (2007). . . . .	105
6.22	Convergência do fator de perfil $k$ a $80D$ da curva, comparado aos resultados de Martins (2012). . . . .	106

# Lista de Símbolos

$A$	Área da seção transversal, $[m^2]$ ; ou coeficiente da matriz, [-]
$\vec{A}$	Vetor área, $[m^2]$
$c$	Velocidade do som, $[m/s]$
$D$	Diâmetro interno da tubulação, $[m]$
$k$	Fator de correção do perfil de velocidade do medidor ultrassônico de vazão, $[m]$ ; ou energia cinética de turbulência, $[m^2/s^2]$ ; ou número de iterações
$k_{AGA}$	Fator de correção proposto pela norma da A.G.A. Report No 9, adimensional
$I$	Número de medidas
$J$	Número de sensores, adimensional
$Jac$	matriz Jacobiana
$L$	Distância entre os transdutores, $[m]$
$L_{AP}, L_{TAB}, L_{TBA}$	Tamanho do caminho acústico, $[m]$
$\vec{L}$	Vetor distância, $[m]$
$\dot{m}$	Vazão gravimétrica, $[kg/s]$
$n$	expoente para o perfil de velocidade totalmente desenvolvida de Nikuradse, adimensional

$N$	Número de pontos de integração, adimensional; <i>ou</i> número de medidas no tempo, adimensional
$\mathbf{n}$	vetor normal, [-]
$p$	Pressão, $[N/m^2]$ ; <i>ou</i> subscrito para ponto de integração numérica, adimensional
$P$	Número de parâmetros
$P^t$	Vetor com os parâmetros a serem estimados
$Q$	Vazão volumétrica, $[m^3/s]$
$\dot{Q}$	Vazão volumétrica instantânea, $[m^3/s]$
$R$	Raio da tubulação, $[m]$
$r^*$	distância radial a partir do centro da tubulação, $[m]$
$Re$	Número de Reynolds, adimensional
$S$	Função objetivo, adimensional
$T$	Temperatura, $[K]$
$t, t^*$	tempo, $[s]$
$t_{AB}, t_{BA}$	Tempo de trânsito entre os transdutores, $[m/s]$
$u, v, w$	Componentes da velocidade, $[m/s]$
$u_m$	Velocidade média instantânea do escoamento, $[m/s]$
$\bar{u}_{AB}, \bar{u}_{BA}$	Velocidade média de propagação do pulso, $[m/s]$
$\bar{u}_{max}$	velocidade máxima sobre a seção de área, $[m/s]$
$\bar{u}_m$	Velocidade média do escoamento turbulento, $[m/s]$
$\vec{u}, \mathbf{u}$	Vetor velocidade, $[m/s]$

$V$	Velocidade, $[m/s]$
$\bar{V}_{AP}$	Velocidade média do escoamento, ao longo do caminho acústico, $[m/s]$
$\bar{V}_{UFM}$	Velocidade média do escoamento, ao longo do caminho acústico, na direção do escoamento, $[m/s]$
$Y_i$	Dados obtidos a partir dos sensores (coleta de dados)
$x, y, z$	Coordenadas cartesianas, $[m]$

*Greek letters*

$\alpha$	Inclinação do transdutor relativo ao eixo central da tubulação, $[^\circ]$
$\varepsilon$	taxa de dissipação da energia de turbulência, $[m^2/s^3]$
$\theta$	Ângulo de inclinação de montagem dos transdutores em relação ao eixo vertical, $[^\circ]$
$\mu$	viscosidade dinâmica, $[Pa \cdot s]$
$\mu_{PI}$	Parâmetro do problema inverso relacionado ao tamanho do passo das variáveis
$\mu_{PI}^k$	Parâmetro do problema inverso, sendo um escalar positivo
$\nu$	Viscosidade cinemática, $[St]$
$\rho$	Densidade, $[kg/m^3]$
$\Omega^k$	Matriz diagonal do passo k

# Lista de Abreviações

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AGA	American Gas Association
ANP	Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CFD	Computational Fluid Dynamics
GERG	Groupe Européen de Recherches Gazières
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
LFTC	Laboratório de Fenômenos de Transporte Computacional
PI	Problema inverso
PISO	Pressure Implicit with Splitting of Operator
PPGEM	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
RANS	Reynolds Averaged Navier-Stokes
RMS	Root Mean Square
RNG	Grupo de renormalização

SIMPLE	Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations
SIMPLEC	Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations-Consistent
TFJ	Termo de Formação da matriz Jacobiana
UFES	Universidade Federal do Espírito Santo
UFM	Ultrasonic flow meter



# Sumário

Agradecimentos	v
Resumo	vi
Abstract	vii
Lista de Figuras	viii
Lista de Tabelas	x
Lista de Símbolos	xii
Lista de Abreviações	xv
<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>19</b>
1.1 Motivação . . . . .	19
1.2 Objetivos . . . . .	21
<b>2 Revisão Bibliográfica</b>	<b>22</b>
<b>3 Princípios da medição de vazão ultrassônica por tempo de trânsito</b>	<b>25</b>
3.1 Medidor de vazão ultrassônico por tempo de trânsito . . . . .	25
3.2 Medição de vazão . . . . .	31
<b>4 Técnicas de Problemas Inversos</b>	<b>37</b>
<b>5 METODOLOGIA</b>	<b>43</b>
5.1 Equações de governo . . . . .	43
5.2 Modelagem da turbulência - RANS . . . . .	44

5.3	Introdução . . . . .	45
5.4	Descrição do problema . . . . .	46
5.5	Técnicas de Problemas Inversos . . . . .	50
5.6	Parâmetros de referência . . . . .	52
5.7	Ansys Fluent . . . . .	54
5.7.1	Geometria e Malhas . . . . .	54
5.7.2	Condições de simulação . . . . .	58
5.8	Equipamento . . . . .	61
<b>6</b>	<b>Resultados e Discussões</b>	<b>62</b>
6.1	Geometria em trecho reto - Caso 1 . . . . .	62
6.1.1	Perfil de velocidade . . . . .	63
6.1.2	Fator de perfil $k$ . . . . .	69
6.1.3	Variação do número de pontos dos dados considerados . . . . .	70
6.2	Geometria com curva (Caso 2) . . . . .	71
6.2.1	Avaliação da influência de parâmetros no problema inverso . . . . .	72
6.2.1.1	Variação do desvio do PI . . . . .	73
6.2.1.2	Variação do erro de amostragem . . . . .	73
6.2.2	Convergência de malha . . . . .	74
6.2.2.1	Análise de convergência do perfil de velocidades a $10D$ . . . . .	82
6.2.2.2	Análise do fator $k$ a $10D$ . . . . .	87
6.2.2.3	Análise de convergência do perfil de velocidades a $20D$ . . . . .	90
6.2.2.4	Análise do fator $k$ a $20D$ . . . . .	95
6.2.2.5	Análise de convergência do perfil de velocidades a $80D$ . . . . .	99
6.2.2.6	Análise do fator $k$ a $80D$ . . . . .	103
<b>7</b>	<b>Conclusão e trabalhos futuros</b>	<b>108</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>111</b>
<b>A</b>	<b>Scripts/Interface Matlab - Ansys</b>	<b>115</b>

# Capítulo 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1 Motivação

A tecnologia ultrassônica é aplicada para medição de escoamento de fluidos em tubulações e canais abertos, para gases e líquidos nas mais variadas condições. Apesar desta técnica ser conhecida desde a década de 1930, e sua primeira versão industrial data da década de 1960, faz apenas alguns anos que seus resultados se apresentaram mais precisos e confiáveis devido aos avanços eletrônicos e a redução de custo desses materiais (Dell’Isola et al., 1997).

A evolução dos medidores de vazão ultrassônicos tem ocorrido acentuadamente nos últimos anos, muito se deve às suas características, tais como não apresenta partes móveis, não intrusivo, não apresentar perdas de pressão, operar em uma larga faixa de medição. Além da possibilidade de ser empregado em tubulações de amplo diâmetro mantendo seus resultados precisos (Zheng et al., 2013; Brassier et al., 2001).

Tais medidores são amplamente utilizados em aplicações industriais e comerciais. A performance desses medidores foi significativamente melhorada com a exploração de variações nas medições acústicas, tais como reflexões de sinal dentro da tubulação, otimização do ângulo de orientação dos transdutores ou aplicação de sistemas de medidas multi-canais (Raišutis, 2006). A American Gas Association (AGA) Report No. 9 é uma evidência de que a indústria de petróleo e gás tem interesse na aplicação da tecnologia (AGA, 2007).

Composto basicamente por dois transdutores ultrassônicos, responsáveis por medir o tempo de trânsito a partir de ondas ultrassônicas emitidas entre eles, o medidor de vazão ultrassônico tem sua precisão dependente da distribuição de velocidade do fluido entre os dois transdutores. Perturbações no escoamento geralmente são causadas por condições de instalação, por exemplo: conectores, curvas, válvulas ou bombas à montante do medidor. Tais perturbações provocam erros nas leituras do medidor e são conhecidos como “efeitos de instalação”. Para medidores de vazão ultrassônicos as maiores fontes de erro podem ser definidas por mudanças de área de escoamento e distorção das ondas acústicas (Håkansson and Delsing, 1992).

De forma a diminuir a interferência de tais efeitos de instalação, normas técnicas, como a AGA Report No 9 e Portaria Conjunta da ANP/INMETRO, apresentam exigências mínimas para utilização dos medidores de vazão ultrassônicos. De acordo com as normas, é exigido longos trechos retos para que o escoamento apresente um perfil de velocidade totalmente desenvolvido (AGA, 2007; ANP/INMETRO, 2000). Entretanto, limitada por espaços e custo, algumas aplicações industriais não proporcionam longos trechos retos de tubulação, casos em que é comum o escoamento entrar distorcido no medidor, e influenciar diretamente na precisão do medidor de vazão ultrassônico (Zheng et al., 2013).

Além de apresentarem os requisitos de instalação, as normas AGA Report No 9 e Portaria Conjunta da ANP/INMETRO são referências para validar e fiscalizar as empresas exploradoras de gás natural. Além disso, monitoram a emissão de gases nocivos a natureza (AGA, 2007; ANP/INMETRO, 2000).

Dessa forma, novos estudos e equipamentos tem sido propostos com a finalidade de entender o fenômeno da turbulência nessas regiões e propor novas soluções. Pelo alto custo na reprodução experimental desses fenômenos a utilização de modelos de simulação numérica tem se tornado uma opção viável e eficiente.

Assim, o desenvolvimento de técnicas para avaliar o fator de perfil  $k$  tem grande importância, no sentido de considerar os efeitos gerados por um perfil de velocidade assimétrico do escoamento, contabilizando os efeitos de vórtices e *swirls*. Na prática, leituras feitas com uma aproximação incorreta do fator  $k$  resultam em leituras erradas, podendo gerar impactos, tanto financeiros como ambientais.

Métodos matemáticos vem sendo aplicados tendo como objetivo alcançar resultados próximos ao encontrado experimentalmente. Utilizando a técnica de problemas inversos, o presente trabalho visa testar uma nova aproximação no estudo da dinâmica dos fluidos para escoamentos assimétricos.

## 1.2 Objetivos

A presente dissertação propõe uma estimativa do fator de perfil  $k$  para medição ultrassônica com um canal acústico, com e sem presença de curvas na tubulação, utilizando a técnica de problema inverso e simulação numérica do escoamento.

Sendo explorado e desenvolvido a partir dos seguintes objetivos específicos:

- Desenvolver o problema direto (simulação numérica) utilizando a plataforma ANSYS/Fluent;
- Desenvolver a técnica dos problemas inversos (scripts de simulação) utilizando a plataforma Matlab;
- Desenvolver a interface de comunicação entre as plataformas do Ansys e Matlab.
- Avaliar os resultados encontrados pela técnica de problemas inversos comparando a vazão obtida com a proposta de fator  $k$  simulado pela técnica de problemas inversos, com a vazão de referência (simulada numericamente).

## Capítulo 2

# Revisão Bibliográfica

### **Sobre a performance da medição de vazão por ultrassom na presença de acidente de linha**

Apesar da técnica de medição de vazão por ultrassom ter ganho destaque nas últimas décadas, especificações de instalação definidas na norma AGA (2007) dificultam seu emprego com plena performance. Muitas aplicações industriais não conseguem estabelecer que o escoamento apresente um perfil de velocidade completamente desenvolvido (simétrico) nas seções de medição, devido a dificuldades de prover o espaço mínimo requerido entre acidentes de linha e o equipamento. Dessa forma, estudos sobre regiões do escoamento que apresentem um perfil de velocidade assimétrico tornam-se necessários para proporcionar a leitura correta da vazão e adoção da tecnologia.

Heritage (1989) realizou um estudo onde, primeiramente, analisou diferentes medidores de vazão por ultrassom em configurações com escoamentos em boas condições, demonstrando que a maior parte deles não obteve a eficiência condizente com especificações do fabricante. Já na segunda etapa de seu estudo, ele propôs o estudo com base em escoamentos perturbados (apresentando defeitos de linha, *i.e.* curvas, redutores). Na segunda etapa, pode concluir que medidores por ultrassom utilizando feixe duplo, a  $10D$ , obtiveram resultados melhores, com diferenças de 1,5%, em comparação com medidores utilizando feixe único, que apresentaram diferenças em torno de 11%.

Enquanto Holm et al. (1995) aplicaram o estudo de escoamentos assimétricos utilizando o modelo Computacional de Dinâmica de Fluidos (CFD) para determinar o fator de perfil  $k$ . Seu estudo apresenta uma comparação entre três modelos: tubulação reta, e apresentando defeito de linha com uma e duas curvas. Apesar dos resultados não serem precisos, o comportamento apresentado se mostrou aderente com as curvas de referência, demonstrando potencial para o uso da tecnologia do CFD.

Pouco tempo depois, Hilgenstock and Ernst (1996) apresentaram um estudo comparando diferentes tipos de instalação do medidor ultrassônico utilizando o modelo computacional da dinâmica dos fluidos (CFD), comparando seus resultados com os obtidos experimentalmente. Como comentado por Holm et al. (1995), é apontado que o modelo de CFD se torna uma ferramenta muito promissora, complementando os dados experimentais. Indicando que a técnica é atrativa para pesquisas, tanto quanto pelo menor custo na sua aplicabilidade, quanto a possibilidade de obter mais informações na investigação de fenômenos presentes na dinâmica dos fluidos.

Martins (2012) apresenta um estudo sobre escoamentos assimétricos, determinando a fator de perfil  $k$  em diferentes posições e configurações para o medidor ultrassônico utilizando o CFD. Seus resultados corroboram estudos anteriores mostrando que medidores de vazão por ultrassom instalados em posições a distâncias menores que  $20D$  apresentam grande interferência de acidentes de linha, porém algumas configurações específicas se mostraram eficientes na determinação do fator de perfil  $k$ , apresentando desvios de 0.01%. Em vista desses resultados é esperado alcançar mais resultados expressivos nas regiões de escoamento assimétrico, permitindo desenvolver ainda mais a técnica dos medidores de vazão por ultrassom.

## **Sobre a Técnica de Problemas Inversos**

A distinção entre o que seja um problema direto ou inverso para um dado fenômeno, está ligado a nossa cultura, isto é, trata-se do que se interpreta como causa e efeito. É atribuído a Alifanov (1994), proeminente pesquisador russo na área de problemas inversos, a afirmação “a solução de um problema inverso consiste em determinar causas baseado na observação dos seus efeitos.”

Bokar and Özisik (1995) utilizou a método de minimização por gradiente conjugado para estimar a variação da temperatura com o tempo no perfil de entrada de um escoamento entre placas, considerando que os dados disponíveis são apenas os obtidos em posições à jusante. Seus resultados mostram boa eficiência no emprego da técnica dos problemas inversos aliando a obtenção de dados à jusante para determinar variáveis no perfil de entrada de um escoamento.

Liu and Ozisik (1996) utilizou o método de minimização de Levenberg-Marquardt para identificar simultaneamente a constante de condutividade térmica e a capacidade térmica de um fluido escoando por uma tubulação circular. Tal estudo mostrou a eficiência desse método na determinação de múltiplas variáveis, apresentando resultados com boa precisão.

Por sua vez Brasil et al. (2004) utilizou a técnica de problemas inversos para estimar o perfil de velocidade da camada limite incompressível de turbulência. Seus resultados foram comparados com dados adquiridos experimentalmente, mostrando-se eficientes e promissores.

Chen (2016) apresenta uma modificação do modelo de Levenberg-Marquardt onde, além do procedimento padrão, a cada iteração apresenta mais um passo de aproximação, elevando a ordem de aceleração do modelo. Os resultados comprovaram sua eficiência, e ainda podem levar a um menor tempo nos cálculos da Jacobiana.



## Capítulo 3

# Princípios da medição de vazão ultrassônica por tempo de trânsito

### 3.1 Medidor de vazão ultrassônico por tempo de trânsito

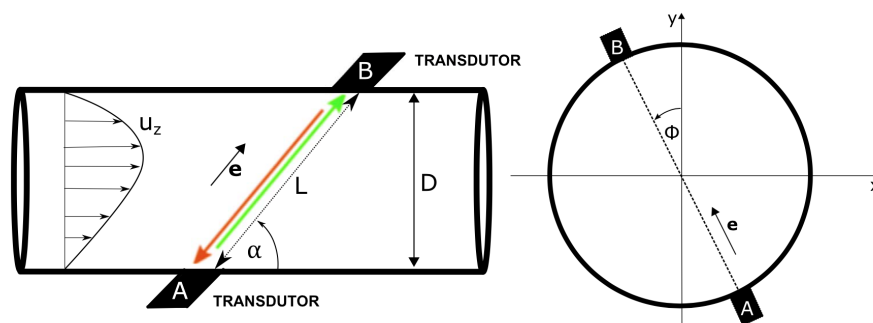
Medidores ultrassônicos medem o fluxo através de medidas do tempo de trânsito de pulsos acústicos de alta-frequência produzidos por transdutores piezoelétricos posicionados no escoamento. Através dessas medidas, a velocidade média do gás é calculada fazendo-se uso de um fator que relaciona a velocidade dos pulsos ultrassônicos com a velocidade média do escoamento - fator de perfil  $k$  (AGA, 2007).

O método de tempo de trânsito (ou "contra propagação") é a técnica mais amplamente utilizada para medição de vazão. O princípio tem como base a variação do tempo de propagação da onda ultrassônica pelo perfil de velocidade do fluido ao longo do caminho acústico entre os transdutores. O tempo de trânsito e a diferença de tempo são funções do estado termodinâmico do escoamento e da velocidade do fluido. Portanto, esse método leva a medição de períodos de tempo, que chegam a ser da ordem de nano-segundos (Brassier et al., 2001).

Típicas aplicações incluem medições de grandes volumes de gás através de plantas de produção, gasodutos, instalações de armazenamento, sistemas de distribuição e consumidores de larga escala (AGA, 2007).

## Princípio de operação

Um medidor de vazão ultrassônico consiste em um equipamento com transdutores ultrassônicos, tipicamente alocados ao longo das paredes da tubulação (AGA, 2007). O princípio de medição do tempo de trânsito é baseado na diferença entre os tempo de trânsito dos sinais acústicos de alta-frequência (para gases tipicamente entre  $150\text{--}200\text{kHz}$ ) emitidos por um ou mais canais acústicos sobre o fluido em movimento (Dell’Isola et al., 1997). (Fig. (3.1))



**Figura 3.1.** Diagrama de operação de um medidor de vazão ultrassônico. (Weissenbrunner et al., 2016)

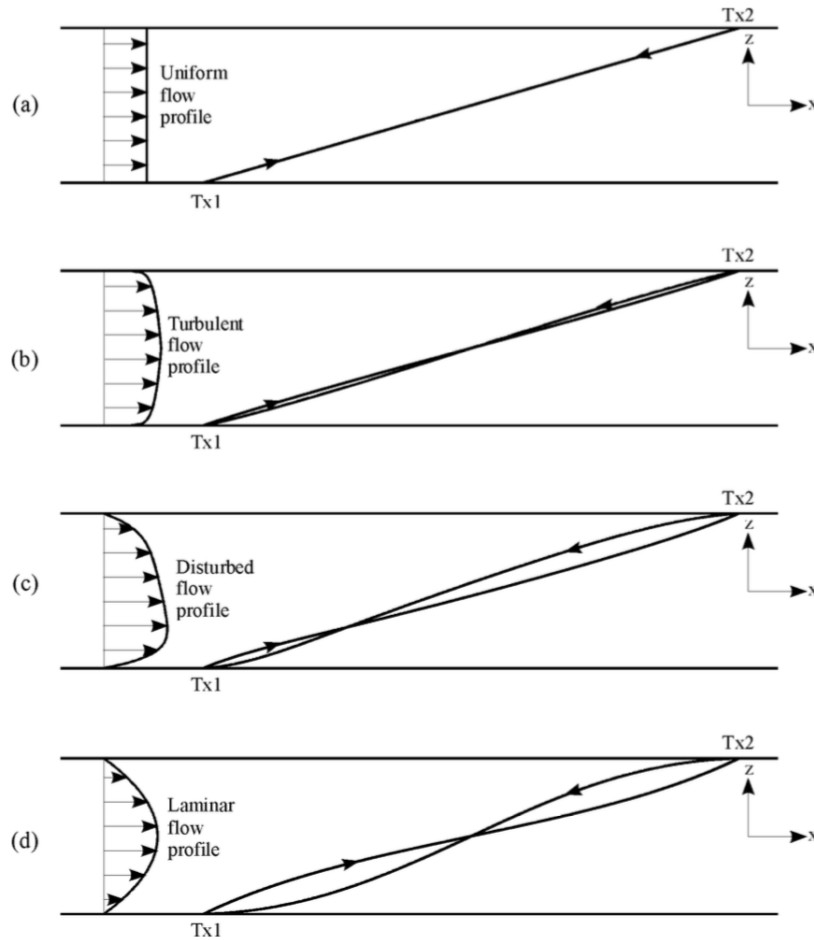
A Figura (3.1) apresenta a instalação de um canal acústico do medidor de vazão por ultrassom (Ultrasonic Flow Meter - UFM) ao longo de uma tubulação. Os transdutores são apresentados como os sensores *A* e *B*, separados por uma distância *L* a um ângulo  $\alpha$ , além de poder apresentar uma rotação  $\Phi$  em relação ao eixo. O perfil de velocidade do escoamento é representado pela variável  $u_z$ .

A diferença de tempo é determinada entre os tempos de trânsito dos pulsos ultrassônicos gerados pelos transdutores a favor e contra a corrente do escoamento.

O sinal ultrassônico é necessário para medição do escoamento, sendo gerado e recebido por transdutores ultrassônicos. A principal função dos transdutores do UFM é converter o sinal elétrico em sinal acústico, e vice-versa (GERG, 2000).

O transdutor ultrassônico é essencial uma otimização desse dispositivo. De forma geral, seus fabricantes optam por utilizar transdutores piezelétricos, que tipicamente operam em frequências entre 40 e 200 kHz (Brassier et al., 2001).

Devido ao efeito causado pelo perfil de velocidade do escoamento, a propagação das ondas ultrassônicas não transitam por um caminho retilíneo entre os transdutores, como observado na Fig. (3.2). Para facilitar os cálculos é feita uma simples aproximação, onde o caminho acústico considerado será uma trajetória retilínea, fazendo com que  $L_{TAB} = L_{TBA} = L$ .



**Figura 3.2.** Exemplos de propagação das ondas ultrassônicas submetidas à diferentes perfis de velocidade. (GERG, 2000)

Para o cálculo do tempo de propagação do pulso,  $t_{AB}$  sendo a favor do escoamento e  $t_{BA}$  contra o escoamento, é possível calcular as respectivas velocidades médias de propagação dos pulsos,  $\bar{u}_{AB}$  e  $\bar{u}_{BA}$ , mostradas nas Eqs. (3.1) e (3.2). (Martins, 2012)

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

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

Apesar das variáveis  $\bar{V}_{AP}$  e  $c$  serem desconhecidas, é possível, a partir da solução do sistema envolvendo as Eqs. (3.1) e (3.2) calculá-las considerando as variáveis já conhecidas. Também é possível definir a dimensão do caminho acústico ( $L_{AP}$ ) com base em relações geométricas. Logo, manipulando as Eqs. (3.1) e (3.2) obtém-se as seguintes equações:

$$L_{AP} = \frac{D}{\sin\alpha} \quad (3.3)$$

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

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

Pode-se destacar que a velocidade do som no fluido ( $c$ ) pode ser uma variável conhecida, por se tratar de uma propriedade termodinâmica que depende da pressão, temperatura e composição química. Por outro lado, a influência da velocidade do escoamento projetada no caminho acústico ( $\bar{V}_{AP}$ ) é definida pela Eq. (3.6).

$$\bar{V}_{AP} = \frac{1}{L_{AP}} \int_{L_{AP}} \vec{u}(x, y, z) \cdot d\vec{L} \quad (3.6)$$

Pela Eq. (3.6) conclui-se que a influência da velocidade do escoamento sobre o caminho acústico pode ser definida como a velocidade média do vetor velocidade do escoamento projetada sobre o caminho acústico.

Para inferir a vazão é necessário obter a velocidade média na direção do escoamento (perpendicular à seção transversal). Dessa forma, a variável  $\bar{V}_{UFM}$  é introduzida para definir o vetor velocidade média ao longo do caminho acústico na direção do escoamento, obtida através da seguinte relação:

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

Com base na Eq. (3.7) determina-se, depois das leituras do tempo de trânsito, a velocidade média do escoamento ( $\bar{V}_{UFM}$ ) a partir da velocidade do pulso ultrassônico no caminho acústico ( $\bar{V}_{AP}$ ). De acordo com Martins (Martins, 2012) em perfis de velocidade assimétricos deve-se considerar a contribuição de outras componentes do vetor velocidade ( $v$  e  $w$ ). Tal contribuição pode ocorrer em situações onde o escoamento sofre a influência de perturbações, sendo necessário levá-las em consideração para proceder com a medição correta da vazão.

A informação gerada pelos tempos de trânsito em medidores ultrassônicos de vazão permite apenas inferir um perfil de velocidade uniforme, como idealizado no item (a) da Fig. (3.2), que é determinado pela projeção do perfil de velocidade do caminho acústico ( $\bar{V}_{UFM}$ ), mas não prevê uma distribuição espacial do perfil de velocidades. Essa informação deve ser programada no medidor com base em argumentos físicos verossímeis e, via de regra, é considerada a premissa de perfil turbulento e completamente desenvolvido, simétrico portanto. Assim, torna-se necessário relacionar a velocidade do caminho acústico com a velocidade média de um perfil turbulento simétrico. Para relacioná-las o medidor de vazão ultrassônico faz o uso do fator de perfil  $k$ , como visto na Eq. (3.8).

$$k = \frac{\bar{u}_m}{\bar{V}_{UFM}} = \frac{\frac{1}{A} \int \vec{u}(x, y, z) \cdot d\vec{A}}{\frac{1}{\cos\alpha} \frac{1}{L_{AP}} \int_{L_{AP}} \vec{u}(x, y, z) \cdot d\vec{L}} \quad (3.8)$$

Com isso, agora é possível definir uma nova relação para a equação de vazão, definida pela Eq. (3.9).

$$Q = k\bar{V}_{UFMA} \quad (3.9)$$

Substituindo a Eq. (3.5) e sabendo que a  $A$  é definida por  $\pi D^2/4$  é estabelecida a equação para vazão volumétrica em função do tempo de trânsito.

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

## Escoamento turbulento e completamente desenvolvido

Medidores de vazão de gás operam comumente em regimes de escoamento turbulento. Em um escoamento turbulento, a física é caótica e previsível. A quantidade de movimento é transferida de forma axial, radial, e tangencial como resultado de uma mistura de movimentações do escoamento proveniente da turbulência. A turbulência, sempre presente nesse regime, é a recirculação caótica e dissipação dentro do campo de escoamento (Gallagher, 2006).

A premissa de perfil de velocidade totalmente desenvolvido de um escoamento turbulento implica em simetria em relação a seu eixo central com uma relação de velocidades em função do número de Reynolds ( $Re$ ) e a rugosidade do tubo.

Porém, atingir o estado de escoamento turbulento totalmente desenvolvido é uma idealização em muitas aplicações e, apenas alcançado com muito esforço em pesquisas de laboratório, sendo caracterizada por:

- Ausência de vórtices, perfil de velocidade axi-simétrico aproximando os níveis de velocidade com a turbulência.
- Plenamente alcançado com  $100D$  de tubulação reta, com a entrada do escoamento livre de vórtices.

- Assumindo nenhuma perturbação gerada por efeitos de instalação.

## 3.2 Medição de vazão

Na maioria das operações realizadas nos processos industriais é muito importante efetuar a medição e o controle da quantidade de fluxo de líquidos, gases e até sólidos granulados, não só para fins contábeis, como também para a verificação do rendimento do processo.

Delmée (Delmée, 2003) define fluxo como a quantidade de fluido passando através da seção de tubo por unidade de tempo. Tal quantidade é normalmente expressa em função da massa ou volume.

- Vazão mássica ou gravimétrica: é a quantidade de massa de um fluido que escoar por um duto em unidade de tempo considerada.
- Vazão volumétrica: é a quantidade de volume de um fluido que escoar por um duto em unidade de tempo. Neste caso, variáveis como temperatura e pressão tornam-se relevantes em função da compressibilidade do fluido.

Dessa forma podemos destacar as seguintes variáveis para facilitar a compreensão da medição de vazão.

- Velocidade pontual

É um ponto específico definido no escoamento, com referência em suas coordenadas cartesianas  $(x, y, z)$ , onde medidas de velocidade são feitas para aquele instante  $t$ , definido como:  $\vec{u}(x, y, z, t)$ .

- Velocidade média de escoamento

A velocidade média do escoamento ( $u_m$ ) é a média das velocidades da área  $A$  da tubulação em um instante de tempo  $t$ , podendo ser expressa pela Eq. (3.11).

$$u_m(t) = \frac{1}{A} \int \vec{u}(x, y, z, t) \cdot d\vec{A} \quad (3.11)$$

Onde:

-  $d\vec{A}$  é o vetor da área  $A$ , com espessura infinitesimal.

- Taxa de escoamento (Vazão)

A vazão volumétrica instantânea ( $\dot{Q}$ ) é definida pela Eq. (3.12).

$$\dot{Q}(t) = u_m(t)A \quad (3.12)$$

Enquanto a vazão gravimétrica, que é calculada em função da densidade da substância ( $\rho$ ), é definida pela Eq. (3.13).

$$\dot{m}(t) = \rho u_m(t)A \quad (3.13)$$

Além de definir a vazão volumétrica instantânea, é importante também definir a vazão volumétrica média, a qual faz uso da velocidade média do fluido no escoamento ( $\bar{u}_m$ ), dado pela Eq. (3.14).

$$Q = \bar{u}_m A \quad (3.14)$$

É possível observar que a vazão é diretamente proporcional a velocidade média do fluido. Como medidores ultrassônicos de vazão são sensíveis a perturbações no escoamento é necessário que tais medições sejam corrigidas. Devido a essas perturbações é necessário introduzir um factor de correção (fator  $k$ ), o qual é um dos objetivos no presente trabalho.

## Fator de perfil $k$

Da forma como descrito anteriormente, o fator de perfil  $k$  representa uma relação entre a velocidade média do caminho acústico e a velocidade média do escoamento (perpendicular à seção transversal do tubo).



Dessa forma, fica evidente que esta variável é sensível ao escoamento, onde perturbações geram variações no perfil de velocidade. Via de regra o fator  $k$  programado em medidores comerciais tem como premissa um perfil de velocidades turbulento completamente desenvolvido (AGA, 2007; ANP/INMETRO, 2000; ABNT, 2010). O objetivo do presente estudo é considerar também a influência de perfis de velocidade com componentes transversais ao eixo do escoamento.

Devido a acidentes de linha, tais como válvulas, curvas, expansões, dentre outros, é comum encontrar efeitos de *swirl* e vórtices no escoamento. Sendo assim, avalia-se como considerar esses efeitos e simular numericamente o efeito de escoamentos perturbados assimétricos na medição de vazão. Levando isso em consideração é necessário propor expressões para o fator de perfil  $k$ .

Para medidores ultrassônicos instalados fora dos requisitos mínimos, de acordo com a norma, seus ângulos de instalação podem agregar erros de leitura e avaliação do escoamento. De acordo com Ramos (Ramos, 2006), o ângulo  $\alpha = 45^\circ$  reduz as incertezas da medição de vazão.

Como apresentado pelas normas da A.G.A. Report No 9 (AGA, 2007) e pelas normas técnicas Brasileiras (ABNT, 2010) o perfil de velocidade deve ser totalmente desenvolvido e simétrico, desta forma as componentes  $\bar{v}$  e  $\bar{w}$  não apresentam contribuição nos cálculos para o fator de perfil  $k$ . Com isso a Eq. (3.8) toma a seguinte forma:

$$k = \frac{\frac{1}{A} \int \bar{u}_x \cdot dA}{\frac{1}{L_{AP}} \int_{L_{AP}} \vec{u} \cdot dL} \quad (3.15)$$

A A.G.A. Report No 9 (AGA, 2007) sugere o modelo semi-empírico proposto por Nikuradse (Nikuradse, 1932), que é de origem semi-empírica. Também é importante citar que as normas Brasileiras (ABNT, 2010) utilizam as mesmas equações.

$$\bar{u}(r^*) = \bar{u}_{max} \left[ 1 - \left( \frac{r^*}{R} \right) \right]^{\frac{1}{n}} \quad (3.16)$$

Onde:

- $\bar{u}_{max}$  - velocidade máxima [m/s];
- $r^*$  - distância radial do centro do tubo [m];
- $R$  - raio da tubo [m];
- $n$  - expoente power-law da equação;

A partir da Eq. (3.16) é possível calcular analiticamente o fator  $k$ , desde que o escoamento seja totalmente desenvolvido.

$$k = \frac{\frac{1}{A} \int \bar{u}_{max} \left[ 1 - \left( \frac{r^*}{R} \right) \right]^{\frac{1}{n}} \cdot dA}{\frac{1}{D} \int \bar{u}_{max} \left[ 1 - \left( \frac{r^*}{R} \right) \right]^{\frac{1}{n}} \cdot dr} = \frac{\bar{u}_{max} \frac{2n^2}{(n+1)(2n+1)}}{\bar{u}_{max} \frac{n}{(n+1)}} = \frac{2n}{2n+1} \quad (3.17)$$

O expoente  $n$  é função do número de Reynolds ( $Re$ ) e rugosidade do tubo (AGA, 2007). E de acordo com a proposta de Prandtl, chamada de lei universal de fricção para tubulações lisas (Schlichting, 1968), define-se o expoente  $n$  pela Eq. (3.18).

$$n = 2 \log \left( \frac{Re}{n} \right) - 0.8 \quad (3.18)$$

Substituindo a Eq. (3.17) na Eq. (3.10) é possível obter uma relação entre a vazão ( $Q$ ) e o expoente  $n$ .

$$Q = \frac{\pi D^3}{4 \sin 2\alpha} \left( \frac{t_{BA} - t_{AB}}{t_{AB} t_{BA}} \right) \left( \frac{2n}{2n+1} \right) \quad (3.19)$$

Observando as Eqs. (3.10) e (3.19) nota-se que o termo do fator  $k$  é diretamente proporcional a vazão. Porém a partir da Eq. (3.18), a qual é implícita, torna-se necessário o cálculo iterativo a fim de determinar o fator  $n$  e a vazão, em função de  $Re$ . Lembrando

que esta relação só pode ser utilizada para casos com perfil de velocidade totalmente desenvolvido.

No caso de um perfil de velocidade turbulento, completamente desenvolvido e simétrico na medição de vazão, sendo essa uma condição adequada para medição de vazão [14 erick], é possível deduzir uma fórmula para o cálculo do fator de perfil em função da velocidade radial ( $v(r)$ ). Outra aproximação feita foi igualar a equação da velocidade média ( $\bar{u}_m$ ) da equação do coeficiente de Reynolds (Equação 3.20).

$$Re = \frac{\bar{u}_m \rho D}{\mu} \quad (3.20)$$

$$k_{AGA} = \frac{\bar{u}_m}{\bar{V}_{UFM}} = \frac{\frac{1}{A} \int_A v(r) \cdot d\vec{A}}{\frac{1}{\cos\alpha} \frac{1}{L_{AP}} \int_{L_{AP}} v(r) \cdot d\vec{L}} = \frac{\frac{\mu Re}{\rho D}}{\frac{1}{\cos\alpha} \frac{1}{L_{AP}} \int_{L_{AP}} v(r) \cdot d\vec{L}} \quad (3.21)$$

Onde o fator de perfil ( $k_{AGA}$ ) pode ser computado, sendo  $v(r)$ ,  $L$  e  $A$  conhecidos. Uma vez que  $v(r)$  é uma função do número de Reynolds ( $Re$ ), logo,  $k_{AGA}$  também é uma função de  $Re$ . Se o caminho acústico está situado num plano de emissão que cruza a linha de centro da tubulação, uma aproximação pode ser feita pela Equação (3.22).

$$k_{AGA} = \frac{1}{1.12 - 0.01 \log(Re)} \quad (3.22)$$

Segundo Martins (Martins, 2012) como o campo de velocidade é projetado na direção do vetor unitário da área, as componentes  $\bar{v}$  e  $\bar{w}$  não causam influência no dividendo da Eq. (3.8), por ser considerado uma representação de um perfil de velocidade simétrico. Porém, no caso do denominador, como o campo de escoamento é projetado sobre o vetor do caminho acústico, tais componentes podem influenciar o cálculo, considerando ainda o ângulo do plano de emissão do caminho acústico, *i.e.*  $\alpha$  e  $\theta$ , como visto na Fig. (3.1), podendo representar regiões onde o escoamento tenha um perfil de velocidade assimétrico.

Com base no sistema de coordenadas e os ângulos exibidos na Fig. (3.1), qualquer média de perfil de velocidade em 3 dimensões projetada sobre o caminho acústico é representada de forma determinística, como função de suas componentes  $\bar{u}$ ,  $\bar{v}$  e  $\bar{w}$ , como mostrado na Eq. (3.23).

$$\bar{V}_{AP} = \frac{1}{L_{AP}} \left( \cos \alpha \int_{L_{AP}} \bar{u} dL + \sin \alpha \cos \theta \int_{L_{AP}} \bar{v} dL + \sin \alpha \sin \theta \int_{L_{AP}} \bar{w} dL \right) \quad (3.23)$$

A Eq. (3.23) representa a velocidade do pulso ultrassônico no caminho acústico, considerando todas as componentes espaciais de velocidade, que são simuladas numericamente, para cada valor de  $Re$  considerado, em um processo determinístico. Essa equação deve ser substituída na Eq. (3.8) a fim de se conhecer o fator de perfil  $k$ , considerando escoamentos assimétricos. A proposta do presente trabalho é determinar o fator  $k$  em escoamento assimétrico através das técnicas de problemas inversos. Análises dos resultados obtidos serão procedidas com a Eq. (3.17) (em escoamento simétrico) de forma a validar a metodologia e também com a Eq. (3.23) (em escoamento assimétrico), de forma a avaliar sua performance.

## Capítulo 4

# Técnicas de Problemas Inversos

De modo a facilitar o compreensão do problema proposto, como exemplo de aplicação para a técnica de problemas inversos é utilizado a simulação de um escoamento com uma seção de coleta de dados. Onde a coleta de dados representa o perfil de velocidade ( $\vec{u}(x, y, z)$ ) obtido pelo medidor ultrassônico de vazão. O problema direto consiste na estimação do perfil de velocidade a partir das condições de contorno do escoamento (velocidade de entrada, densidade, geometria da tubulação, etc) sendo conhecidas. Enquanto, o objetivo do problema inverso é estimar uma ou mais características causais (condições de contorno), a partir do conhecimento do perfil de velocidade (o efeito) em uma determinada região do domínio (da Fonseca, 2012). Para o trabalho proposto, a velocidade de entrada do escoamento será determinada com o auxílio da técnica de problemas inversos.

Uma das características na solução de alguns problemas é a instabilidade (onde pequenas mudanças nos parâmetros de entrada podem causar mudanças físicas inaceitáveis na solução do problema). Essa característica aparece tanto em problemas diretos quanto em problemas indiretos (Tarantola and Valette, 1982).

Dessa forma, Engl *et all* (Engl et al., 1996) apresenta uma definição bastante abrangente: *"Resolver um problema inverso é determinar causas desconhecidas a partir de efeitos desejados ou observados"*.

O interesse na técnica de estimação de parâmetro por problemas inversos aumentou de forma significativa no final dos anos 50 e início dos anos 60 na chamada Era Espacial,

sendo aplicada na solução do aquecimento de veículos espaciais durante a reentrada na atmosfera (Ozisk and Orlande, 2000).

Problemas inversos são matematicamente classificados como mal-postos. Para um problema envolvendo uma equação diferencial ser considerado bem-posto, sua solução deve existir, ser única e ser estável (Levenberg, 1944; Hadamard, 1923).

Geralmente a solução de um problema inverso se dá pela minimização de uma função objetivo com alguma técnica de estabilização usada no processo de estimação (da Fonseca, 2012). A função objetivo é uma representação matemática das características sob pesquisa, as quais devem ser minimizadas ou maximizadas (Colaço et al., 2006). Seguindo o exemplo, a função objetivo assumiria a forma da norma de mínimos-quadrados, como nas Eq. (4.1) e (4.2).

$$S[u] = \sum_{i=1}^N [Y_i - \vec{u}(x_i, y_i, z_i)]^2 \quad (4.1)$$

$$S[u] = \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^N [Y_i - \vec{u}(x_i, y_i, z_i)]^2 \quad (4.2)$$

Onde

- $N$  é o número de medidas no espaço.
- $J$  é o número de sensores.
- $Y_i$  são as medidas de velocidade obtidas pelos sensores no caso de referência (experimental ou simulado).
- $\vec{u}(x_i, y_i, z_i)$  são as medidas de velocidade estimadas na simulação (solução do problema direto).

Sendo que a Eq. 4.1 representa a medição com apenas um sensor, enquanto a Eq. 4.2 é definida caso  $J$  sensores fossem utilizados, estabelecidos na posição  $x_s$ .

## Método de Levenberg-Marquardt

Este método foi desenvolvido em épocas diferentes por Levenberg (Levenberg, 1944) e por Marquardt (Marquardt, 1963). Enquanto Levenberg (Levenberg, 1944) partiu de uma modificação da norma de mínimos-quadrados, a intenção de Marquardt (Marquardt, 1963) era obter um método que se aproximasse do método de Gauss na vizinhança do ponto de mínimo da função objetivo e se aproximasse do método do gradiente (steepest-descent) na vizinhança da estimativa inicial do processo iterativo.

Seguindo o exemplo proposto, são consideradas  $I$  medidas de velocidade,  $Y_i = Y(x_i, y_i, z_i)$ , dispostas sobre o caminho acústico. Os  $N$  parâmetros  $P_j, j = 1, \dots, N$ , ( $N = 1$  para este caso) podem então ser estimados através da minimização da norma de mínimos-quadrados, dada por

$$S(P) = \sum_{i=1}^I [Y_i - \vec{u}_i(P)]^2 \quad (4.3)$$

onde

- $S$  = norma de mínimos-quadrados;
- $P_j \equiv [P_1, P_2, P_3, \dots, P_N] =$  vetor com os parâmetros a serem estimados;
- $\vec{u}_i \equiv u(x_i, y_i, z_i) =$  velocidade estimada por simulação na posição  $x_i, y_i, z_i$ ;
- $Y_i \equiv Y(x_i, y_i, z_i) =$  velocidade estimada no caso de referência na posição  $x_i, y_i, z_i$ ;
- $N =$  número de parâmetros desconhecidos;
- $I =$  número de medidas ( $I \geq N$ ).

O parâmetro a ser determinado nesse caso é a velocidade de entrada do escoamento ( $N = 1 \Rightarrow P = u$ ) a partir de medidas de velocidade sobre o caminho acústico ( $\vec{u}_i$ ). Sendo o problema inverso aplicado para encontrar a velocidade de entrada do escoamento das amostras de referência.

Os medidas de velocidade ( $\vec{u}_i$ ) são obtidas a partir da solução do problema direto utilizando estimativas para os parâmetros ( $P_j$ ). A norma de mínimos quadrados dada pela Eq. (4.3) pode ser escrita na forma vetorial como

$$S(P) = [Y_i - \vec{u}_i(P)]^T [Y_i - \vec{u}_i(P)] \quad (4.4)$$

O processo iterativo do método de Levenberg-Marquardt para minimização das Eq. (4.3) ou Eq. (4.4) é dado por:

$$P^{k+1} = P^k + (J^T J + \mu_{PI}^k \Omega^k)^{-1} J^T [Y - \vec{u}_i(P^k)] \quad (4.5)$$

onde

- $[Y - \vec{u}(P)]^T = [Y_1 - \vec{u}_1(P), Y_2 - \vec{u}_2(P), \dots, Y_N - \vec{u}_N(P)]$ ;
- $k$  é o número de iterações;
- $\mu_{PI}^k$  é um escalar positivo;
- $\Omega^k$  é uma matriz diagonal que pode ser igual à matriz identidade ou à diagonal de  $J^T J$ .

A matriz *Jac*, denominada como matriz de sensibilidade, é definida por



$$Jac(P) = \left[ \frac{\partial \vec{u}(P)}{\partial P} \right]^T = \begin{bmatrix} \frac{\partial \vec{u}_1}{\partial P_1} & \frac{\partial \vec{u}_1}{\partial P_2} & \frac{\partial \vec{u}_1}{\partial P_3} & \cdots & \frac{\partial \vec{u}_1}{\partial P_N} \\ \frac{\partial \vec{u}_2}{\partial P_1} & \frac{\partial \vec{u}_2}{\partial P_2} & \frac{\partial \vec{u}_2}{\partial P_3} & \cdots & \frac{\partial \vec{u}_2}{\partial P_N} \\ \frac{\partial \vec{u}_3}{\partial P_1} & \frac{\partial \vec{u}_3}{\partial P_2} & \frac{\partial \vec{u}_3}{\partial P_3} & \cdots & \frac{\partial \vec{u}_3}{\partial P_N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial \vec{u}_I}{\partial P_1} & \frac{\partial \vec{u}_I}{\partial P_2} & \frac{\partial \vec{u}_I}{\partial P_3} & \cdots & \frac{\partial \vec{u}_I}{\partial P_N} \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

Os elementos da matriz sensibilidade são denominados coeficientes de sensibilidade. Eles representam variações nas temperaturas com relação às variações nos parâmetros. É possível que os coeficientes de sensibilidade tenham valores absolutos altos, de modo que pequenas variações nos parâmetros causem grandes variações na variável medida. Caso contrário, basicamente o mesmo valor de temperatura seria obtido para uma faixa grande de valores dos parâmetros e o problema de estimativa seria difícil. Além disso, a matriz  $J^T J$  é singular e, portanto, o processo de estimativa de parâmetros é impossível, caso suas colunas sejam linearmente dependentes. Portanto, antes da solução do problema de estimativa de parâmetros, é necessário realizar-se uma análise da variação com o tempo dos coeficientes de sensibilidade. Assim, variáveis experimentais tais como localização e número de sensores, frequência de medidas, duração da experiência, etc., serão escolhidas de modo que os coeficientes de sensibilidade sejam grandes em magnitude e linearmente independentes. O determinante da matriz  $J^T J$  é geralmente maximizado nesta pré-análise.

O objetivo do termo  $\mu_{P_I}^k \Omega^k$  no processo iterativo é reduzir os efeitos do mal-condicionamento do problema inverso, que são matematicamente traduzidos pela matriz  $J^T J$  ser praticamente singular. De um modo geral o problema é mal condicionado no início do processo iterativo e, portanto, o fator  $\mu_{P_I}^k$  é relativamente grande nesta região, de tal forma que um passo bem pequeno é tomado na direção contrária à do gradiente  $S(P)$ . À medida que o processo iterativo avança em direção ao mínimo de  $S(P)$ , e o problema torna-se

melhor condicionado, o valor de  $\mu_{PI}^k$  é gradualmente reduzido e o método de Levenberg-Marquardt tende para o Método de Gauss ( $\mu_{PI}^k = 0$ ).

# Capítulo 5

## METODOLOGIA

### Modelos matemáticos e Métodos numéricos

Este capítulo apresenta o modelo matemático e as ferramentas numéricas empregadas no presente trabalho. Também é apresentado o modelo matemático e as condições de contorno utilizadas na simulação do problema direto.

#### 5.1 Equações de governo

Para este trabalho foi considerado o escoamento de um fluido newtoniano, incompressível e isotérmico. Dada essas considerações, as equações de governo são dadas pelas equações de continuidade, Equação (5.1), e quantidade de movimento, Equação (5.2).

$$\frac{\partial(u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (5.1)$$

$$\rho \left[ \frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial(u_i u_j)}{\partial x_j} \right] = -\frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (5.2)$$

- $\rho$ : massa específica do fluido [ $kg/m^3$ ];
- $t$ : tempo [ $s$ ];
- $u_i$ : componente da velocidade na direção  $i$  [ $m/s$ ];
- $x_i$ : coordenada cartesiana da direção  $i$  [ $m$ ];
- $p$ : pressão do fluido [ $N/m^2$ ];
- $\mu$ : viscosidade dinâmica do fluido [ $Pa.s$ ].

As Equações (5.1) e (5.2) representam um sistema de quatro equações (a equação da continuidade e as equações de momentum nas direções cartesianas -  $x, y, z$ ) e sua solução define os campos de pressão e velocidade ( $u, v, w$ ).

O sistema de equações proposto pelas Equações (5.1) e (5.2) fornecem uma solução analítica e uma boa solução numérica, desde que as condições de contorno sejam bem propostas.

Modelos de turbulência pré-definidos apresentam simplificações e aproximações que tendem a obter resultados de forma mais rápida. Dessa forma, o modelo proposto por Reynolds (1894a), denominado RANS (Reynolds Average Navier-Stokes), utiliza uma aproximação estatística para os efeitos de flutuação da turbulência no escoamento. No presente trabalho é utilizado o modelo RANS  $k - \epsilon$  RNG.

## 5.2 Modelagem da turbulência - RANS

No modelo proposto por Reynolds (Reynolds, 1894b), as variáveis nas equações de Navier-Stokes são decompostas em componentes médias e flutuações. Assumindo, de forma generalizada, a seguinte forma:

$$\phi = \bar{\phi} + \phi' \tag{5.3}$$

onde  $\bar{\phi}$  e  $\phi'$  são a média e flutuação, respectivamente, onde  $\phi$  pode assumir qualquer escalar, *i.e.* pressão, energia, velocidade.

Considerando um escoamento em regime permanente defini-se que a média de uma propriedade no tempo é constante ( $\partial\bar{\phi}/\partial t = 0$ ). Aplicando a Equação (5.3) nas Equações (5.1) e (5.2), para pressão e velocidade, e após considerações matemáticas e manipulações, obtém-se:

$$\frac{\partial\bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (5.4)$$

$$\rho\bar{u}_i \frac{\partial\bar{u}_i}{\partial x_i} = -\frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \mu \left( \frac{\partial\bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial\bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \rho\bar{u}'_i \bar{u}'_j \right] \quad (5.5)$$

A Equação (5.5) apresenta o termo  $-\rho\bar{u}'_i \bar{u}'_j$  que representa um tensor de tensões simétrico, conhecido como tensor de tensões de Reynolds. Esse termo avalia a contribuição das flutuações de turbulência no cálculo das médias.

### 5.3 Introdução

O presente trabalho visa obter valores para o fator de perfil  $k$  utilizando técnica de problemas inversos, utilizando o software Matlab (MathWorks, 2015). Os dados experimentais (referência), necessários para a aplicação da técnica, foram substituídos por dados de uma simulação numérica do perfil de velocidades, obtida pelo software Ansys Fluent (Ansys, 2013b). O problema direto, simulação do escoamento, também foi resolvido pelo Ansys Fluent (Ansys, 2013b). Dessa forma, foi necessária a elaboração de comandos específicos para interação desses softwares. Essa integração entre os programas é feita de forma que um terá domínio sobre o outro, neste caso o Matlab irá comandar a rotina de trabalho, enquanto o Ansys Fluent será uma ferramenta utilizada.

O Matlab é responsável por computar o script com o Problema Inverso, onde serão estabelecidas todas as variáveis do problema, tanto do problema inverso quanto as condições

de entrada no Ansys Fluent. Enquanto o Ansys Fluent tem como função a simulação direta do problema de escoamento.

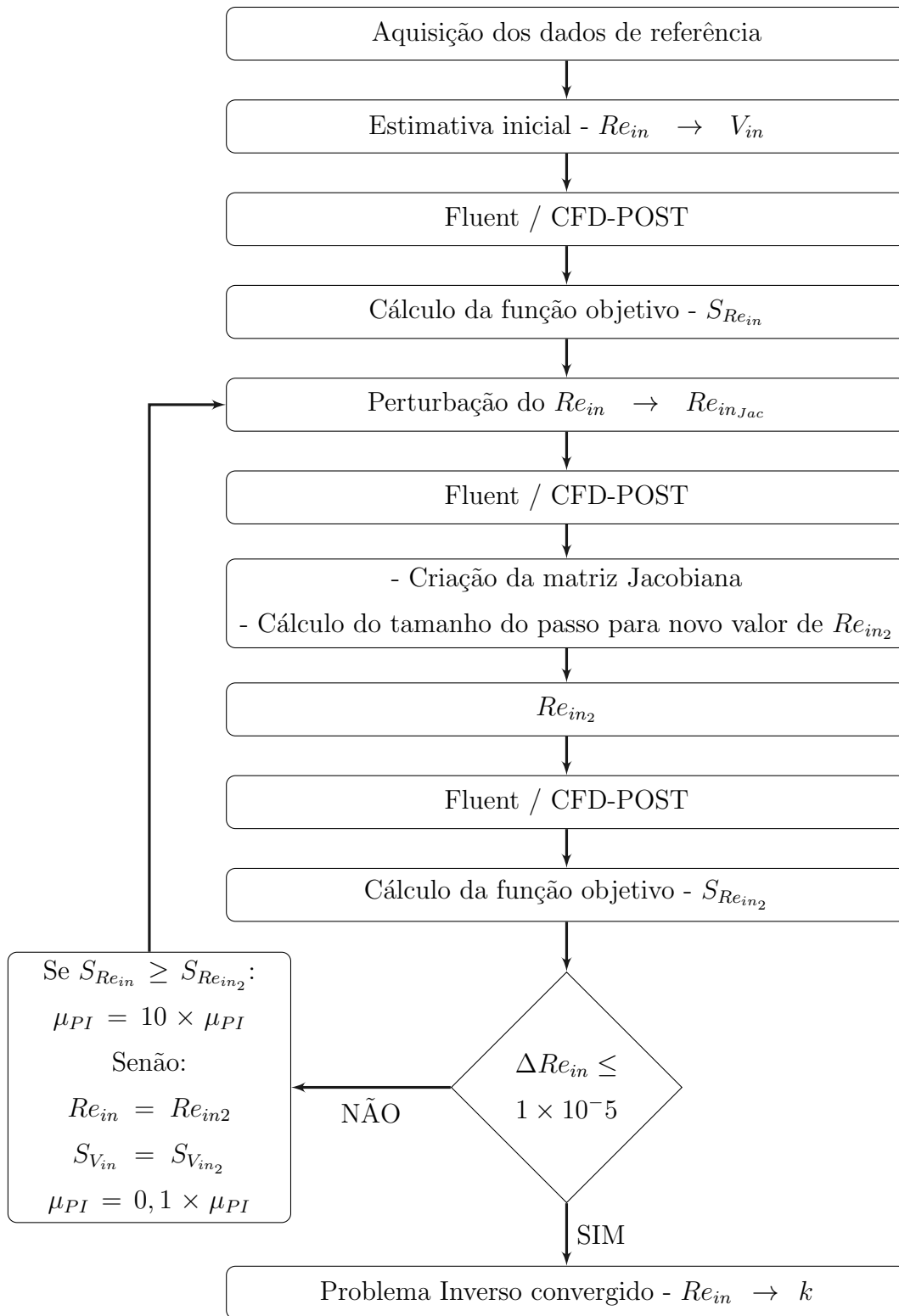
## 5.4 Descrição do problema

O objetivo do trabalho é definir e avaliar o valor para o fator de perfil  $k$  a partir da simulação de medidor ultrassônico de vazão sobre um escoamento. De maneira a explorar novas técnicas, foi proposto utilizar o modelo matemático dos problemas inversos. Como já foi comentado, tal modelo necessita da implementação de um problema direto, que neste trabalho é representado pelo processo de simulação do escoamento com auxílio do Ansys Fluent. Enquanto o processamento dos resultados e coleta de informações, para alimentar o script do problema inverso, são realizados no Ansys CFD-Post.

Dessa forma, foi necessário desenvolver uma interface de comunicação entre os programas Matlab, Ansys Fluent e CFD-Post (Anexo A), sendo o desenvolvimento e controle dessa interface um dos objetivos para este trabalho.

De acordo com a Eq. (3.15) o valor do fator  $k$  é definido pela razão entre a velocidade média do escoamento (obtida pela integral do campo de velocidade na área do escoamento) e a integral do perfil de velocidade sobre o caminho acústico. Sendo que o perfil de velocidade sobre o caminho acústico é uma variável de referência e também obtida nas simulações do problema direto. Enquanto a integral do perfil de velocidade na área, que representa a velocidade média de entrada do escoamento, é uma variável desconhecida.

Assim, o problema inverso é aplicado de forma a obter a velocidade média de entrada do escoamento. A partir de uma solução inicial para a velocidade, estabelecida a partir do número de Reynolds, o problema inverso irá estimar essa variável no problema direto (resolvido pelo Fluent) retornando um perfil de velocidade sobre o caminho acústico, que será processado no script do problema inverso. Caso essa solução inicial não seja próxima à referência, o problema inverso calcula uma nova solução inicial até que seja encontrado um valor próximo aos dados de referência. O procedimento pode ser visualizado na Fig.



**Figura 5.1.** Fluxograma do problema inverso.

(5.1) na forma de fluxograma, e através dos códigos presentes no Anexo A.

De maneira a compreender melhor o fluxograma, Figura (5.1), algumas etapas serão definidas a seguir:

- **Aquisição de dados de referência:**

Esta etapa é responsável por adquirir os dados de referência para o PI a partir dos arquivos das simulações realizadas por Martins (2012), onde as malhas utilizadas apresentaram maior nível de refinamento. Esses arquivos são processados de forma similar aos executados neste trabalho, utilizando o mesmo script executado pelo Ansys CFD-Post.

- **Estimativa inicial:**

Com a estimativa inicial estabelecida, com base no número de Reynolds, esta é convertida para velocidade em  $[m/s]$  para alimentar o script que irá executar o Ansys Fluent. Esta estimativa inicial defini a velocidade de entrada do escoamento para a primeira simulação.

- **Fluent / CFD-Post:**

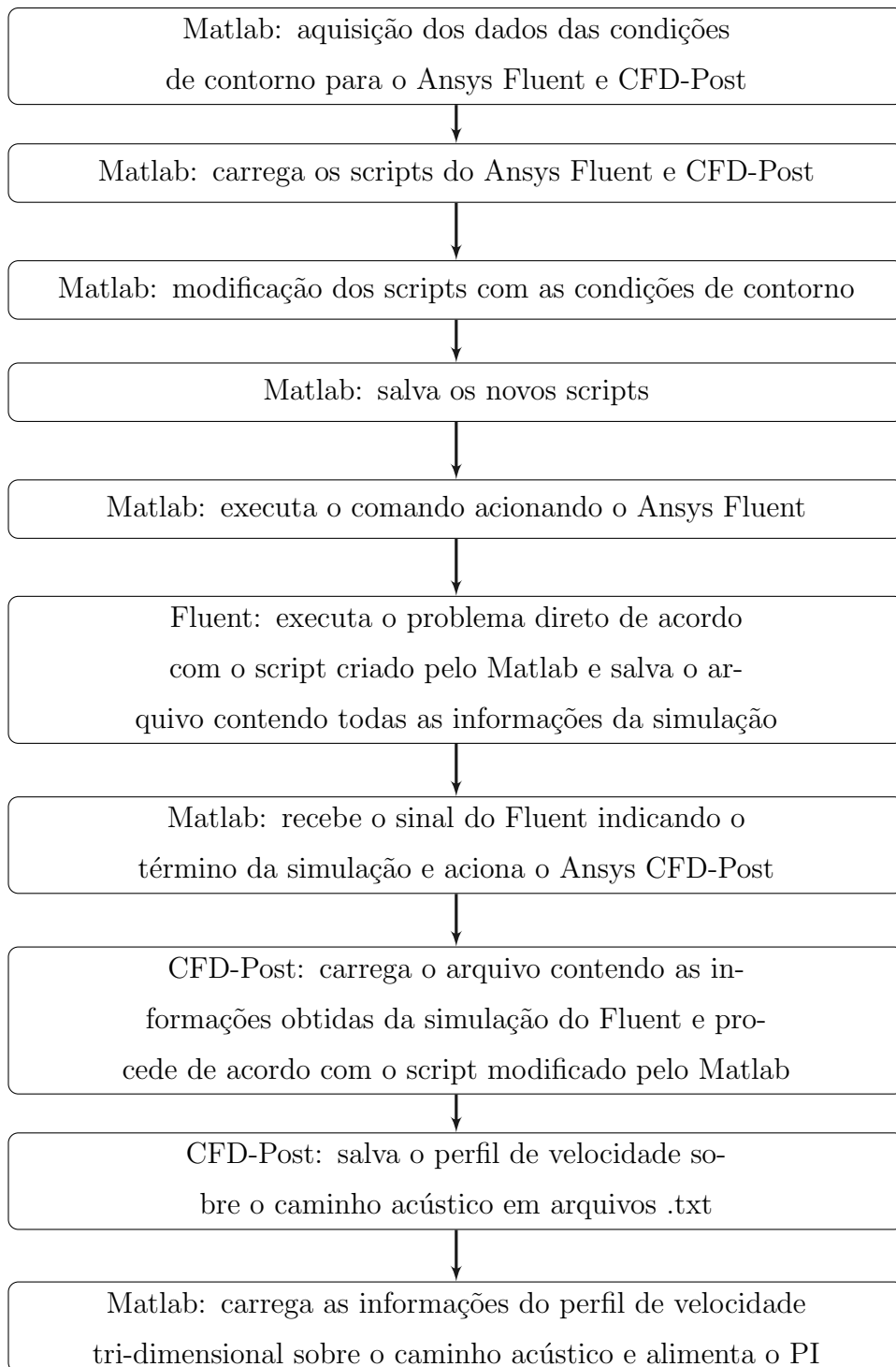
Esta etapa é responsável pela execução do problema direto. Primeiramente, o Matlab carrega os scripts do Ansys Fluent e CFD-Post (arquivos de texto que contém o passo-a-passo que esses programas irão executar). Uma das funções desses scripts é carregar variáveis de entrada, *i.e.* velocidade de entrada do escoamento no Ansys Fluent, e posição de coleta de dados no Ansys CFD-Post, sendo que outras configurações também podem ser alteradas pelo usuário. Depois de estabelecidas as novas configurações o Matlab salva os novos scripts que agora serão processados pelos Ansys Fluent e CFD-Post, respectivamente.

Depois que a simulação é realizada pelo Ansys Fluent, o arquivo contendo todas as informações da simulação é executado pelo Ansys CFD-Post, que irá recolher as informações necessárias (neste caso, campo de velocidade sobre o caminho acústico) e os salvará em arquivos *.txt* que podem ser processados pelo Matlab. A Figura (5.2) apresenta um resumo das etapas propostas pelo processo Fluent / CFD-Post.

- **Cálculo da função objetivo:**

A função objetivo proposta pelo PI irá atribuir um valor ao resultado obtido pelo





**Figura 5.2.** Fluxograma representando as etapas presentes em Fluent / CFD-Post na Figura (5.1).

problema direto. A cada iteração do PI dois valores são comparados, de forma a indicar o caminho a ser seguido, conforme apresentado no quadro da Figura (5.1).

- **Perturbação do  $Re_{in}$ :**

Nesta etapa o valor da estimativa inicial ( $Re_{in}$ ) é perturbado pela variável TFJ (termo de formação da matriz Jacobiana), gerando um novo valor para velocidade de entrada do fluido. Com esse novo valor ( $Re_{in,Jac}$ ) uma nova simulação do problema direto é feita.

- **Matriz Jacobiana:**

Com base na simulação do problema direto, a partir do  $Re_{in,Jac}$ , o perfil de velocidade sobre o caminho acústico é utilizado na criação da matriz Jacobiana. Como apresentado no Capítulo 4, a matriz Jacobiana influencia diretamente no valor da velocidade de entrada do escoamento para o próximo passo de comparação ( $Re_{in2}$ ) e na formação do termo  $\Omega^k$ .

## 5.5 Técnicas de Problemas Inversos

Aplicando o problema inverso (PI) ao trabalho é necessário identificar pontos importantes do processo. A função objetivo do trabalho é identificada pelo processamento e dados obtidos pelo Ansys Fluent. Esse é um dos pontos centrais do trabalho, onde o MatLab e o Ansys Fluent trabalham em conjunto até encontrar a solução do problema inverso.

O problema inverso é totalmente desenvolvido no ambiente do Matlab. Para começar, todo o processo foi dividido em vários scripts, de forma a facilitar edições e evitar a repetição de blocos, que são chamados várias vezes durante o processamento do PI.

No primeiro script todos os dados referentes a simulação desenvolvida (e.g. estimativa inicial, distância de coleta de dados, densidade, diâmetro, ...) são apresentados de forma que possam ser usados por todos os outros. Também é realizada a coleta de dados de referência e salvo no sistema. A partir dessa etapa é carregado o script do problema inverso, que segue o caminho descrito pela Fig. (5.1).

O PI é aplicado para obter variáveis de entrada do fluido (velocidade de entrada -  $Re_{in}$ ) a partir de leituras de um medidor ultrassônico de vazão. Como não foram viabilizados dados experimentais, tais medidas foram obtidas com o auxílio do programa de simulação

Ansys Fluent, sendo assim responsável pela simulação do problema direto do PI.

Como o Matlab é responsável por gerenciar as informações, foi necessário desenvolver uma interface onde fosse possível comandar os parâmetros de simulação do Ansys Fluent. Como este representa o problema direto, o mesmo é executado alguma vezes a cada passo do PI.

Sendo assim, o mecanismo dessa interface funciona da seguinte maneira:

1. Inserir a informações iniciais no Matlab;
2. Matlab aciona o Fluent;
3. Fluent executa a simulação do escoamento e salva os dados da simulação;
4. Matlab recebe a informação que a simulação foi encerrada;
5. Matlab aciona o programa de pós-processamento (Ansys CFD-POST);
6. CFD-Post processa as informações da simulação e salva os arquivos com as informações requeridas (variáveis de velocidade);
7. Matlab lê as informações e alimenta o PI.

Esse mecanismo representa somente a execução do problema direto e aquisição de dados para alimentar o PI. De modo a reduzir o tempo de processamento do PI, foi possível reduzir a execução desse mecanismo a três vezes por passo do PI. Sendo que o tempo de simulação do problema direto varia de acordo com o problema proposto, por exemplo, resultado da escolha de malha a ser utilizada, velocidade de entrada do fluido, além de fatores externos ao problema, como poder de processamento. Esse ultimo pode ser evidenciado a partir de simulações realizadas em diferentes máquinas com o mesmo teste, onde obtém-se uma redução entre 30% e 60% no tempo de execução do PI.

## Influência dos parâmetros do Problema Inverso

Como já foi demonstrado, o PI apresenta algumas variáveis no seu desenvolvimento, tais como:  $\mu_{PI}$  e  $\epsilon$ , responsáveis pela formação do novo chute e perturbação do chute, respectivamente. Tais variáveis devem ser definidas de forma que apresentem uma pequena alteração no dado inicial do passo e que gere um resultado de comparação, porém não podem ser tão pequenas onde o problema direto não apresente variação do chute inicial.

Sendo que, a variável  $\mu_{PI}$  tem seu valor alterado durante a execução do PI. Esse valor pode aumentar ou diminuir de acordo com o resultado do PI alcançando um valor de convergência. Essa variável representa o tamanho da variação da velocidade de entrada do fluido. Onde, a medida que o PI tenda convergir, o valor de  $\mu_{PI}$  tende a diminuir, fazendo que os valores de  $V_{in}$  aproximem-se, e no caso contrário, que o valor de  $V_{in}$  está longe da convergência, o valor de  $\mu_{PI}$  tenderá a aumentar e com isso aumentar o intervalo entre as medidas de comparação.

Já a variável  $\epsilon$  é um fator utilizado para causar uma perturbação da variável de entrada e gerar a matriz Jacobiana. Essa matriz contribui para a formação do novo valor da velocidade de entrada, que será comparada com o  $V_{in}$  de referência do passo.

De forma que esses dados não causem interferência no problema abordado, foram realizados testes para avaliar o impacto delas no resultado. Assim, o PI foi testado variando os termos  $\mu_{PI}$  no intervalo de  $10^{-1}$  a  $10^{-5}$  e  $\epsilon$  de  $10^{-1}$  a  $10^{-3}$ , com variação de  $10^{-1}$  a cada teste.

## 5.6 Parâmetros de referência

A base de dados de referência para o campo de velocidade tridimensional de um escoamento, utilizado no presente trabalho, foi considerado a partir de simulações numéricas de malhas extremamente refinadas, do trabalho apresentado por Martins (2012).

Assim, a Tabela (5.1) apresenta os valores de referência para simulação do escoamento,

com base na velocidade de entrada do fluido em função do número de  $Re$ , sendo esses os valores a serem alcançados pelo PI.

De acordo com trabalho realizado por Martins (2012), foram estudados dez casos, variando a velocidade de entrada do escoamento, como mostrado na Tabela (5.1). Para este trabalho, cada caso referente a uma velocidade será simulado com diferentes malhas. Por exemplo, no Caso 1 (tubo reto), são consideradas cinco malhas, resultando em 50 testes realizados, sendo realizados cinco testes para cada velocidade de referência.

Referência		Reynolds ( $Re$ )
Caso 1	Caso 2	
SP1	SE1	10.000
SP2	SE2	20.000
SP3	SE3	40.000
SP4	SE4	60.000
SP5	SE5	100.000
SP6	SE6	200.000
SP7	SE7	400.000
SP8	SE8	600.000
SP9	SE9	1.000.000
SP10	SE10	2.000.000

**Tabela 5.1.** Referência dos casos estudados em função do número de  $Re$  (Martins, 2012)

De forma a simular parâmetros experimentais, que apresentam erros de leitura referentes ao equipamento utilizado, foram inseridos erros aleatórios aos dados simulados. Foram avaliados três níveis de erro aleatório máximo: 1%, 5% e 10%, onde foram inseridos a cada ponto de leitura, *i.e.* no caso com 1000 pontos sobre o caminho acústico, em cada ponto foi inserido um erro aleatório (utilizando o Matlab) que se encontra no intervalo de zero até o erro máximo considerado.

## 5.7 Ansys Fluent

Durante a execução do Problema Inverso o Ansys Fluent resolve o problema direto, responsável por simular as novas condições de entrada encontradas no passo anterior. Neste capítulo é abordada a condição padrão em que os testes são realizados.

O Fluent é acionado a partir de uma linha de comando executada no Matlab, que carrega o script responsável por inserir todas as condições de simulação e variáveis do problema.

O script será responsável por indicar a condição inicial de escoamento, definindo a velocidade de entrada do fluido na tubulação. Outros termos, como número de iterações, modelo de turbulência, método de iteração, entre outros, também podem ser alterados a partir do Matlab, desde que devidos ajustes sejam feitos no script principal, porém estas variáveis são considerados constantes no presente trabalho.

### 5.7.1 Geometria e Malhas

Para o presente trabalho duas geometrias foram consideradas: a primeira representa um trecho reto de  $100D$  de comprimento. Essa geometria foi selecionada para validação das malhas e referência, e também porque existem correlações empíricas para escoamento turbulento completamente desenvolvido possibilitando a integração analítica e formulações para o fator de perfil  $k$ . Já a segunda geometria apresenta uma curva à montante da seção de medição, simulando uma perturbação no escoamento.

A Tabela (5.2) apresenta as principais informações de ambas geometrias. A Fig. (5.3) apresenta a representação da tubulação utilizada para o segundo caso.

Tal geometria foi escolhida por ser similar a tubulações de gás de queima (*flare*), encontrados em plataformas de exploração de petróleo e gás. Onde essas tubulações tem limitações quanto a suas dimensões por normas de segurança.

Tanto a geometria quanto a malha foram desenvolvidos na plataforma de programas da

Diâmetro	0,3m
Trecho reto	30m (100D)
Trecho reto após a curva	30m (100D)
Trecho reto antes da curva	0,6m (2D)
Raio de curvatura	0,45 (1,5D)

**Tabela 5.2.** Dados das geometrias.

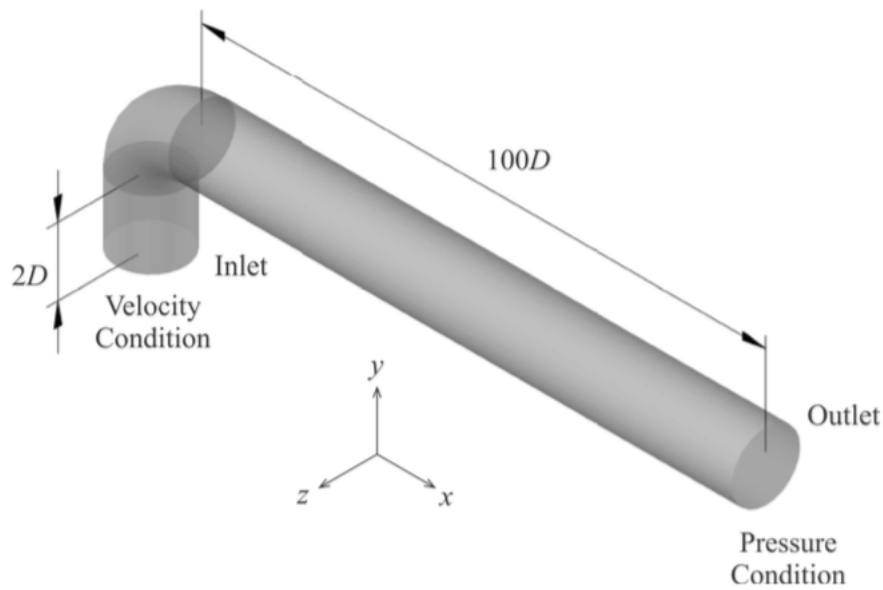
Ansys. Assim que a geometria foi criada, um conjunto de malhas numéricas foi elaborado, passando de uma malha mais grosseira até uma mais refinada, conforme apresentado nas Tabelas (5.3) e (5.4). O tamanho das malhas foi definido a partir do número de nós.

Os medidores de vazão por ultrassom foram posicionados de forma que o transdutor A, de acordo com a Figura (3.1), ficasse a  $x$  m à jusante, sendo a distância em função equivalente ao diâmetro utilizando, *i.e.*  $80D$ , posição equivalente a 80 diâmetros (24m). O posicionamento dos transdutores foi definido com um ângulo  $\alpha = 45^\circ$ , dessa forma, a distância  $L_{AP}$  é a hipotenusa de um triângulo retângulo. Com a finalidade de avaliar a convergência das malhas, foram realizados testes da geometria com trecho reto de  $100D$  de comprimento sem curva (Caso 1). Os dados utilizados para verificar a condição do escoamento foram obtidos com posicionamento dos transdutores a uma distância de  $80D$  da entrada.

Malha	Tamanho máx. do nó [mm]	Quantidade de nós
01	52,5	135.786
02	45	187.041
03	40	241.167
04	30	437.567
05	25	634.019

**Tabela 5.3.** Tamanhos das malhas para geometria de trecho reto - Caso 1.

A precisão da solução por simulação numérica está associada à qualidade da malha numérica. Porém, quanto mais nós a malha se divide, maior é o custo computacional



**Figura 5.3.** Geometria do caso 2.

Malha	Tamanho máx. do nó [mm]	Quantidade de nós
01	52,5	142.297
02	45	195.596
03	40	252.196
04	30	457.295
05	25	662.284
06	16,5	1.574.098

**Tabela 5.4.** Tamanhos das malhas para geometria com curva - Caso 2

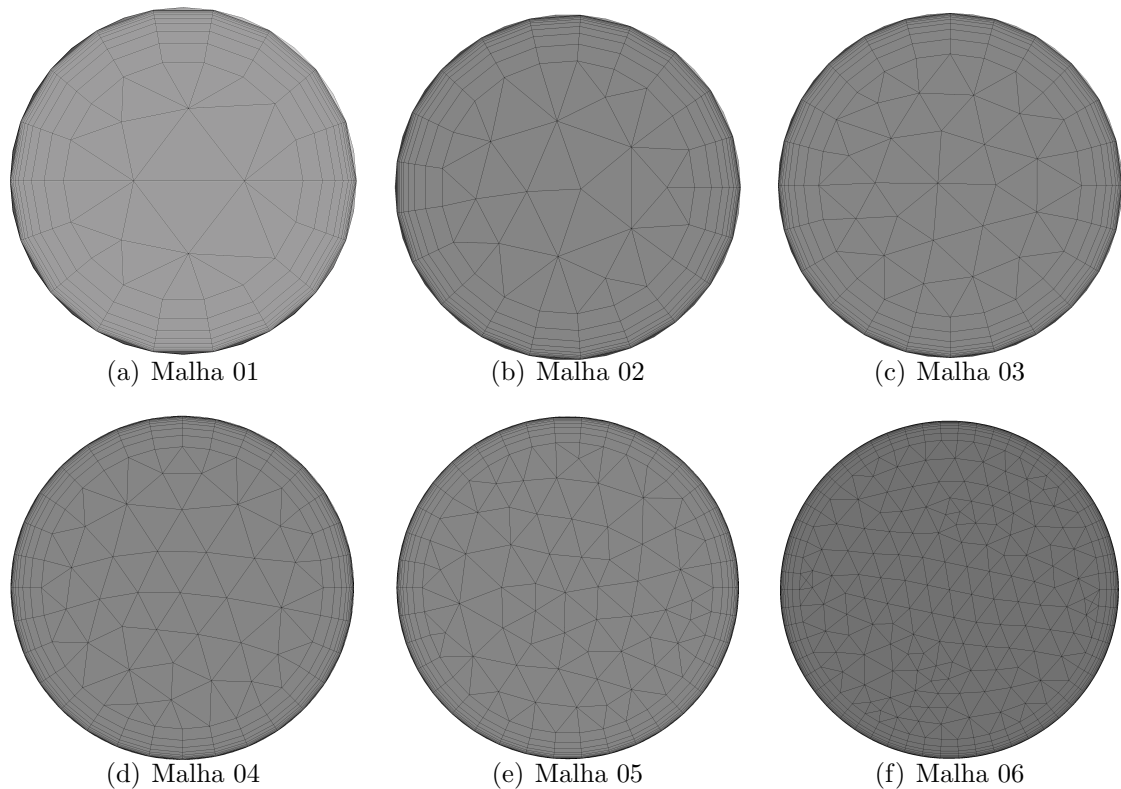
da solução obtida. Assim, a seleção da malha utilizada para as simulações numéricas no presente trabalho, levou em consideração a precisão da solução, associada a um tempo de processamento exequível.

Além de definidas pelo número de nós, as malhas também apresentam um refino de malha na parede da tubulação, efeito que pode ser observado na Fig. (5.4). Para efeito de comparação, a malha utilizada por Martins (Martins, 2012) possuía  $4,76 \times 10^6$  nós para o caso da geometria com curva.



Como efeito da utilização da técnica de problemas inversos nesse trabalho, o problema direto é executado pelo menos 2 vezes a cada iteração do PI, resultando na simulação através do Ansys Fluent, onde o tempo de processamento está diretamente relacionado ao tamanho das malhas. Dessa forma, a variável tempo, para o PI, torna-se um fator determinante.

O tamanho das malhas utilizadas foram significativamente menores em comparação as utilizadas por Martins (2012) por limitações de equipamento (inicialmente disponíveis), e pela necessidade de simular o problema direto várias vezes durante o PI. Como efeito dessas limitações é possível avaliar o rendimento do PI utilizando malhas com baixo refinamento. Com a disponibilidade de equipamento mais robusto, o Caso 2 foi testado com uma malha contendo, aproximadamente, um terço da quantidade de nós (Malha 06) presente no trabalho de Martins (2012).



**Figura 5.4.** Plano de entrada das malhas da geometria com curva - Caso 2.

### 5.7.2 Condições de simulação

Nesta seção serão descritas as condições padrão de simulação no ambiente de Ansys Fluent. A Tabela (5.5) discrimina os principais parâmetros controlados no ambiente do Ansys Fluent para um escoamento turbulento em regime permanente. Para o presente trabalho o fluido escolhido foi o ar atmosférico, a Tabela (5.6) apresenta as propriedades do fluido utilizado para as simulações.

Modelo de simulação	Estacionária
Modelo de turbulência	$k - \varepsilon RNG$
Método de solução	SIMPLE
Condição de parada: (RMS)	
- continuidade	$1 \times 10^{-5}$
- velocidade $x$	$1 \times 10^{-5}$
- velocidade $y$	$1 \times 10^{-5}$
- velocidade $z$	$1 \times 10^{-5}$
- Energia cinética de turbulência ( $k$ )	$1 \times 10^{-5}$
- Taxa de dissipação de turbulência ( $\varepsilon$ )	$1 \times 10^{-5}$

**Tabela 5.5.** Parâmetros do ambiente Ansys Fluent.

Densidade ( $\rho$ )	Viscosidade dinâmica ( $\mu$ )
$[kg/m^3]$	$[Pa/s]$
1.185	$1.831 \times 10^{-5}$

**Tabela 5.6.** Propriedades do ar atmosférico a  $25^\circ C$

### Modelo de turbulência

O Ansys Fluent apresenta vários modelos de turbulência pré-definidos, dentre eles o modelo  $k - \varepsilon RNG$ . Esse modelo foi escolhido em função do trabalho proposto por Martins

(2012), por seus resultados serem dados como referência, propondo um modelo de problema direto mais próximo ao experimental (neste caso, as simulações de Martins (2012)).

O modelo  $k-\varepsilon$  trabalha com as equações de energia cinética de turbulência ( $k$ ) e a taxa de dissipação de turbulência ( $\varepsilon$ ). Dessa forma o modelo é similar ao modelo  $k-\varepsilon$  *Standard*, porém, com o uso de ferramenta estatística, a teoria da renormalização de grupo (*RNG*), passa a apresentar os seguintes refinamentos: (Ansys, 2013a)

- O modelo *RNG* apresenta um termo adicional na equação de  $\varepsilon$ , que melhora a precisão para fluxos laminares.
- O efeito dos vórtices é incluído no modelo *RNG*, melhorando a eficiência para fluxos com vórtices.
- A teoria *RNG* apresenta uma fórmula analítica para o número de Prandtl em escoamento turbulentos, enquanto o modelo *Standard* é definido pelo usuário, apresentando valores constantes.
- Enquanto o modelo *Standard* é recomendado para escoamentos de altos valores de Reynolds, o modelo *RNG* apresenta uma fórmula derivada-analítica diferencial para a viscosidade efetiva, que representa os efeitos de escoamento de baixo Reynolds. Porém o uso desta técnica depende do tratamento adequado para regiões próximas a parede.

O modelo  $k-\varepsilon$  *RNG* é derivado da fórmula instantânea das equações de Navier-Stokes, usando a teoria matemática da "renormalização de grupo". A derivação analítica resulta em um modelo com constantes diferentes ao apresentado pelo modelo *Standard*, e termos e funções adicionais nas equações de transporte de  $k$  e  $\varepsilon$  (Ansys, 2013a).

## Método de Solução

A solução do modelo matemático utilizado pelo Ansys Fluent é baseado em dois métodos: Solução baseada na pressão ou Solução baseada na densidade. Historicamente, o modelo baseado na pressão foi desenvolvido para escoamento incompressíveis de baixa ve-

locidade, enquanto o modelo baseado na densidade para escoamento compressíveis de alta velocidade. Porém, os dois métodos foram revisados e reformulados ao longo das atualizações do software, de forma que ambos operem em uma escala de condições de escoamento maior que a inicialmente proposta (Ansys, 2013a).

Apesar das diferenças entre os métodos, ambos utilizam a técnica de volume de controle, a qual consiste em:

- Divisão do domínio em volumes de controle discretos a partir de uma malha computacional.
- Integração das equações de governo para cada volume de controle, para construir equações algébricas para variáveis dependentes discretas, tais como velocidade, pressão, temperatura, e escalares.
- Linearização das equações e soluções discretas resultantes do sistema linear de equações, de forma a atualizar os valores das variáveis dependentes.

Devido ao grande número de simulações e do tempo de processamento de cada uma, apenas o modelo de algoritmo SIMPLE foi implementado. Sendo que esse modelo faz uso das relações entre as correções de velocidade e pressão para aplicar a conservação de massa e obter o campo de pressão (Ansys, 2013a).

O método SIMPLE é utilizado por apresentar em sua metodologia uma estimativa inicial do campo de pressão, e assim resolver as equações discretizadas de momento. Então, a correção da pressão é calculada com auxílio da manipulação das equações de continuidade. Assim, pressão e velocidade são ajustadas, e as equações discretizadas de transporte resolvidas. Se a convergência é alcançada, o algoritmo para, caso contrário, ele reinicia o processo com os valores ajustados, ao invés de estimativas. (Martins, 2012)

## Condição de parada

De modo que a simulação direta obtenha uma convergência, alguns limites são estabelecidos de forma a interromper o processo. O Ansys Fluent pode trabalhar com os resíduos

das seguintes variáveis, para o modelo de turbulência, como um limitador do processo iterativo, podendo optar quais são relevantes ao problema.

- Continuidade;
- Velocidade  $x$ ;
- Velocidade  $y$ ;
- Velocidade  $z$ ;
- Energia cinética de turbulência ( $k$ );
- Taxa de dissipação de turbulência ( $\varepsilon$ );

O valor de  $1 \times 10^{-5}$ , Tabela (5.5), é definido como limite de convergência e foi definido de acordo com a variável velocidade, onde uma variação menor que este valor não traria uma influência considerável no resultado, além de prolongar o tempo de processamento do Ansys Fluent, podendo não atingir o limite de convergência.

## 5.8 Equipamento

O projeto desse trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Fenômenos de Transporte Computacional (LFTC) da Universidade Federal do Espírito Santo.

O LFTC é equipado com uma máquina com a seguinte configuração:

- Memória: 128 Gb
- Processador: Intel®Xeon(R) CPU ES-2699 v3 @ 2.30GHz  $\times$  16
- Sistema Operacional: Linux, Ubuntu 14.04 LTS 64-bit
- Disco rígido: 2.4 TB

# Capítulo 6

## Resultados e Discussões

Com o intuito de validar as geometrias, malhas e procedimentos foram realizados vários testes, e os resultados são apresentados a seguir.

Nesses resultados, onde houver a menção à fator de perfil  $k(AGA)$ , corresponde ao emprego da Equação (3.22), aplicando o número de Reynolds encontrado pela dada simulação a um escoamento turbulento completamente desenvolvido, conforme definido em A.G.A. Report No 9 (AGA, 2007).

Os melhores resultados para cada faixa de velocidade de referência, de acordo com a Tabela (5.1), encontram-se destacados, demonstrando a malha com menor diferença com a referência.

### 6.1 Geometria em trecho reto - Caso 1

A geometria em trecho reto foi simulada para fins de comparação do fator  $k$  obtido pela técnica proposta com aquele obtido com escoamento completamente desenvolvido e de solução analítica. Serão retratados os efeitos do escoamento ao longo da tubulação sem curva, para 5 malhas distintas (5.3). Nesse caso, os dados simulados para escoamento completamente desenvolvidos foram considerados a uma distância de  $80D$ , para

uma comparação entre os valores encontrados através da técnica de problema inverso - Equação (3.15) e a solução analítica para escoamento completamente desenvolvido, tal como descrito em A.G.A. Report No 9 (AGA, 2007) - Equação (3.22).

### 6.1.1 Perfil de velocidade

Nesta seção serão validados os perfis de velocidade para escoamento em tubo reto nas amostras SP 1, 5 e 10 ( $Re = 1 \times 10^4$ ,  $1 \times 10^5$  e  $2 \times 10^6$ , respectivamente, conforme definido na Tabela (5.1)), no intuito de representar três velocidades de escoamento. Para cada amostra foram comparados sete posições do perfil de velocidade (linhas tracejadas) a  $80D$  da entrada do tubo, com a finalidade de comparar as diferentes malhas propostas, tal como visualizado nas Figuras (6.1), (6.2) e (6.3). Essa divisão foi utilizada de forma a poder avaliar os efeitos do refinamento da malha nas regiões em posições afastadas da parede da tubulação.

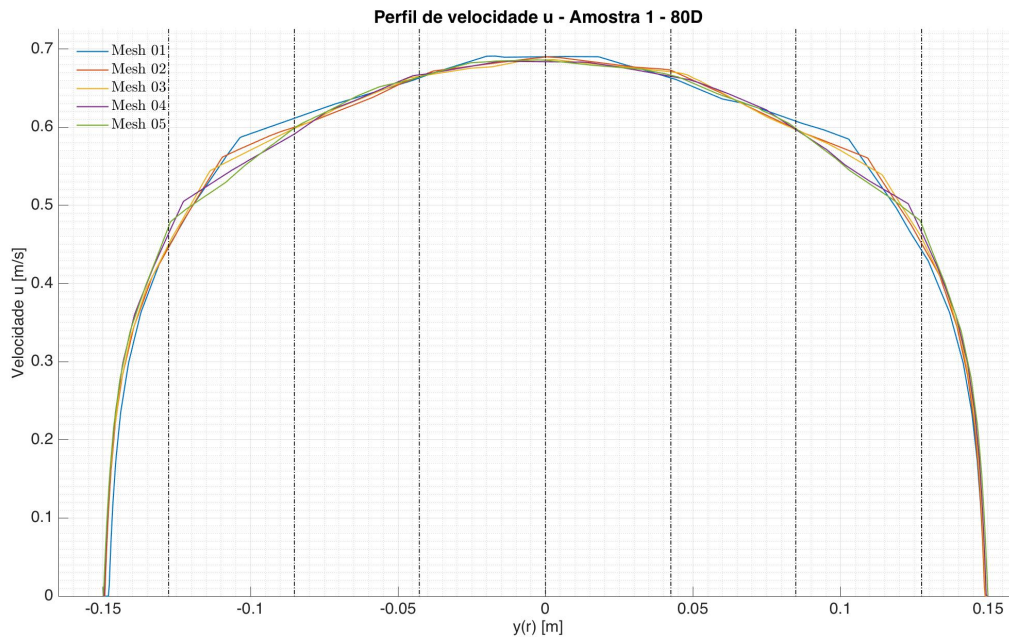
Ref. $y(r)$	Mesh 1	Mesh 2	Dif(%)	Mesh 2	Mesh 3	Dif(%)
-0.1278	0.4470	0.4461	<b>0.1907</b>	0.4461	0.4500	-0.8672
-0.0851	0.6114	0.5999	1.8825	0.5999	0.5983	<b>0.2712</b>
-0.0428	0.6629	0.6646	-0.2480	0.6646	0.6651	<b>-0.0767</b>
0.0000	0.6901	0.6898	<b>0.0379</b>	0.6898	0.6861	0.5311
0.0425	0.6629	0.6729	-1.5005	0.6729	0.6708	0.3103
0.0848	0.6077	0.5974	1.6908	0.5974	0.5968	0.1075
0.1275	0.4425	0.4513	-1.9772	0.4513	0.4587	-1.6354
Ref. $y(r)$	Mesh 3	Mesh 4	Dif(%)	Mesh 4	Mesh 5	Dif(%)
-0.1278	0.4500	0.4639	-3.0919	0.4639	0.4726	-1.8845
-0.0851	0.5983	0.5913	1.1719	0.5913	0.5990	-1.3020
-0.0428	0.6651	0.6669	-0.2797	0.6669	0.6641	0.4263
0.0000	0.6861	0.6837	0.3560	0.6837	0.6855	-0.2702
0.0425	0.6708	0.6650	0.8610	0.6650	0.6665	<b>-0.2236</b>
0.0848	0.5968	0.5970	<b>-0.0383</b>	0.5970	0.5984	-0.2250
0.1275	0.4587	0.4658	<b>-1.5653</b>	0.4658	0.4762	-2.2162

**Tabela 6.1.** Convergência da componente axial do campo de velocidades,  $u$  [m/s], para diferentes malhas a 80D - Amostra SP 1.



Ref. $y(r)$	Mesh 1	Mesh 2	Dif(%)	Mesh 2	Mesh 3	Dif(%)
-0.1278	4.5776	4.5580	<b>0.4281</b>	4.5580	4.5796	-0.4754
-0.0851	5.8772	5.7889	1.5022	5.7889	5.7694	<b>0.3371</b>
-0.0428	6.2719	6.2828	-0.1743	6.2828	6.2833	<b>-0.0086</b>
0.0000	6.4703	6.4617	0.1330	6.4617	6.4336	0.4353
0.0425	6.2691	6.3473	-1.2481	6.3473	6.3272	0.3174
0.0848	5.8493	5.7676	1.3972	5.7676	5.7653	<b>0.0407</b>
0.1275	4.5444	4.6011	-1.2478	4.6011	4.6527	-1.1207
Ref. $y(r)$	Mesh 3	Mesh 4	Dif(%)	Mesh 4	Mesh 5	Dif(%)
-0.1278	4.5796	4.6916	-2.4452	4.6916	4.7474	-1.1896
-0.0851	5.7694	5.7177	0.8969	5.7177	5.7742	-0.9884
-0.0428	6.2833	6.3091	-0.4098	6.3091	6.2840	0.3984
0.0000	6.4336	6.4317	<b>0.0303</b>	6.4317	6.4466	-0.2330
0.0425	6.3272	6.2941	0.5218	6.2941	6.3060	<b>-0.1886</b>
0.0848	5.7653	5.7621	0.0553	5.7621	5.7683	-0.1078
0.1275	4.6527	4.7028	<b>-1.0760</b>	4.7028	4.7800	-1.6416

**Tabela 6.2.** Convergência da componente axial do campo de velocidades,  $u$  [m/s], para diferentes malhas a 80D - Amostra SP 5.



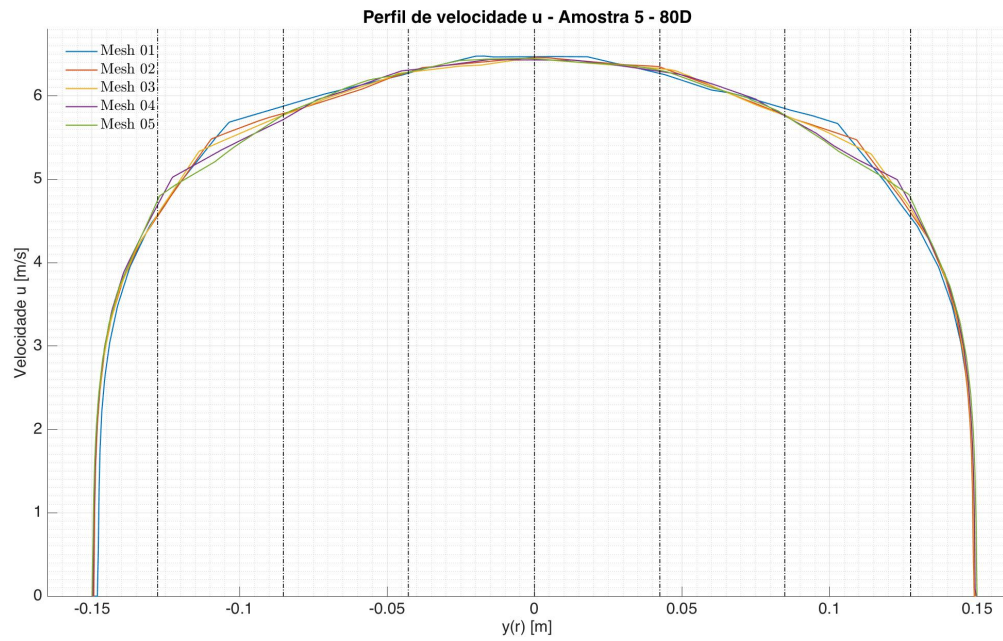
**Figura 6.1.** Convergência da componente axial do campo de velocidades da amostra SP 1 - 80D

Com base nas Tabelas (6.1), (6.2) e (6.3) nota-se que os três casos apresentam diferenças que variam de décimos percentuais, em posições mais próximas ao centro do duto, até 2.44%, em posições mais próximas à parede do duto. Tais desvios entre as malhas pode ser resultante do processo de criação das malhas, ao passar da zona de camada-limite, região próxima a parede da tubulação, para a região central o tamanho dos elementos sofreu um aumento brusco, resultando nas descontinuidades observadas nas Figuras (6.1), (6.2) e (6.3).

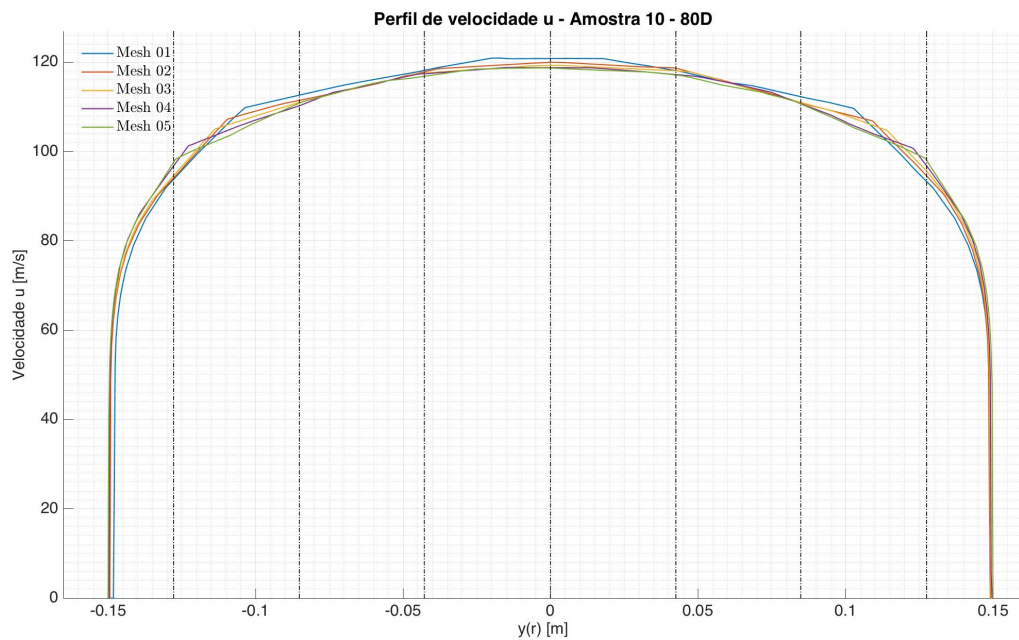
Porém, é possível notar que os resultados encontrados após essa região de transição do tamanho de elementos as diferenças percentuais ficaram abaixo de 1%, de um modo geral.

Para o teste com velocidade menor (Amostra SP 1), é possível destacar os resultados da malha Mesh 2, a qual apresentou diferenças menores que 1% com a malha posterior.

No teste com velocidade intermediária (Amostra SP 5), o melhor caso foi da malha Mesh 2, também apresentando em quase todos os resultados diferenças menores que 1%. Porém neste teste, as malhas seguintes também apresentaram diferenças menores que 1%, em



**Figura 6.2.** Convergência da componente axial do campo de velocidades da amostra SP 5 - 80D



**Figura 6.3.** Convergência da componente axial do campo de velocidades da amostra SP 10 - 80D

Ref. $y(r)$	Mesh 1	Mesh 2	Dif(%)	Mesh 2	Mesh 3	Dif(%)
-0.1278	93.7461	94.0584	<b>-0.3331</b>	94.0584	94.5981	-0.5739
-0.0851	112.6051	111.4404	1.0344	111.4404	110.9646	<b>0.4270</b>
-0.0428	118.1452	117.8218	0.2737	117.8218	117.5342	0.2441
0.0000	120.8033	119.9608	0.6974	119.9608	119.2502	0.5924
0.0425	118.0961	118.6471	-0.4666	118.6471	118.0365	0.5146
0.0848	112.2572	110.9277	1.1843	110.9277	110.9676	<b>-0.0360</b>
0.1275	93.2932	94.5319	-1.3278	94.5319	95.6307	<b>-1.1624</b>
Ref. $y(r)$	Mesh 3	Mesh 4	Dif(%)	Mesh 4	Mesh 5	Dif(%)
-0.1278	94.5981	96.7533	-2.2782	96.7533	97.5885	-0.8632
-0.0851	110.9646	110.2316	0.6606	110.2316	110.8350	-0.5475
-0.0428	117.5342	117.4032	<b>0.1115</b>	117.4032	116.8311	0.4873
0.0000	119.2502	118.7580	0.4127	118.7580	118.6611	<b>0.0816</b>
0.0425	118.0365	117.2160	0.6951	117.2160	117.1116	<b>0.0891</b>
0.0848	110.9676	110.7008	0.2404	110.7008	110.6329	0.0613
0.1275	95.6307	96.7897	-1.2120	96.7897	98.0405	-1.2923

**Tabela 6.3.** Convergência da componente axial do campo de velocidades,  $u$  [m/s], para diferentes malhas a 80D - Amostra SP 10.

menor quantidade.

Já no teste com de alta velocidade (Amostra SP 10), os resultados se mostraram similares ao encontrados no teste com a Amostra SP 5.

Com base nesses resultados preliminares é possível destacar que a malha Mesh 2 já apresentou boa convergência do perfil de velocidade na coleta de dados a  $80D$ .

### 6.1.2 Fator de perfil $k$

Nesta seção é apresentada a Tabela (6.4), que mostra a diferença entre os resultados encontrados nas simulações das malhas 1-5, do Caso 1, com o valor do fator de perfil  $k$  calculado pela Equação (3.22) da AGA (2007).

Assim, a primeira coluna apresenta os valores encontrados com a Equação (3.22), sendo parâmetro de comparação para o teste de malha. Cada resultado representa uma simulação do PI.

Para as Amostras SP 1 – 4, com velocidades mais baixas, as malhas Mesh 2 e Mesh 3 apresentaram menores diferenças, inferiores a 0.5%, em relação aos dados de referência. Enquanto as Amostras SP 5 – 10 tiveram melhores resultados nas malhas mais refinadas, Mesh 4 e Mesh 5.

Em vista desses resultados nota-se que, dependendo da velocidade de referência a ser utilizada, é possível estimar o grau necessário de refinamento da malha a ser utilizada, implicando diretamente no tempo de processamento do PI.

Caso não se tenha uma estimativa inicial da velocidade de entrada do escoamento as malhas Mesh 4 e Mesh 5 apresentam diferenças menores a 1.3% dentro do campo de velocidades estudado nesse trabalho, mas é possível destacar que a maior parte dos resultados apresentou diferenças abaixo 0.8%.

Ref	k (AGA)	Mesh 1	Dif(%)	Mesh 2	Dif(%)	Mesh 3	Dif(%)
SP1	0.9261	0.9311	0.5401	0.9249	<b>-0.1247</b>	0.9221	-0.4259
SP2	0.9286	0.9364	0.8290	0.9304	0.1933	0.9277	<b>-0.0944</b>
SP3	0.9312	0.9411	1.0443	0.9351	0.4161	0.9323	<b>0.1178</b>
SP4	0.9328	0.9441	1.2008	0.9380	0.5655	0.9350	<b>0.2443</b>
SP5	0.9347	0.9485	1.4595	0.9421	0.7899	0.9390	0.4669
SP6	0.9373	0.9527	1.6191	0.9479	1.1203	0.9452	0.8418
SP7	0.9399	0.9587	1.9550	0.9530	1.3707	0.9517	1.2410
SP8	0.9415	0.9621	2.1422	0.9561	1.5302	0.9547	1.3907
SP9	0.9434	0.9655	2.2800	0.9604	1.7664	0.9591	1.6381
SP10	0.9461	0.9669	2.1497	0.9620	1.6494	0.9611	1.5598

Ref	k (AGA)	Mesh 4	Dif(%)	Mesh 5	Dif(%)
SP1	0.9261	0.9140	-1.3179	0.9139	-1.3238
SP2	0.9286	0.9203	-0.9027	0.9201	-0.9254
SP3	0.9312	0.9250	-0.6655	0.9244	-0.7350
SP4	0.9328	0.9277	-0.5405	0.9270	-0.6078
SP5	0.9347	0.9316	<b>-0.3225</b>	0.9305	-0.4362
SP6	0.9373	0.9375	<b>0.0284</b>	0.9355	-0.1826
SP7	0.9399	0.9443	0.4709	0.9419	<b>0.2181</b>
SP8	0.9415	0.9486	0.7547	0.9459	<b>0.4778</b>
SP9	0.9434	0.9542	1.1360	0.9512	<b>0.8205</b>
SP10	0.9461	0.9575	1.1865	0.9560	<b>1.0410</b>

**Tabela 6.4.** Fator de perfil k para o trecho reto (SP), em posições a 80D.

### 6.1.3 Variação do número de pontos dos dados considerados

Primeiramente, define-se o número de pontos dos dados da amostra como sendo pontos equidistantes sobre o caminho acústico. A quantidade de pontos é definida e alterada no script do CFD-Post, responsável pela coleta de informações sobre o escoamento simulado no Fluent.

A Tabela (6.5) apresenta o resultado do PI com variação do número de amostras. Esse

teste foi realizado de forma a avaliar a precisão do modelo proposto com base na quantidade de informações que serão admitidas no PI, de modo a obter resultados satisfatórios. As simulações foram realizadas com a geometria do Caso 1 e a amostra de referência SP1 com coleta de dados a  $80D$ .

O valor de Reynolds é o resultado encontrado pelo PI, os valores do fator de perfil  $k$  foram obtidos a partir da Equação (3.15), enquanto o fator  $k$  da AGA é obtido pela Equação (3.22). Com a distância de  $80D$  é possível dizer que a equação da AGA pode ser utilizada como referência, Equação (3.22), pois o escoamento apresenta-se muito próximo da condição de escoamento totalmente desenvolvido. Dessa forma, a diferença apresentada na Tabela (6.5) indica a diferença entre o fator de perfil  $k$  simulado pela metodologia proposta e o modelo proposto pela AGA.

Ref	Nº de Pontos Amostrais	Re	k	k (AGA)	Dif(%)
(1)	10	9791.34	0.930923	0.925847	0.545188
(2)	100	10380.5	0.931415	0.926065	0.574385
(3)	250	10406.8	0.931433	0.926074	0.575354
(4)	500	10401.5	0.931431	0.926073	0.575279
(5)	750	10399.6	0.931429	0.926072	0.575164
(6)	900	10396.3	0.931425	0.926071	0.574905
(7)	1000	10377.4	0.931093	0.926064	<b>0.540095</b>

**Tabela 6.5.** Efeito da variação do número de pontos na coleta de dados.

Observa-se que, para este caso a variação do número de pontos na coleta de dados não oferece grande influência nos resultados do PI. A diferença percentual do fator de perfil  $k$  em relação ao encontrado pela Equação (3.22) é de aproximadamente 0.57%.

## 6.2 Geometria com curva (Caso 2)

Nesta seção serão apresentados os resultados das simulações do caso 2, que apresenta uma geometria de tubo com presença de curva. De forma a explorar possíveis aplicações

práticas do modelo de medição de vazão por ultrassom, as posições avaliadas estão em pontos a  $10D$ ,  $20D$  e  $80D$  à jusante da curva.

As duas primeiras seções de medição são importantes para caracterizar a operação de medidores ultrassônicos em instalações de tubulações, não propiciam longos trechos retos, necessitando proceder com medições de vazão em seções em que não são estabelecidas condições de escoamento completamente desenvolvido, tal como definido em norma - AGA (2007) e ABNT (2010).

Para este caso, os resultados são mostrados primeiramente comparando seus valores com o fator de perfil  $k$  de acordo com a norma da AGA (2007), dado pela Equação (3.22). Em seguida outra tabela compara os resultados com os obtidos por Martins (2012), que apresentou um estudo do fator de perfil  $k$  em regiões perturbadas.

Antes de apresentar os resultados, foi testada a influência que alguns parâmetros podem ter ao empregar a técnica de problemas inversos.

### **6.2.1 Avaliação da influência de parâmetros no problema inverso**

De forma a garantir que variáveis presentes no problema inverso não influenciem no resultado, foram realizados testes com a variação do termo responsável pelo tamanho do passo entre cada iteração, que também é o termo responsável pela formação da matriz Jacobiana (TFJ).

Esse termo é responsável por causar uma perturbação na aproximação inicial da velocidade de entrada do escoamento, criando uma nova simulação a partir dessa velocidade, da qual novas informações serão coletados, que resultará na formação da matriz Jacobina, e consequentemente no valor que irá determinar o tamanho e sentido do passo no PI.

Além da variável responsável pelo passo do PI (TFJ), o erro de amostragem também foi testado, de forma a avaliar sua influencia nos resultados do PI.

Para esses casos, todas as simulações foram executadas com a geometria com curva e



amostra *SE* 01, utilizando a malha Mesh 1, com a coleta de dados a 80D.

### 6.2.1.1 Variação do desvio do PI

A Tabela (6.6) mostra os resultados da simulação variando o termo TFJ, fator para formação da matriz Jacobiana, que resultará na formação do escalar  $\Omega$ , responsável pelo tamanho do passo no PI, entre  $1 \times 10^{-01}$  a  $1 \times 10^{-05}$ .

O valor do número de Reynolds é o resultado do PI, que neste caso é a velocidade de entrada do escoamento. Esse valor é aplicado nas Equações (3.15) e (3.22) para obter os valores do fator de perfil  $k$ .

É possível observar que os resultados demonstram variações abaixo 0.02% entre os fatores de perfil  $k$  da simulação, Equação (3.15), e o fator de perfil  $k$  da AGA, Equação (3.22), mostrando assim que a variável TFJ não tem grande influência nos resultados.

Ref	EPS	Re	k	k (AGA)	Dif(%)
(1)	$1 \times 10^{-01}$	10330.2704	0.9261	0.9260	0.0059
(2)	$1 \times 10^{-02}$	10327.7709	0.9261	0.9260	0.0052
(3)	$1 \times 10^{-03}$	10323.7553	0.9260	0.9260	<b>0.0002</b>
(4)	$1 \times 10^{-04}$	10330.8848	0.9263	0.9260	0.0231
(5)	$1 \times 10^{-05}$	10332.8615	0.9262	0.9260	0.0146

**Tabela 6.6.** Efeito da variação do termo TFJ no resultado do PI.

### 6.2.1.2 Variação do erro de amostragem

Como já mencionado, os valores utilizados como referência pelo presente trabalho são resultados de simulações da dissertação de Martins (Martins, 2012). No intuito de simular dados experimentais, foram introduzidos erros aleatórios aos dados simulados numericamente, como uma forma de erro de leitura experimental de equipamento.

O erro de amostragem foi inserido de forma aleatória a cada ponto presente sobre o caminho acústico, neste caso 1000 foram considerados. Podendo variar entre 0% e o valor máximo estimado, 5%, 10% e 15%.

A Tabela (6.7) mostra os resultados encontrados indicando que o fator  $k$  estimado pelas técnicas de problemas inversos, Equação (3.15), e o fator  $k$  analítico previsto pela AGA (AGA, 2007), Equação (3.22), diferem de 1% aproximadamente, independente do nível de erro aleatório introduzido no perfil para simular um perfil experimental. Com base nesses resultados é possível perceber que a variação do erro de amostragem não apresentou interferências significativas nos resultados do PI.

Ref	Erro(%)	Re	k	k (AGA)	Dif(%)
(1)	5	1993536.3579	0.9559	0.9461	1.0307
(2)	10	2000721.1152	0.9560	0.9461	1.0366
(3)	15	2004646.9306	0.9558	0.9461	<b>1.0155</b>

**Tabela 6.7.** Efeito da variação do erro de amostragem.

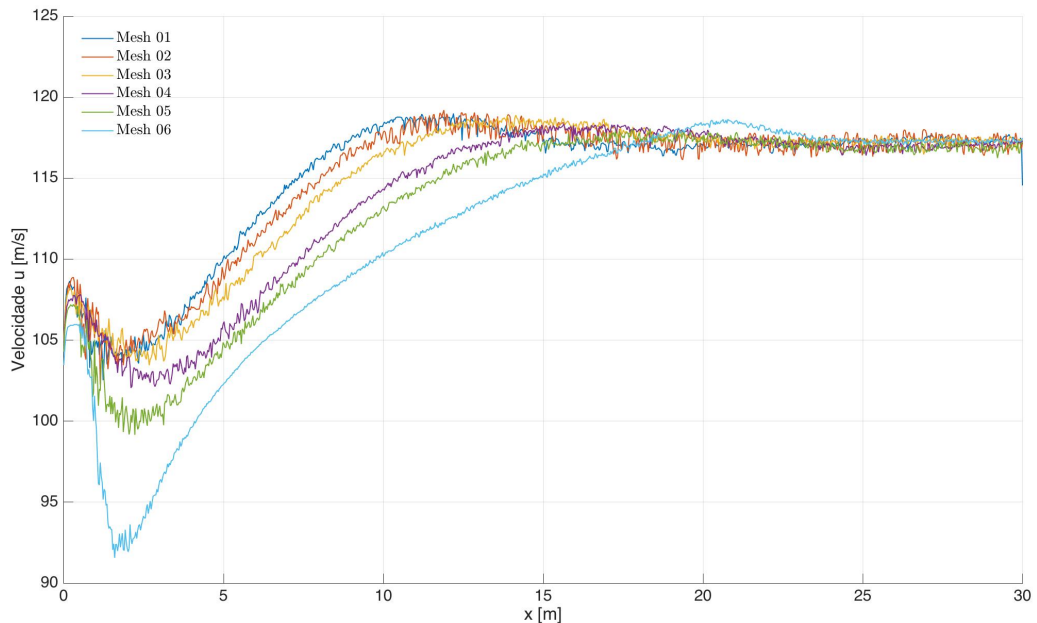
## 6.2.2 Convergência de malha

A convergência de malhas foi aplicada com a variação da posição do medidor ultrassônico visando retratar os efeitos que o refinamento de malha causa nos resultados obtidos a partir da técnica de problemas inversos aplicada a escoamentos assimétricos. Dessa forma, os resultados exibidos nessa seção resultam de simulações aplicando todas as malhas propostas.

A convergência das malhas foi testada a partir evolução da componente axial da velocidade,  $u$  [ $m/s$ ], no centro da tubulação e o perfil de velocidade para cada seção de coleta de dados.

A componente axial de velocidade,  $u$  [ $m/s$ ], foi utilizada possibilitando observar o desenvolvimento da velocidade por toda extensão da geometria proposta.

A Figura (6.4) apresenta o perfil de velocidade do escoamento no centro da tubulação para as malhas 01, 03, 06, com referência na Amostra SE 10 ( $Re = 2 \times 10^6$ , conforme Tabela (5.1)), com base nos resultados da seção de coleta de dados a  $10D$ . Observa-se que nas malhas mais grosseiras existe uma oscilação maior da velocidade ao longo do eixo central, resultante da variação de velocidades entre os elementos da malha. Enquanto a malha mais refinada apresenta menores oscilações, além de retratar melhor os efeitos da curva do eixo no perfil de velocidade. Contudo, é possível notar que o gráfico das malhas apresenta um comportamento análogo ao longo do eixo central. Tal comportamento também foi observado nos resultados com base nas seções de coleta a  $20D$  e  $80D$  - Figuras (6.6), (6.7), (6.8) e (6.9).



**Figura 6.4.** Evolução da componente axial da velocidade,  $u[m/s]$ , no centro da tubulação com base nos resultados das simulações com coleta de dados a  $10D$ .

A Figura (6.5) apresenta o perfil de velocidade nas seções de comparação para as diferentes malhas, com base nos resultados obtidos nas simulações com dados a  $10D$ . A medida que as malhas são refinadas obtém-se um maior detalhamento do comportamento do perfil de velocidade na seção de coleta, caracterizando melhor a região central. Enquanto técnicas de refinamento de malha foram utilizadas nas regiões próximas a parede da tubulação, retratando melhor os efeitos de parede. Sendo até possível distinguir a zona de transição

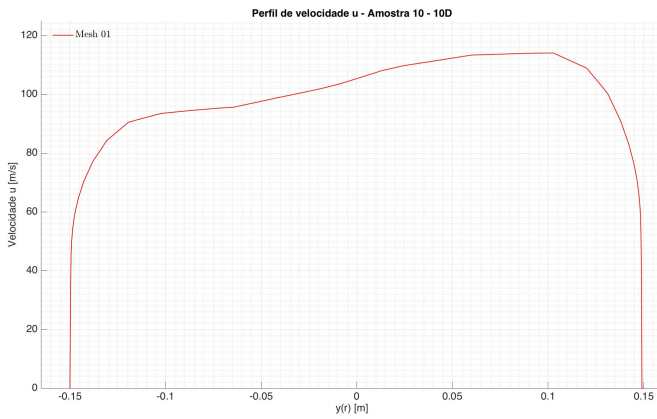
pela presença de descontinuidades na derivada da velocidade ("*quinas*") na Figura (6.5), onde observa-se a assimetria da componente axial de velocidade, característica em escoamentos à jusante de curvas.

Visualizando a evolução da componente axial da velocidade,  $u$  [ $m/s$ ], é observado que o refinamento da malha garante uma melhor caracterização da velocidade, devido ao maior número de elementos, fornecendo menores oscilações da componente velocidade, como pode ser observado nas Figuras (6.4), (6.6) e (6.8).

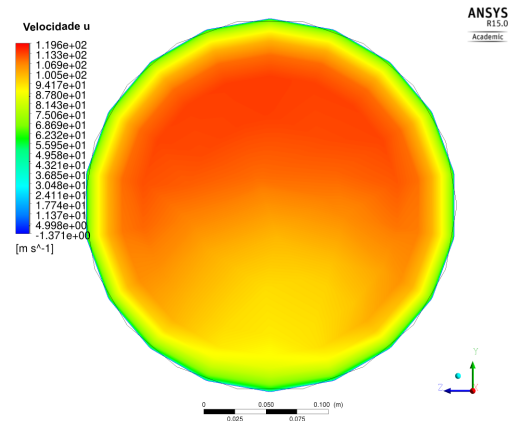
Da mesma forma, o refinamento de malha permitiu melhor caracterização do perfil de velocidade nas seções de coleta de dados a  $10D$ ,  $20D$  e  $80D$ . Sendo que nos casos mais próximos a curva é possível perceber alterações no comportamento do perfil de velocidade na região central do escoamento.

E como esperado, a medida que há um aumento na distância de coleta de dados em relação à curva, menor será a influência no perfil de velocidade, como observado no caso a  $80D$ , Figura (6.9), apresentando um perfil mais simétrico.

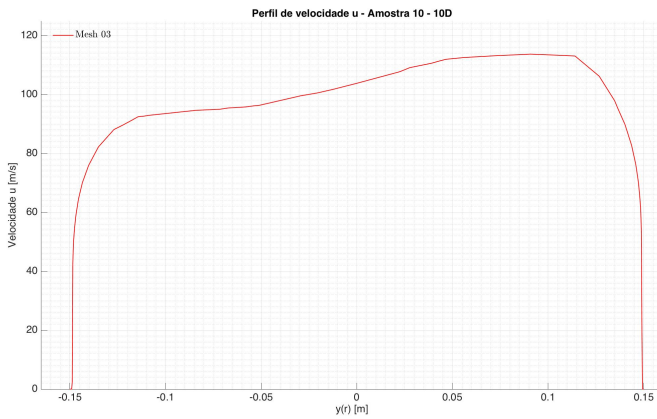
Apesar de melhor retratar o comportamento do escoamento com o refinamento das malhas, esse não é um fator determinante para a escolha de malhas mais refinadas no emprego das técnicas de problemas inversos aplicados a escoamentos assimétricos. Essa característica será melhor explorada na próxima seção, onde serão apresentados os resultados da aplicação da técnica de PI.



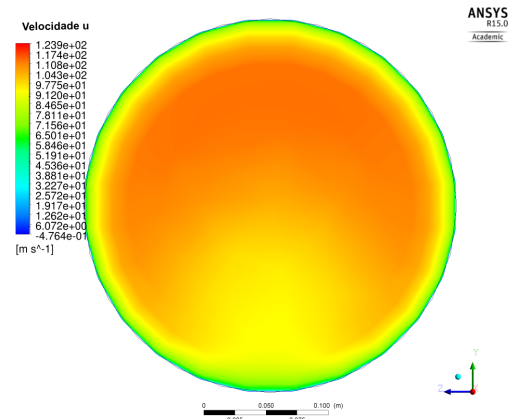
(a) Malha 01



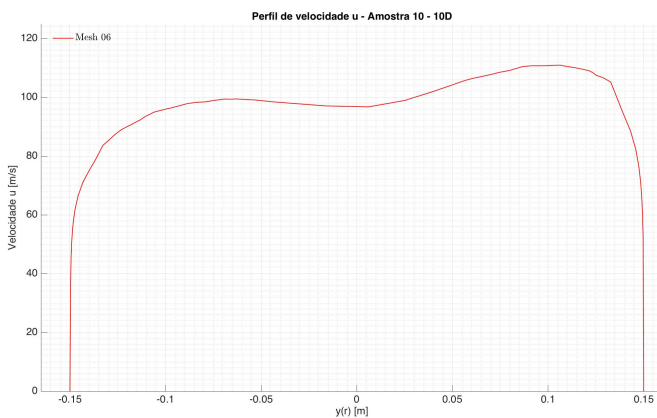
(b) Malha 01



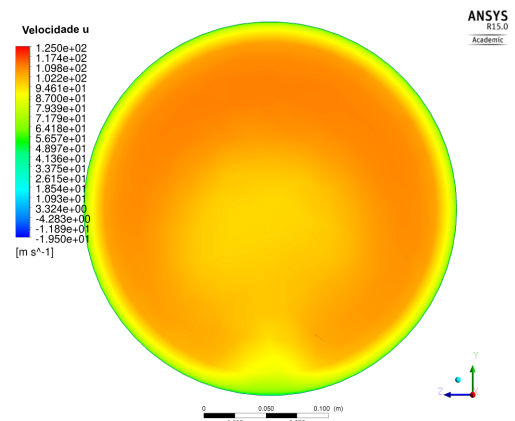
(c) Malha 03



(d) Malha 03

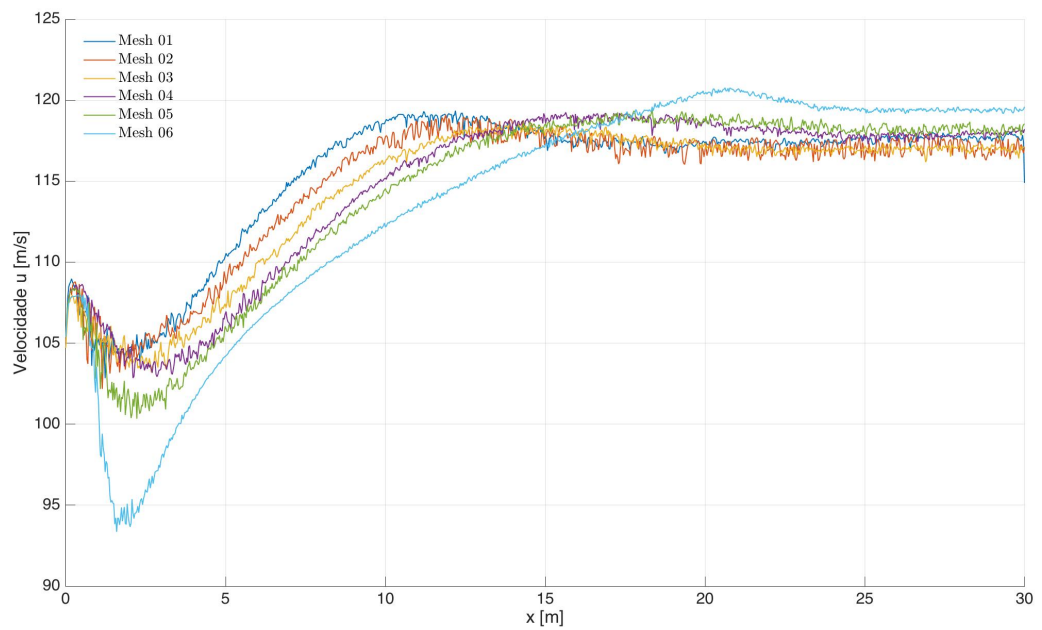


(e) Malha 06

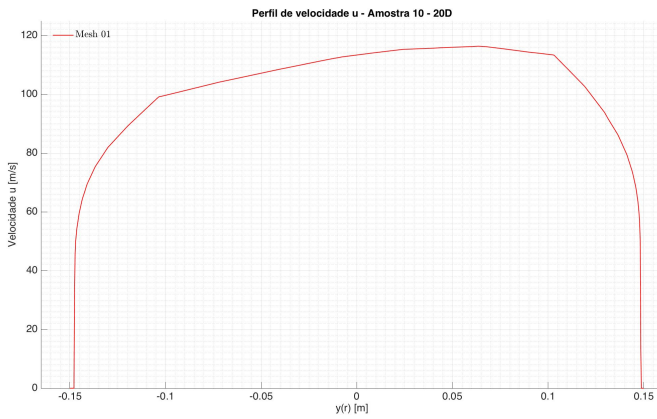


(f) Malha 06

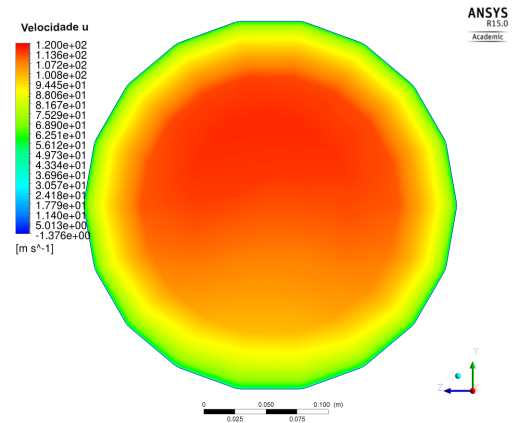
Figura 6.5. Perfil da componente axial de velocidade,  $u[m/s]$ , a  $10D$ .



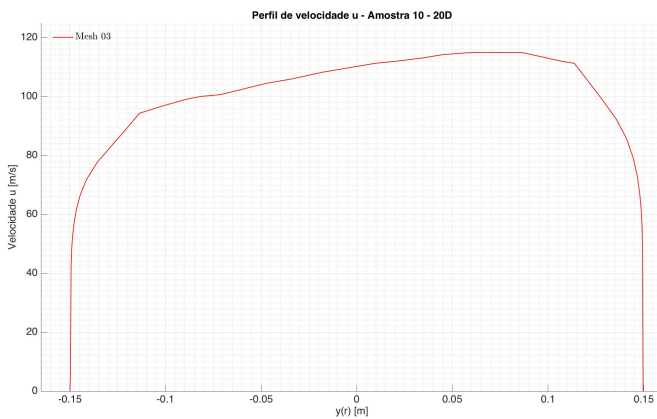
**Figura 6.6.** Evolução da componente axial da velocidade,  $u[m/s]$ , no centro da tubulação com base nos resultados das simulações com coleta de dados a  $20D$ .



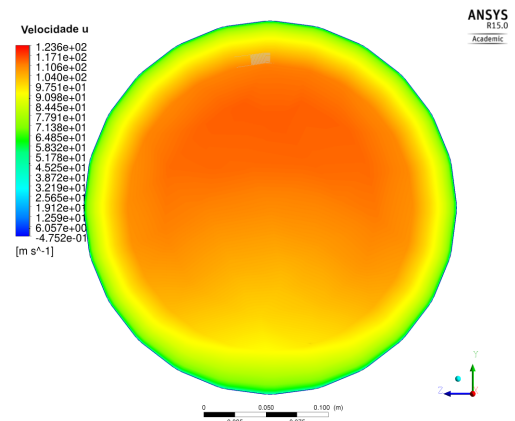
(a) Malha 01



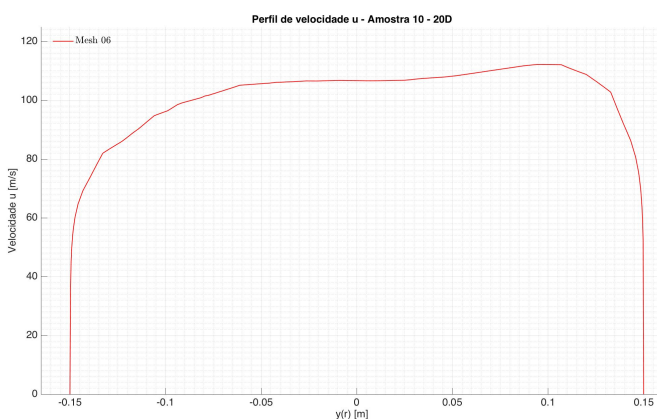
(b) Malha 01



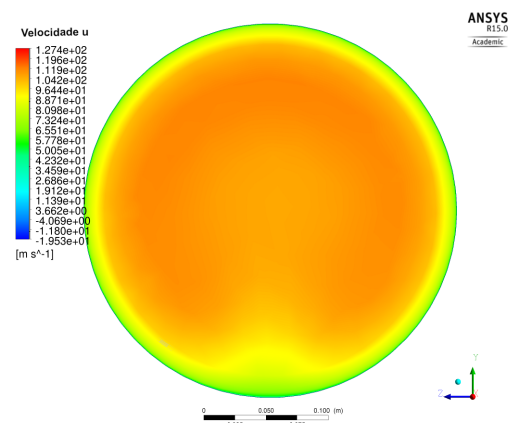
(c) Malha 03



(d) Malha 03

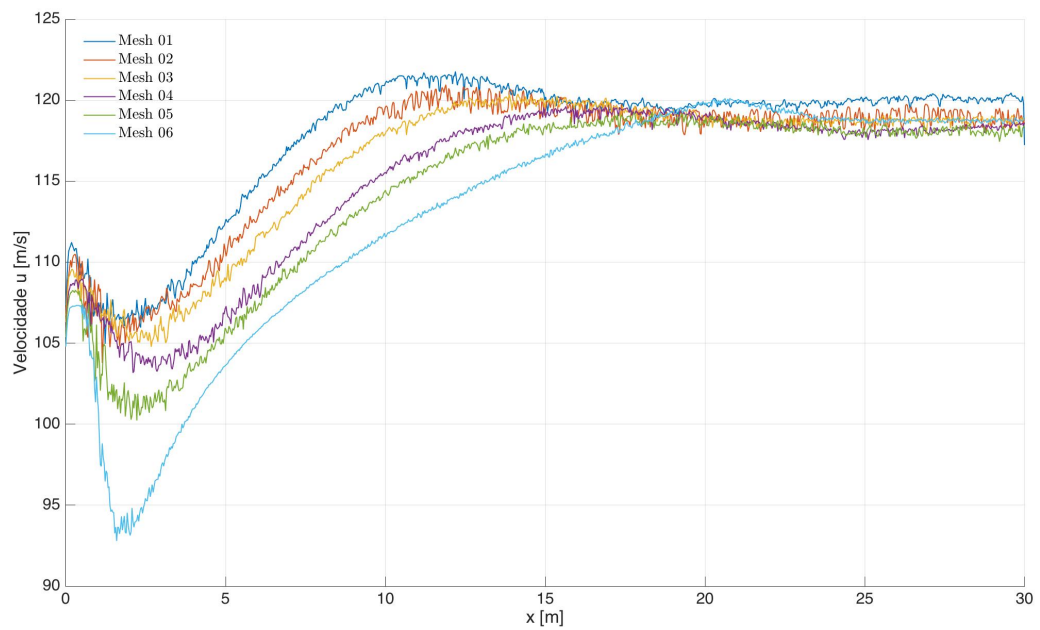


(e) Malha 06



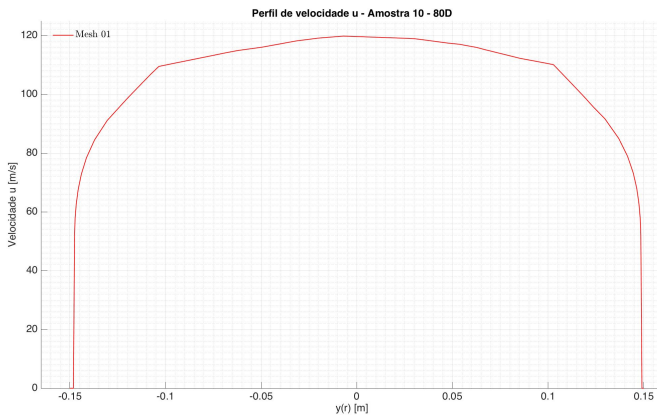
(f) Malha 06

Figura 6.7. Perfil da componente axial de velocidade,  $u[m/s]$ , a  $20D$ .

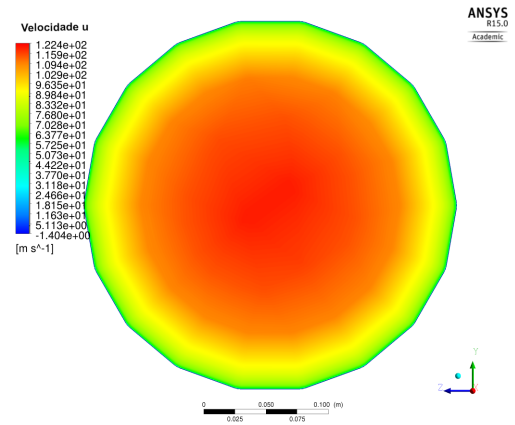


**Figura 6.8.** Evolução da componente axial da velocidade,  $u$  [m/s], no centro da tubulação com base nos resultados das simulações com coleta de dados a  $80D$ .

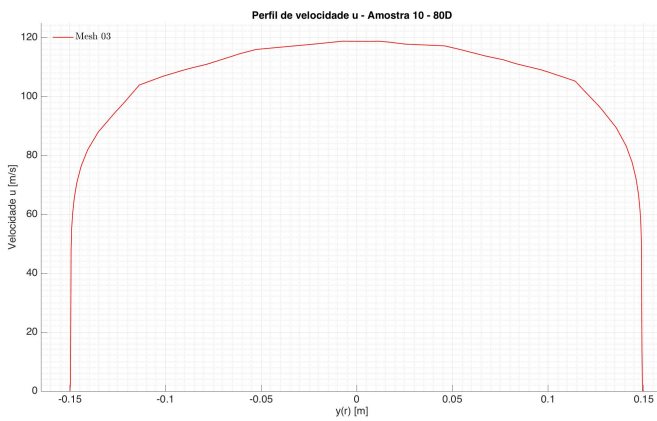




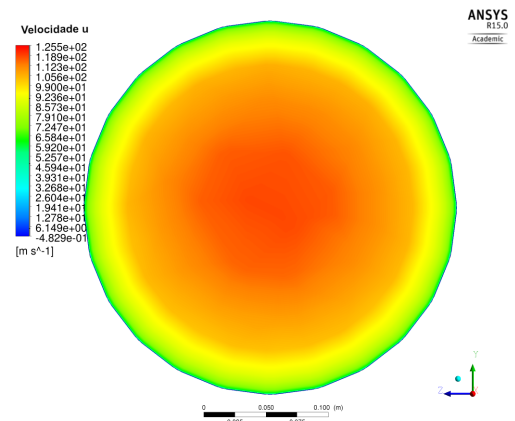
(a) Malha 01



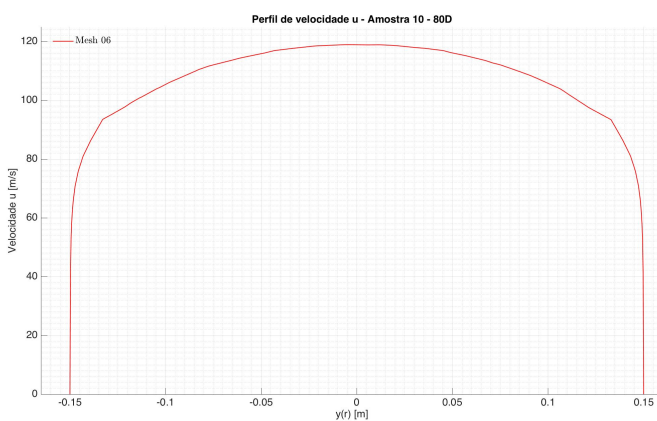
(b) Malha 01



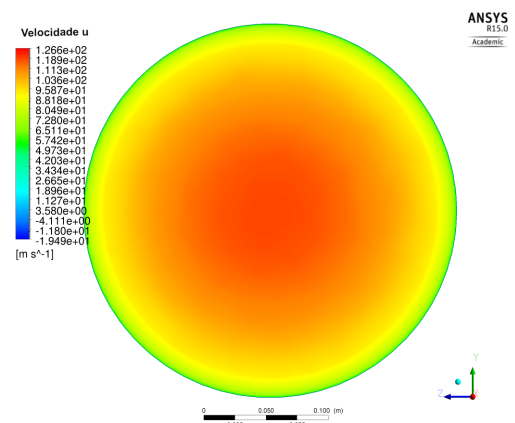
(c) Malha 03



(d) Malha 03



(e) Malha 06



(f) Malha 06

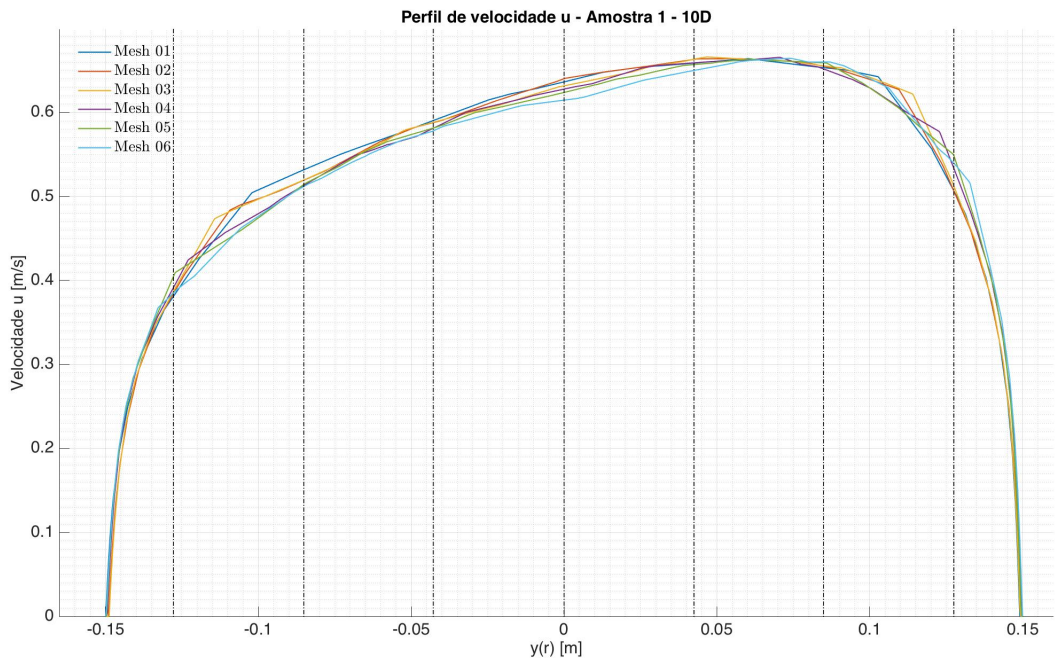
Figura 6.9. Perfil da componente axial de velocidade,  $u[m/s]$ , a  $80D$ .

### 6.2.2.1 Análise de convergência do perfil de velocidades a $10D$

As Tabelas (6.8), (6.9) e (6.10) apresentam uma comparação entre as malhas, abrangendo sete posições ao longo do diâmetro da tubulação, como feito no Caso 1. Seus resultados são apresentados graficamente pelas Figuras (6.10), (6.11) e (6.12).

A partir desses resultados é possível notar que as maiores diferenças da componente  $u$  da velocidade, chegando a 5%, são encontradas na região de transição das malhas, região entre as posições  $\pm 0.1200$  e  $\pm 0.0800$ .

Porém, o aumento da velocidade acentua a assimetria do perfil, levando a maiores diferenças entre as malhas. Tal efeito é mais evidente no caso da amostra SE 10 entre as malhas Mesh 5 e Mesh 6, dado que a malha Mesh 6 é constituída do maior número de elementos e, conseqüentemente, levando a uma melhor resolução do perfil de velocidade.



**Figura 6.10.** Perfil da componente axial de velocidade,  $u$  [m/s], da amostra SE 1 - 10D

Ref. $y(r)$	Mesh 1	Mesh 2	Dif(%)	Mesh 2	Mesh 3	Dif(%)
-0.1278	0.3811	0.3844	-0.8749	0.3844	0.3870	<b>-0.6681</b>
-0.0851	0.5318	0.5194	2.3346	0.5194	0.5196	<b>-0.0444</b>
-0.0428	0.5904	0.5880	0.4183	0.5880	0.5883	<b>-0.0579</b>
0.0000	0.6364	0.6401	<b>-0.5808</b>	0.6401	0.6316	1.3160
0.0425	0.6588	0.6633	-0.6776	0.6633	0.6635	<b>-0.0296</b>
0.0848	0.6535	0.6552	-0.2704	0.6552	0.6557	<b>-0.0689</b>
0.1275	0.5068	0.5067	<b>0.0251</b>	0.5067	0.5126	-1.1681

Ref. $y(r)$	Mesh 3	Mesh 4	Dif(%)	Mesh 4	Mesh 5	Dif(%)
-0.1278	0.3870	0.3915	-1.1712	0.3915	0.4048	-3.3910
-0.0851	0.5196	0.5132	1.2294	0.5132	0.5144	-0.2270
-0.0428	0.5883	0.5813	1.1980	0.5813	0.5815	-0.0439
0.0000	0.6316	0.6278	0.6093	0.6278	0.6238	0.6366
0.0425	0.6635	0.6591	0.6510	0.6591	0.6571	0.3115
0.0848	0.6557	0.6520	0.5700	0.6520	0.6591	-1.1008
0.1275	0.5126	0.5337	-4.1181	0.5337	0.5491	-2.8869

Ref. $y(r)$	Mesh 5	Mesh 6	Dif(%)
-0.1278	0.4048	0.3851	4.8599
-0.0851	0.5144	0.5118	0.4970
-0.0428	0.5815	0.5782	0.5693
0.0000	0.6238	0.6147	1.4624
0.0425	0.6571	0.6501	1.0699
0.0848	0.6591	0.6602	-0.1563
0.1275	0.5491	0.5396	1.7223

**Tabela 6.8.** Perfil da componente axial de velocidade,  $u$  [m/s], para diferentes malhas a 10D - Amostra SE 1.

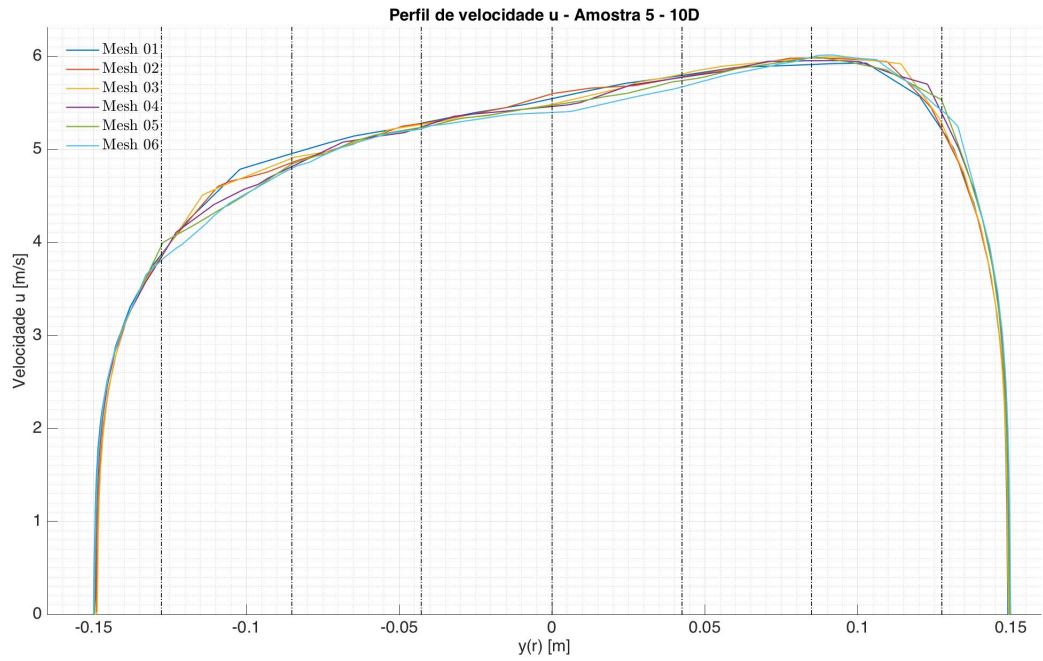


Figura 6.11. Perfil da componente axial de velocidade,  $u$  [m/s], da amostra SE 5 - 10D

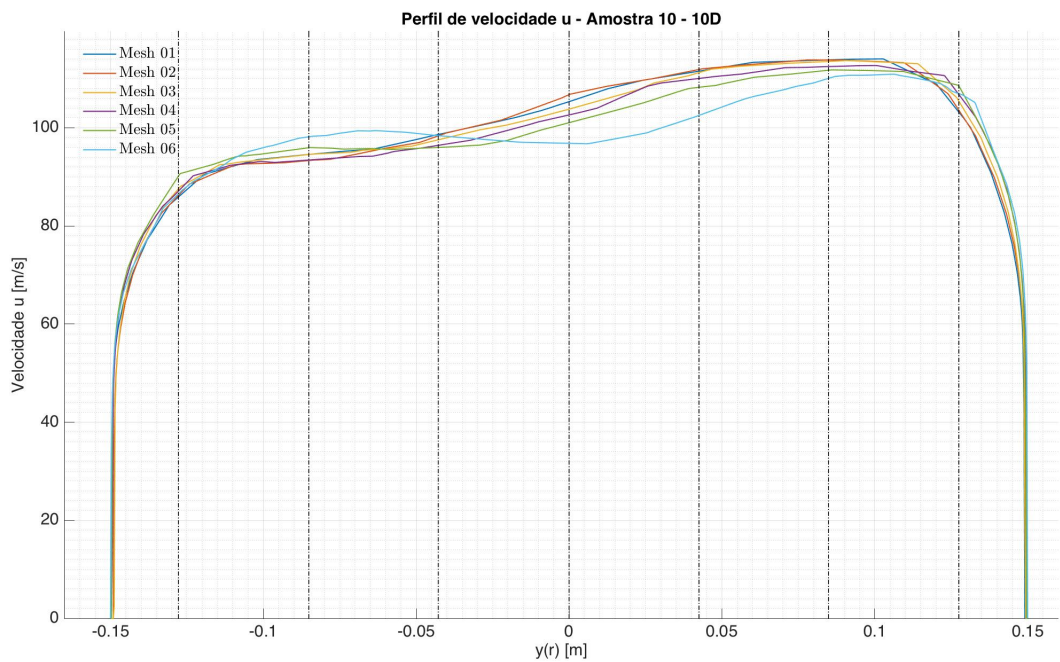


Figura 6.12. Perfil da componente axial de velocidade,  $u$  [m/s], da amostra SE 10 - 10D

Ref. $y(r)$	Mesh 1	Mesh 2	Dif(%)	Mesh 2	Mesh 3	Dif(%)
-0.1278	3.8721	3.8584	0.3545	3.8584	3.8559	<b>0.0652</b>
-0.0851	4.9546	4.8571	1.9678	4.8571	4.9038	-0.9616
-0.0428	5.2813	5.2781	0.0612	5.2781	5.2675	0.2000
0.0000	5.5443	5.5955	-0.9239	5.5955	5.4834	2.0029
0.0425	5.7946	5.7786	<b>0.2767</b>	5.7786	5.8097	-0.5376
0.0848	5.9124	5.9811	-1.1624	5.9811	5.9821	<b>-0.0159</b>
0.1275	5.2113	5.2201	<b>-0.1695</b>	5.2201	5.2761	-1.0740

Ref. $y(r)$	Mesh 3	Mesh 4	Dif(%)	Mesh 4	Mesh 5	Dif(%)
-0.1278	3.8559	3.8421	0.3570	3.8421	3.9640	-3.1727
-0.0851	4.9038	4.8140	1.8316	4.8140	4.8403	<b>-0.5460</b>
-0.0428	5.2675	5.2395	0.5312	5.2395	5.2364	<b>0.0602</b>
0.0000	5.4834	5.4603	0.4210	5.4603	5.4734	<b>-0.2394</b>
0.0425	5.8097	5.7740	0.6143	5.7740	5.7395	0.5978
0.0848	5.9821	5.9529	0.4872	5.9529	5.9892	-0.6092
0.1275	5.2761	5.3877	-2.1143	5.3877	5.5262	-2.5705

Ref. $y(r)$	Mesh 5	Mesh 6	Dif(%)
-0.1278	3.9640	3.8064	3.9754
-0.0851	4.8403	4.7956	0.9229
-0.0428	5.2364	5.2208	0.2971
0.0000	5.4734	5.3966	1.4032
0.0425	5.7395	5.6717	1.1799
0.0848	5.9892	5.9908	-0.0263
0.1275	5.5262	5.4178	1.9617

**Tabela 6.9.** Perfil da componente axial de velocidade,  $u$  [m/s], para diferentes malhas a 10D - Amostra SE 5.

Ref. $y(r)$	Mesh 1	Mesh 2	Dif(%)	Mesh 2	Mesh 3	Dif(%)
-0.1278	85.8897	86.1990	<b>-0.3601</b>	86.1990	87.5380	-1.5534
-0.0851	94.5564	93.3190	1.3086	93.3190	94.5502	-1.3194
-0.0428	98.6240	98.3437	<b>0.2842</b>	98.3437	97.5405	0.8167
0.0000	105.2926	106.6993	-1.3360	106.6993	103.7617	2.7531
0.0425	111.5307	111.8763	<b>-0.3099</b>	111.8763	111.2357	0.5726
0.0848	113.8238	113.7970	<b>0.0235</b>	113.7970	113.5090	0.2531
0.1275	103.1927	103.5892	<b>-0.3842</b>	103.5892	105.4397	-1.7863

Ref. $y(r)$	Mesh 3	Mesh 4	Dif(%)	Mesh 4	Mesh 5	Dif(%)
-0.1278	87.5380	87.0859	0.5165	87.0859	90.1458	-3.5136
-0.0851	94.5502	93.4200	<b>1.1953</b>	93.4200	95.9400	-2.6975
-0.0428	97.5405	96.4118	1.1572	96.4118	95.9877	0.4398
0.0000	103.7617	102.5940	<b>1.1255</b>	102.5940	101.0053	1.5485
0.0425	111.2357	110.0456	1.0699	110.0456	108.2436	1.6375
0.0848	113.5090	112.4652	0.9196	112.4652	111.7163	0.6659
0.1275	105.4397	106.7951	-1.2854	106.7951	108.5454	-1.6390

Ref. $y(r)$	Mesh 5	Mesh 6	Dif(%)
-0.1278	90.1458	86.5284	4.0128
-0.0851	95.9400	98.1484	-2.3019
-0.0428	95.9877	98.3787	-2.4910
0.0000	101.0053	96.8219	4.1417
0.0425	108.2436	102.5169	5.2906
0.0848	111.7163	110.0546	1.4874
0.1275	108.5454	106.9497	1.4701

**Tabela 6.10.** Perfil da componente axial de velocidade,  $u$  [ $m/s$ ], para diferentes malhas a 10D - Amostra SE 10.

Contudo, com base nos resultados apresentados para a seção de coleta a  $10D$  não é possível apresentar uma conclusão quanto a convergência das malhas associada ao emprego da técnica de problemas inversos a dinâmica de fluidos assimétricos. Dessa forma os resultados para análise do fator  $k$  apresentados a seguir serão apresentados comparando todas as malhas propostas no trabalho. Assim será possível determinar o impacto do refinamento de malha nos resultados. Seguindo esta metodologia os resultados para as seções de coleta a  $20D$  e  $80D$  também serão apresentados.

### 6.2.2.2 Análise do fator $k$ a $10D$

Nesta seção serão mostrados os resultados das simulações com coleta de dados a  $10D$  do início do trecho reto à jusante da curva. Essa é uma região assimétrica do escoamento, por se encontrar próxima a curva, como apresentado nas figuras que apresentaram a evolução da componente axial da velocidade. Os resultados em negrito apresentam os melhores resultados comparados entre as malhas, e a coluna em destaque apresenta a malha com melhor aproximação considerando todas velocidades abordadas no trabalho.

A Tabela (6.11) apresenta os resultados encontrados para o fator  $k$ , pela técnica de problema inverso, utilizando a Equação (3.15) na posição a  $10D$  da curva e a diferença percentual em relação ao fator  $k$  fornecido pela equação da norma AGA (2007), utilizada como referência, enquanto a Tabela (6.12) apresenta uma comparação com os resultados encontrados por Martins (2012), demonstrando a eficiência do modelo proposto para casos de escoamentos assimétricos.

A Tabela (6.11), apresenta diferenças entre 3 – 7% entre o fator  $k$  estimado pelas técnicas de problemas inversos e aquele calculado por simulação numérica. Fatores, como a velocidade do escoamento, afetam diretamente os resultados, observando que diferença percentual aumenta a cada troca da velocidade de referência, enquanto o refinamento das malhas apresentou menores variações dos resultados.

Outro fator a ser considerado é que a equação utilizada para determinar o fator  $k$  da AGA (2007) é apropriado para escoamentos totalmente desenvolvidos, que podem ser alcançados a partir de um trecho reto de, no mínimo,  $80D$  conforme mostrado na análise

Ref	k (AGA)	Mesh 1	Dif(%)	Mesh 2	Dif(%)	Mesh 3	Dif(%)
SE1	0.9261	0.9578	<b>3.3152</b>	0.9608	3.6098	0.9606	3.5994
SE2	0.9286	0.9679	<b>4.0649</b>	0.9711	4.3765	0.9709	4.3598
SE3	0.9312	0.9785	<b>4.8327</b>	0.9816	5.1344	0.9810	5.0748
SE4	0.9327	0.9845	<b>5.2623</b>	0.9876	5.5639	0.9873	5.5289
SE5	0.9346	0.9902	<b>5.6203</b>	0.9953	6.1000	0.9948	6.0568
SE6	0.9372	0.9960	<b>5.9089</b>	1.0028	6.5398	1.0039	6.6482
SE7	0.9398	1.0021	<b>6.2142</b>	1.0057	6.5464	1.0084	6.8032
SE8	0.9414	1.0044	6.2762	1.0075	6.5605	1.0100	6.7945
SE9	0.9433	1.0084	6.4473	1.0108	6.6693	1.0159	7.1356
SE10	0.9460	1.0096	6.2966	1.0121	6.5245	1.0157	6.8609
Ref	k (AGA)	Mesh 4	Dif(%)	Mesh 5	Dif(%)	Mesh 6	Dif(%)
SE1	0.9261	0.9616	3.6974	0.9613	3.6606	0.9631	3.8480
SE2	0.9286	0.9712	4.3826	0.9716	4.4224	0.9734	4.5959
SE3	0.9312	0.9801	4.9925	0.9805	5.0310	0.9821	5.1805
SE4	0.9327	0.9859	5.4014	0.9860	5.4043	0.9871	5.5164
SE5	0.9346	0.9941	5.9842	0.9939	5.9681	0.9943	6.0071
SE6	0.9372	1.0045	6.7031	1.0056	6.8045	1.0045	6.7018
SE7	0.9398	1.0098	6.9254	1.0101	6.9524	1.0074	6.7037
SE8	0.9414	1.0111	6.8964	1.0111	6.8905	1.0043	<b>6.2641</b>
SE9	0.9433	1.0129	6.8614	1.0097	6.5725	1.0036	<b>6.0092</b>
SE10	0.9460	1.0135	6.6529	1.0104	6.3745	1.0032	<b>5.7006</b>

**Tabela 6.11.** Convergência do fator de perfil  $k$  a  $10D$  da curva, comparada aos resultados encontrados pela equação da AGA (2007).



do caso 1 e observado na Figura (6.8), onde a velocidade encontra maior estabilidade.

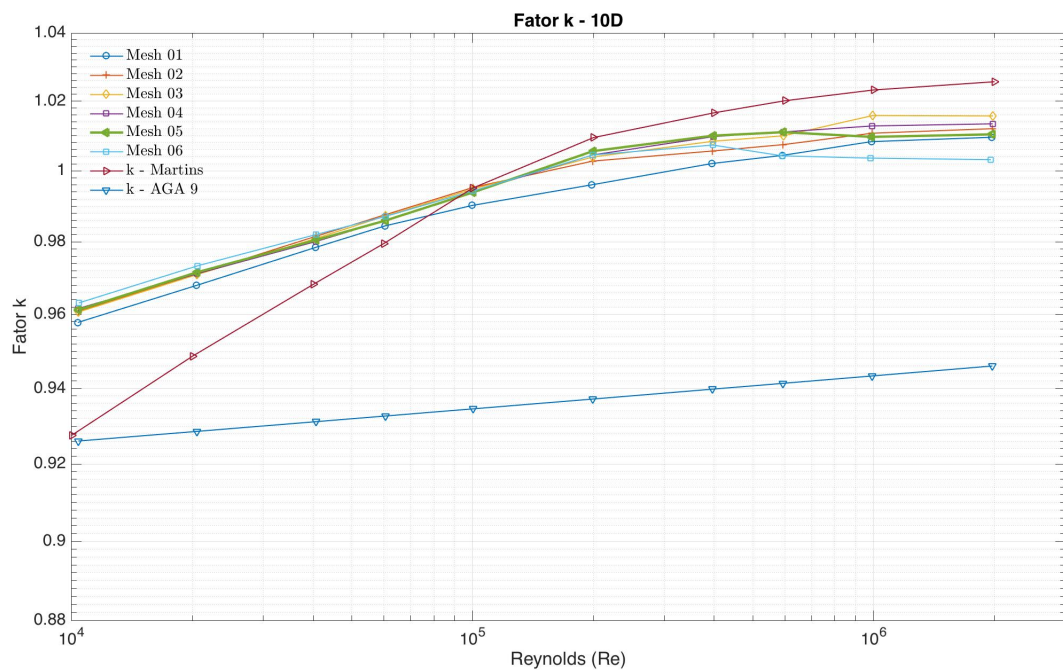
Ref	k (Martins)	Mesh 1	Dif(%)	Mesh 2	Dif(%)	Mesh 3	Dif(%)
SE1	0.9276	0.9578	<b>3.1589</b>	0.9608	3.4550	0.9606	3.4447
SE2	0.9486	0.9679	<b>1.9937</b>	0.9711	2.3135	0.9709	2.2964
SE3	0.9682	0.9785	<b>1.0460</b>	0.9816	1.3612	0.9810	1.2989
SE4	0.9795	0.9845	<b>0.5019</b>	0.9876	0.8201	0.9873	0.7830
SE5	0.9951	0.9902	-0.4947	0.9953	<b>0.0181</b>	0.9948	-0.0281
SE6	1.0095	0.9960	-1.3538	1.0028	-0.6715	1.0039	-0.5544
SE7	1.0167	1.0021	-1.4537	1.0057	-1.0926	1.0084	-0.8138
SE8	1.0201	1.0044	-1.5664	1.0075	-1.2569	1.0100	-1.0023
SE9	1.0233	1.0084	-1.4795	1.0108	-1.2377	1.0159	<b>-0.7300</b>
SE10	1.0257	1.0096	-1.5922	1.0121	-1.3442	1.0157	<b>-0.9778</b>
Ref	k (Martins)	Mesh 4	Dif(%)	Mesh 5	Dif(%)	Mesh 6	Dif(%)
SE1	0.9276	0.9616	3.5433	0.9613	3.5061	0.9631	3.6945
SE2	0.9486	0.9712	2.3195	0.9716	2.3604	0.9734	2.5385
SE3	0.9682	0.9801	1.2130	0.9805	1.2531	0.9821	1.4091
SE4	0.9795	0.9859	0.6487	0.9860	0.6518	0.9871	0.7699
SE5	0.9951	0.9941	-0.1055	0.9939	-0.1228	0.9943	-0.0810
SE6	1.0095	1.0045	-0.4949	1.0056	<b>-0.3852</b>	1.0045	-0.4962
SE7	1.0167	1.0098	-0.6812	1.0101	<b>-0.6519</b>	1.0074	-0.9219
SE8	1.0201	1.0111	<b>-0.8915</b>	1.0111	-0.8979	1.0043	-1.5797
SE9	1.0233	1.0129	-1.0283	1.0097	-1.3433	1.0036	-1.9567
SE10	1.0257	1.0135	-1.2042	1.0104	-1.5072	1.0032	-2.2411

**Tabela 6.12.** Convergência do fator de perfil  $k$  a  $10D$  da curva, comparado aos resultados de Martins (2012).

Já os resultados da Tabela (6.12) mostram resultados com menor diferença, da ordem de 1 – 2%, em sua maioria. Mas como mostrado na Tabela (6.11) os resultados não sofreram grandes variações com o refinamento das malhas, que são da ordem de 1%, de modo geral.

A Figura (6.13) mostra os resultados listados nas Tabelas (6.11) e (6.12), demonstrando

a regularidade dos resultados encontrados pelo problema inverso. Comparando ao estudo de escoamento assimétricos apresentado por Martins (2012), houve uma aproximação dos resultados com aumento da velocidade.



**Figura 6.13.** Perfil do fator de perfil  $k$  - SE 10D

### 6.2.2.3 Análise de convergência do perfil de velocidades a $20D$

Da mesma forma como apresentado nas coletas feitas a  $10D$ , os resultados a  $20D$  apresentaram maiores diferenças a velocidades de escoamento mais altas e nas regiões de transição da malha.

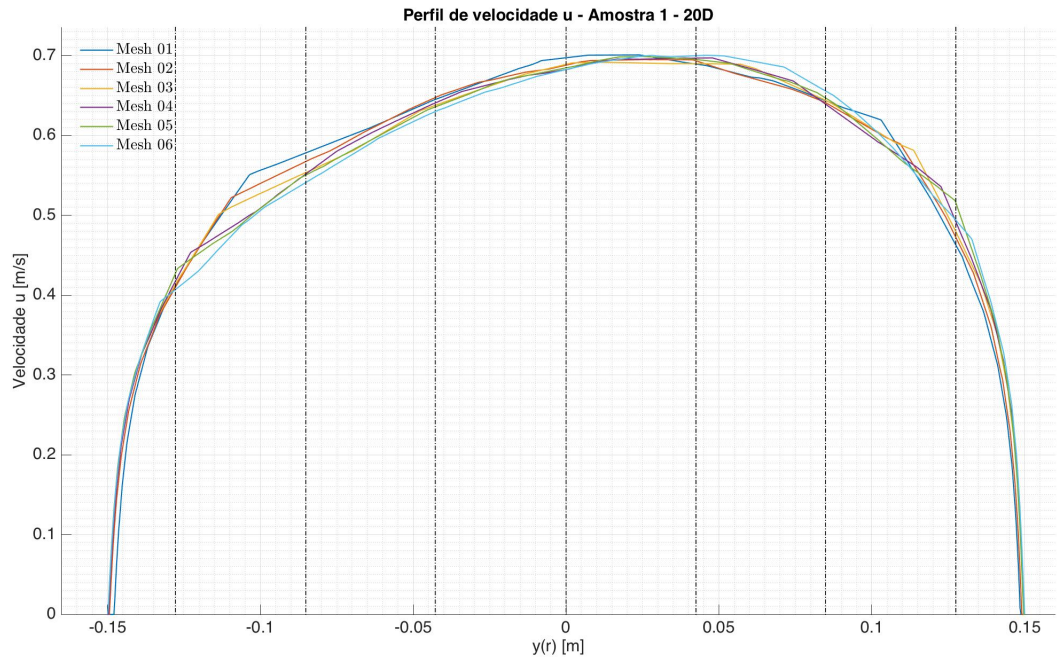


Figura 6.14. Perfil da componente axial de velocidade,  $u$  [m/s], da amostra SE 1 - 20D

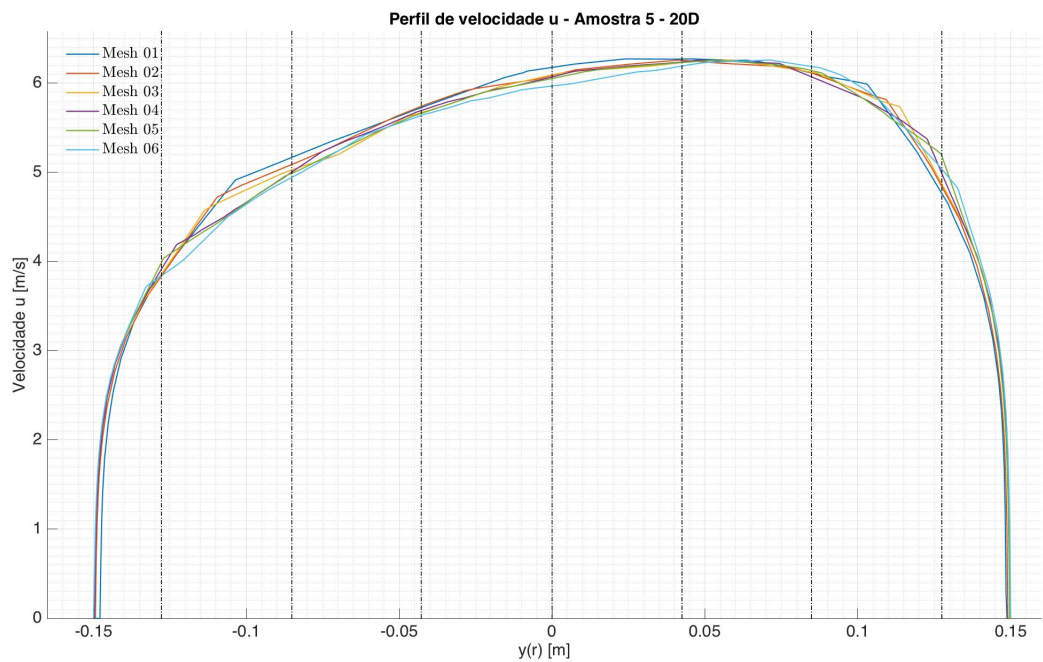


Figura 6.15. Perfil da componente axial de velocidade,  $u$  [m/s], da amostra SE 5 - 20D

Ref. $y(r)$	Mesh 1	Mesh 2	Dif(%)	Mesh 2	Mesh 3	Dif(%)
-0.1278	0.4123	0.4099	<b>0.5856</b>	0.4099	0.4134	-0.8489
-0.0851	0.5782	0.5674	1.8698	0.5674	0.5535	2.4452
-0.0428	0.6451	0.6475	<b>-0.3666</b>	0.6475	0.6377	1.5028
0.0000	0.6973	0.6879	1.3448	0.6879	0.6889	<b>-0.1502</b>
0.0425	0.6894	0.6935	-0.5917	0.6935	0.6900	0.5088
0.0848	0.6436	0.6412	<b>0.3656</b>	0.6412	0.6441	-0.4498
0.1275	0.4628	0.4724	-2.0686	0.4724	0.4796	<b>-1.5132</b>

Ref. $y(r)$	Mesh 3	Mesh 4	Dif(%)	Mesh 4	Mesh 5	Dif(%)
-0.1278	0.4134	0.4175	-1.0022	0.4175	0.4273	-2.3452
-0.0851	0.5535	0.5517	0.3295	0.5517	0.5503	<b>0.2404</b>
-0.0428	0.6377	0.6407	-0.4689	0.6407	0.6357	0.7804
0.0000	0.6889	0.6825	0.9431	0.6825	0.6846	-0.3089
0.0425	0.6900	0.6969	-1.0077	0.6969	0.6952	<b>0.2494</b>
0.0848	0.6441	0.6393	0.7425	0.6393	0.6471	-1.2076
0.1275	0.4796	0.4921	-2.6095	0.4921	0.5160	-4.8651

Ref. $y(r)$	Mesh 5	Mesh 6	Dif(%)
-0.1278	0.4273	0.4069	4.7685
-0.0851	0.5503	0.5411	1.6857
-0.0428	0.6357	0.6300	0.9080
0.0000	0.6846	0.6824	0.3121
0.0425	0.6952	0.6999	-0.6739
0.0848	0.6471	0.6558	-1.3515
0.1275	0.5160	0.4939	4.2799

**Tabela 6.13.** Perfil da componente axial de velocidade,  $u$  [ $m/s$ ], para diferentes malhas a 20D - Amostra SE 1.

Ref. $y(r)$	Mesh 1	Mesh 2	Dif(%)	Mesh 2	Mesh 3	Dif(%)
-0.1278	3.8588	3.8391	<b>0.5095</b>	3.8391	3.8590	-0.5175
-0.0851	5.1682	5.0886	1.5392	5.0886	5.0269	1.2132
-0.0428	5.7270	5.7404	<b>-0.2345</b>	5.7404	5.6708	1.2119
0.0000	6.1762	6.0850	1.4758	6.0850	6.0912	<b>-0.1017</b>
0.0425	6.2709	6.2562	0.2345	6.2562	6.2325	0.3796
0.0848	6.1145	6.1156	<b>-0.0174</b>	6.1156	6.1243	-0.1413
0.1275	4.7644	4.8420	-1.6305	4.8420	4.8729	<b>-0.6366</b>

Ref. $y(r)$	Mesh 3	Mesh 4	Dif(%)	Mesh 4	Mesh 5	Dif(%)
-0.1278	3.8590	3.9150	-1.4513	3.9150	3.9912	-1.9468
-0.0851	5.0269	5.0032	0.4711	5.0032	4.9905	<b>0.2542</b>
-0.0428	5.6708	5.6941	-0.4110	5.6941	5.6613	0.5760
0.0000	6.0912	6.0689	0.3660	6.0689	6.0514	0.2892
0.0425	6.2325	6.2382	<b>-0.0917</b>	6.2382	6.2319	0.1011
0.0848	6.1243	6.0718	0.8560	6.0718	6.1422	-1.1590
0.1275	4.8729	4.9890	-2.3834	4.9890	5.1863	-3.9549

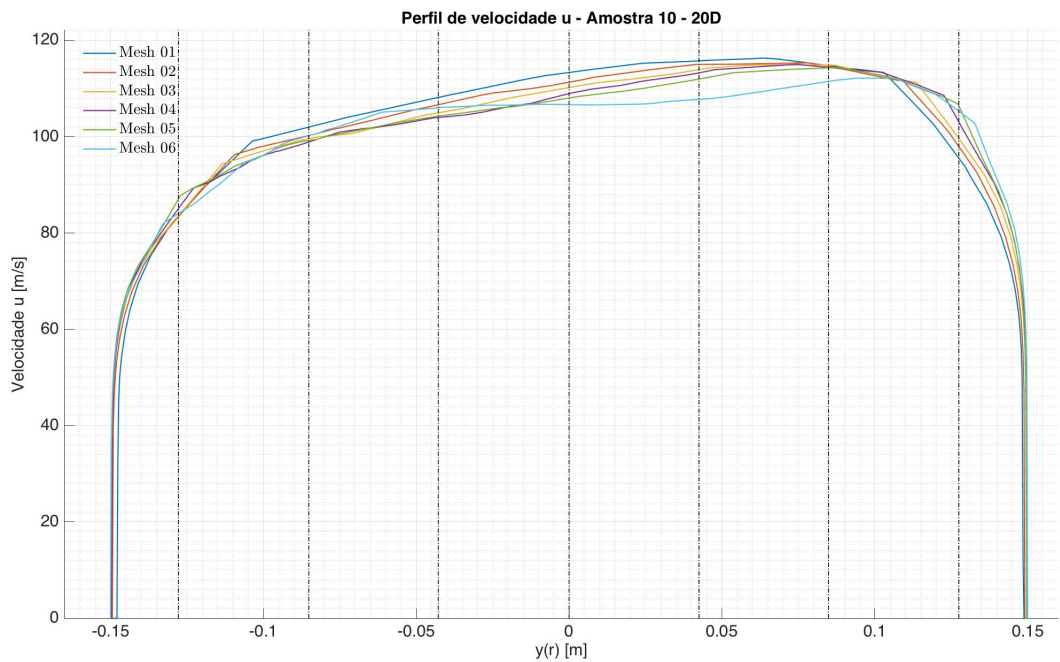
  

Ref. $y(r)$	Mesh 5	Mesh 6	Dif(%)
-0.1278	3.9912	3.8409	3.7643
-0.0851	4.9905	4.9438	0.9365
-0.0428	5.6613	5.6384	0.4045
0.0000	6.0514	5.9680	1.3781
0.0425	6.2319	6.1923	0.6349
0.0848	6.1422	6.1877	-0.7400
0.1275	5.1863	5.0369	2.8804

**Tabela 6.14.** Perfil da componente axial de velocidade,  $u$  [ $m/s$ ], para diferentes malhas a 20D - Amostra SE 5.

Ref. y(r)	Mesh 1	Mesh 2	Dif(%)	Mesh 2	Mesh 3	Dif(%)
-0.1278	83.5829	83.3836	<b>0.2384</b>	83.3836	83.6063	-0.2670
-0.0851	102.0069	100.2475	1.7248	100.2475	99.5840	0.6618
-0.0428	108.1718	106.6446	1.4119	106.6446	104.9624	1.5774
0.0000	113.3278	111.3017	1.7877	111.3017	110.1906	0.9983
0.0425	115.7542	115.0112	0.6418	115.0112	113.9302	0.9399
0.0848	114.7562	114.7006	<b>0.0484</b>	114.7006	114.8770	-0.1538
0.1275	95.5621	97.9708	-2.5205	97.9708	99.6624	-1.7266
Ref. y(r)	Mesh 3	Mesh 4	Dif(%)	Mesh 4	Mesh 5	Dif(%)
-0.1278	83.6063	85.0868	-1.7708	85.0868	87.0690	-2.3296
-0.0851	99.5840	98.9062	0.6806	98.9062	99.2223	<b>-0.3195</b>
-0.0428	104.9624	103.9971	0.9196	103.9971	104.2633	<b>-0.2560</b>
0.0000	110.1906	108.9151	1.1576	108.9151	108.0284	<b>0.8141</b>
0.0425	113.9302	113.2568	<b>0.5911</b>	113.2568	111.9689	1.1372
0.0848	114.8770	114.4018	0.4136	114.4018	114.2898	0.0980
0.1275	99.6624	103.0821	-3.4312	103.0821	106.4711	-3.2877
Ref. y(r)	Mesh 5	Mesh 6	Dif(%)			
-0.1278	87.0690	84.0498	3.4676			
-0.0851	99.2223	100.2107	-0.9962			
-0.0428	104.2633	106.0392	-1.7032			
0.0000	108.0284	106.6700	1.2574			
0.0425	111.9689	107.7548	3.7636			
0.0848	114.2898	111.4744	2.4634			
0.1275	106.4711	105.3180	<b>1.0830</b>			

**Tabela 6.15.** Perfil da componente axial de velocidade,  $u$  [ $m/s$ ], para diferentes malhas a 20D - Amostra SE 10.



**Figura 6.16.** Perfil da componente axial de velocidade,  $u$  [ $m/s$ ], da amostra SE 10 - 20D

#### 6.2.2.4 Análise do fator $k$ a $20D$

A Tabela (6.16) mostra os resultados encontrados pelo problema inverso na configuração do caso 2 para posição a  $20D$  após a curva.

Como observado na Tabela (6.16), a diferença entre os resultados encontrados e o fator de perfil  $k$  proposto pela AGA (2007) aumenta, de 0.13% a 5.42% na malha Mesh 5, a medida que há um aumento da velocidade, fato que pode ser atribuído ao aumento da turbulência. Porém, é possível observar que ao aumentar a distância para coleta de dados, há uma aproximação dos resultados simulados, a baixas velocidades, como proposto pela equação da AGA (2007). Esse comportamento pode ser melhor observado na Figura (6.17).

O aumento da distância de coleta acaba por influenciar os resultados mostrados na Tabela (6.17), fazendo com que os resultados obtidos pelo processo apresentado neste trabalho se aproximem dos dados obtidos por Martins (Martins, 2012), a diferença atinge valores de 4.27% para  $Re = 1 \times 10^4$  (SE1), mas pode apresentar diferenças da ordem de 0.09%

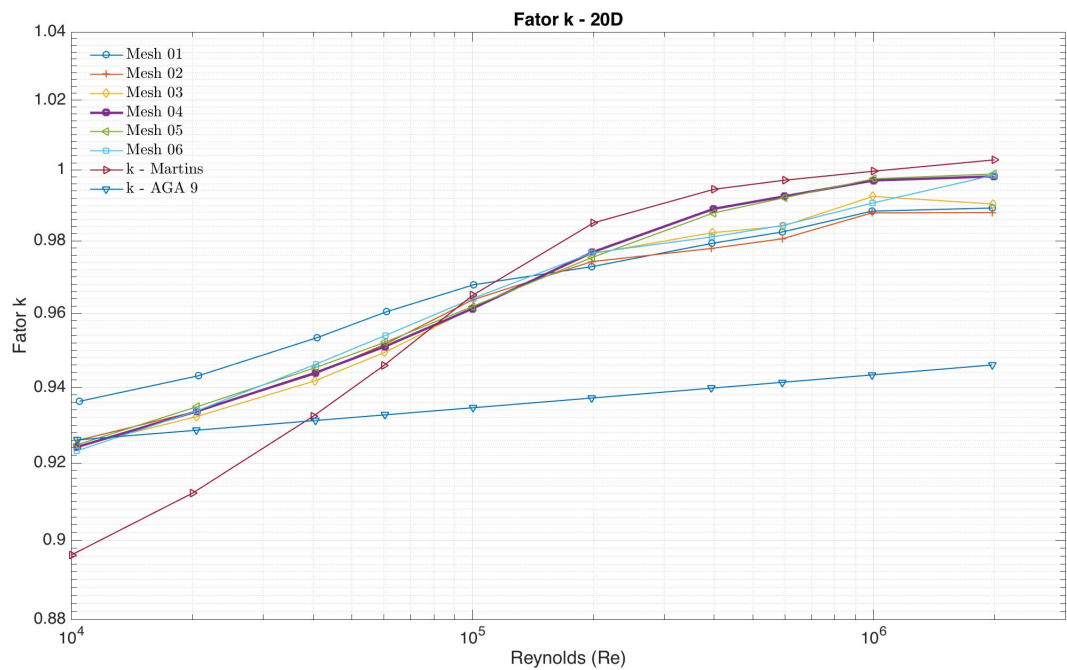
Ref	k (AGA)	Mesh 1	Dif(%)	Mesh 2	Dif(%)	Mesh 3	Dif(%)
SE1	0.9261	0.9363	1.0907	0.9259	<b>-0.0116</b>	0.9244	-0.1778
SE2	0.9286	0.9431	1.5360	0.9337	0.5417	0.9322	<b>0.3889</b>
SE3	0.9312	0.9534	2.3303	0.9436	1.3197	0.9418	<b>1.1289</b>
SE4	0.9327	0.9605	2.8905	0.9516	1.9934	0.9494	<b>1.7652</b>
SE5	0.9346	0.9678	3.4353	0.9637	3.0252	0.9614	2.7913
SE6	0.9372	0.9728	<b>3.6656</b>	0.9742	3.8047	0.9765	4.0214
SE7	0.9398	0.9793	4.0323	0.9779	<b>3.8955</b>	0.9823	4.3222
SE8	0.9414	0.9825	4.1870	0.9806	<b>3.9991</b>	0.9841	4.3425
SE9	0.9434	0.9883	4.5507	0.9878	<b>4.5034</b>	0.9925	4.9485
SE10	0.9460	0.9892	4.3649	0.9879	<b>4.2409</b>	0.9903	4.4732
Ref	k (AGA)	Mesh 4	Dif(%)	Mesh 5	Dif(%)	Mesh 6	Dif(%)
SE1	0.9261	0.9242	-0.1975	0.9248	-0.1321	0.9232	-0.3074
SE2	0.9286	0.9336	0.5387	0.9349	0.6689	0.9338	0.5513
SE3	0.9312	0.9439	1.3530	0.9453	1.4983	0.9462	1.5912
SE4	0.9327	0.9510	1.9283	0.9522	2.0478	0.9540	2.2364
SE5	0.9346	0.9613	<b>2.7808</b>	0.9619	2.8383	0.9641	3.0613
SE6	0.9372	0.9768	4.0586	0.9754	3.9167	0.9767	4.0435
SE7	0.9398	0.9890	4.9657	0.9878	4.8543	0.9811	4.2098
SE8	0.9414	0.9925	5.1468	0.9921	5.1094	0.9843	4.3636
SE9	0.9434	0.9970	5.3769	0.9975	5.4207	0.9906	4.7680
SE10	0.9460	0.9982	5.2177	0.9988	5.2831	0.9985	5.2523

**Tabela 6.16.** Convergência do fator de perfil  $k$  a  $20D$  da curva, comparada aos resultados encontrados pela equação da AGA (2007).



para o fator  $k$  previsto por Martins (Martins, 2012) em  $Re = 1 \times 10^5$  (SE5).

Nota-se que o aumento da distância para coleta de dados mostra uma tendência dos resultados tanto se aproximarem dos obtidos por Martins (2012), quanto os obtidos pela AGA (2007). Esse efeito é esperado, pois esse aumento da distância tende a diminuir os efeitos da turbulência gerada pelo defeito de linha (curva).



**Figura 6.17.** Perfil do fator de perfil  $k$  - SE 20D

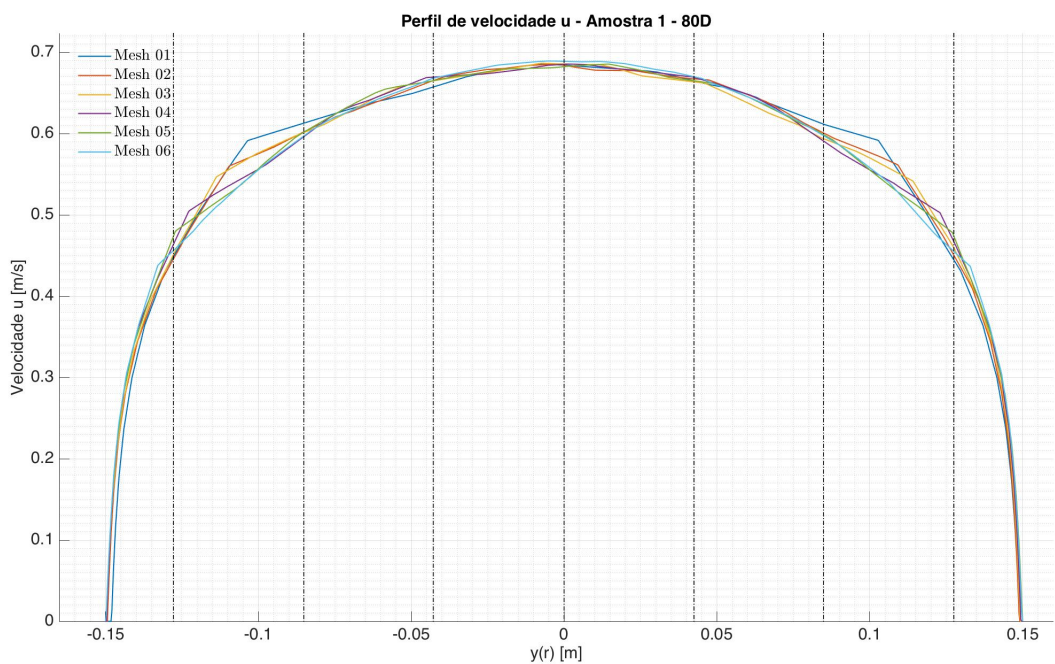
Comparando os resultados para o caso a  $20D$  com Martins (2012), Tabela (6.17), foi observado uma aproximação entre os resultados a medida que houve o aumento da velocidade de referência, confirmando o efeito observado no caso com coleta de dados a  $10D$ .

Ref	k (Martins)	Mesh 1	Dif(%)	Mesh 2	Dif(%)	Mesh 3	Dif(%)
SE1	0.8963	0.9363	4.2711	0.9259	3.1998	0.9244	3.0384
SE2	0.9121	0.9431	3.2849	0.9337	2.3043	0.9322	<b>2.1537</b>
SE3	0.9323	0.9534	2.2126	0.9436	1.1966	0.9418	<b>1.0047</b>
SE4	0.9459	0.9605	1.5200	0.9516	0.6066	0.9494	<b>0.3742</b>
SE5	0.9650	0.9678	0.2958	0.9637	-0.1292	0.9614	-0.3718
SE6	0.9850	0.9728	-1.2553	0.9742	-1.1087	0.9765	-0.8801
SE7	0.9945	0.9793	-1.5530	0.9779	-1.6983	0.9823	-1.2449
SE8	0.9971	0.9825	-1.4822	0.9806	-1.6821	0.9841	-1.3168
SE9	0.9996	0.9883	-1.1423	0.9878	-1.1928	0.9925	-0.7193
SE10	1.0028	0.9892	-1.3783	0.9879	-1.5103	0.9903	-1.2631
Ref	k (Martins)	Mesh 4	Dif(%)	Mesh 5	Dif(%)	Mesh 6	Dif(%)
SE1	0.8963	0.9242	3.0190	0.9248	3.0825	0.9232	<b>2.9123</b>
SE2	0.9121	0.9336	2.3015	0.9349	2.4299	0.9338	2.3139
SE3	0.9323	0.9439	1.2303	0.9453	1.3763	0.9462	1.4694
SE4	0.9459	0.9510	0.5404	0.9522	0.6620	0.9540	0.8540
SE5	0.9650	0.9613	-0.3826	0.9619	-0.3232	0.9641	<b>-0.0917</b>
SE6	0.9850	0.9768	<b>-0.8408</b>	0.9754	-0.9905	0.9767	-0.8567
SE7	0.9945	0.9890	<b>-0.5612</b>	0.9878	-0.6797	0.9811	-1.3643
SE8	0.9971	0.9925	<b>-0.4616</b>	0.9921	-0.5012	0.9843	-1.2945
SE9	0.9996	0.9970	-0.2632	0.9975	<b>-0.2167</b>	0.9906	-0.9113
SE10	1.0028	0.9982	-0.4705	0.9988	<b>-0.4009</b>	0.9985	-0.4338

**Tabela 6.17.** Convergência do fator de perfil  $k$  a  $20D$  da curva, comparado aos resultados de Martins (2012).

### 6.2.2.5 Análise de convergência do perfil de velocidades a $80D$

Já os resultados a  $80D$  apresentam diferenças menores devido ao perfil de velocidade se apresentar desenvolvido nessa posição. Porém, nas regiões de transição ainda persiste o efeito da mudança de malha e continua a apresentar maiores diferenças.



**Figura 6.18.** Perfil da componente axial de velocidade,  $u$  [ $m/s$ ], da amostra SE 1 - 80D

Na seção de coleta a  $80D$  as diferenças fora da zona de transição apresentaram resultados abaixo de 1%, mostrando menor interferência das perturbações causadas pela curva presente na geometria.

Ref. $y(r)$	Mesh 1	Mesh 2	Dif(%)	Mesh 2	Mesh 3	Dif(%)
-0.1278	0.4489	0.4457	<b>0.7041</b>	0.4457	0.4514	-1.2702
-0.0851	0.6129	0.6021	1.7578	0.6021	0.6013	<b>0.1327</b>
-0.0428	0.6574	0.6653	-1.1998	0.6653	0.6650	<b>0.0444</b>
0.0000	0.6842	0.6841	<b>0.0167</b>	0.6841	0.6859	-0.2567
0.0425	0.6650	0.6673	<b>-0.3517</b>	0.6673	0.6637	0.5403
0.0848	0.6117	0.6009	1.7635	0.6009	0.5939	1.1706
0.1275	0.4447	0.4505	<b>-1.3133</b>	0.4505	0.4598	-2.0647

Ref. $y(r)$	Mesh 3	Mesh 4	Dif(%)	Mesh 4	Mesh 5	Dif(%)
-0.1278	0.4514	0.4637	-2.7281	0.4637	0.4738	-2.1763
-0.0851	0.6013	0.5963	0.8418	0.5963	0.6018	-0.9229
-0.0428	0.6650	0.6696	-0.6894	0.6696	0.6651	0.6692
0.0000	0.6859	0.6852	0.0911	0.6852	0.6823	0.4232
0.0425	0.6637	0.6692	-0.8300	0.6692	0.6650	0.6302
0.0848	0.5939	0.5910	0.4825	0.5910	0.5989	-1.3278
0.1275	0.4598	0.4672	-1.6022	0.4672	0.4741	-1.4841

Ref. $y(r)$	Mesh 5	Mesh 6	Dif(%)
-0.1278	0.4738	0.4562	3.7054
-0.0851	0.6018	0.5971	0.7828
-0.0428	0.6651	0.6682	-0.4706
0.0000	0.6823	0.6890	-0.9771
0.0425	0.6650	0.6700	-0.7547
0.0848	0.5989	0.5977	<b>0.1991</b>
0.1275	0.4741	0.4552	3.9974

**Tabela 6.18.** Perfil da componente axial de velocidade,  $u$  [ $m/s$ ], para diferentes malhas a 80D - Amostra SE 1.

Ref. $y(r)$	Mesh 1	Mesh 2	Dif(%)	Mesh 2	Mesh 3	Dif(%)
-0.1278	4.5134	4.4862	<b>0.6026</b>	4.4862	4.5205	-0.7646
-0.0851	5.7966	5.7141	1.4242	5.7141	5.7071	<b>0.1224</b>
-0.0428	6.1387	6.2000	-0.9977	6.2000	6.1979	<b>0.0338</b>
0.0000	6.3388	6.3389	<b>-0.0020</b>	6.3389	6.3484	-0.1499
0.0425	6.1961	6.2154	<b>-0.3117</b>	6.2154	6.1874	0.4502
0.0848	5.7906	5.7030	1.5128	5.7030	5.6512	0.9074
0.1275	4.4874	4.5237	<b>-0.8093</b>	4.5237	4.5890	-1.4432

Ref. $y(r)$	Mesh 3	Mesh 4	Dif(%)	Mesh 4	Mesh 5	Dif(%)
-0.1278	4.5205	4.6145	-2.0797	4.6145	4.6781	-1.3790
-0.0851	5.7071	5.6708	0.6348	5.6708	5.7007	-0.5265
-0.0428	6.1979	6.2409	-0.6938	6.2409	6.2060	0.5591
0.0000	6.3484	6.3518	-0.0541	6.3518	6.3386	0.2088
0.0425	6.1874	6.2335	-0.7450	6.2335	6.2066	0.4314
0.0848	5.6512	5.6180	0.5870	5.6180	5.6821	-1.1395
0.1275	4.5890	4.6333	-0.9651	4.6333	4.6801	-1.0101

Ref. $y(r)$	Mesh 5	Mesh 6	Dif(%)
-0.1278	4.6781	4.5293	3.1810
-0.0851	5.7007	5.6612	0.6929
-0.0428	6.2060	6.2425	-0.5881
0.0000	6.3386	6.4088	-1.1085
0.0425	6.2066	6.2577	-0.8227
0.0848	5.6821	5.6662	<b>0.2789</b>
0.1275	4.6801	4.5200	3.4199

**Tabela 6.19.** Perfil da componente axial de velocidade,  $u$  [ $m/s$ ], para diferentes malhas a 80D - Amostra SE 5.

Ref. $y(r)$	Mesh 1	Mesh 2	Dif(%)	Mesh 2	Mesh 3	Dif(%)
-0.1278	93.0345	93.4939	-0.4937	93.4939	93.5524	<b>-0.0626</b>
-0.0851	111.8934	110.9296	0.8613	110.9296	109.8759	0.9499
-0.0428	116.8072	117.3317	-0.4490	117.3317	116.5528	0.6639
0.0000	119.6197	119.0166	0.5042	119.0166	118.7392	0.2331
0.0425	117.8436	117.5214	0.2734	117.5214	117.2814	0.2042
0.0848	112.2949	110.7532	1.3729	110.7532	110.8660	<b>-0.1019</b>
0.1275	93.1422	94.0258	-0.9486	94.0258	96.0915	-2.1970
Ref. $y(r)$	Mesh 3	Mesh 4	Dif(%)	Mesh 4	Mesh 5	Dif(%)
-0.1278	93.5524	96.1230	-2.7478	96.1230	95.3907	0.7619
-0.0851	109.8759	109.9822	<b>-0.0967</b>	109.9822	108.8043	1.0710
-0.0428	116.5528	116.8557	<b>-0.2599</b>	116.8557	115.7646	0.9337
0.0000	118.7392	118.0405	0.5884	118.0405	118.0986	<b>-0.0493</b>
0.0425	117.2814	116.7655	0.4398	116.7655	117.3052	-0.4622
0.0848	110.8660	109.4025	1.3201	109.4025	111.6421	-2.0472
0.1275	96.0915	96.5230	<b>-0.4490</b>	96.5230	98.6034	-2.1553
Ref. $y(r)$	Mesh 5	Mesh 6	Dif(%)			
-0.1278	95.3907	95.3205	0.0736			
-0.0851	108.8043	109.7012	-0.8244			
-0.0428	115.7646	116.9140	-0.9929			
0.0000	118.0986	118.8660	-0.6498			
0.0425	117.3052	117.1070	<b>0.1689</b>			
0.0848	111.6421	109.8081	1.6428			
0.1275	98.6034	95.3078	3.3423			

**Tabela 6.20.** Perfil da componente axial de velocidade,  $u$  [ $m/s$ ], para diferentes malhas a 80D - Amostra SE 10.

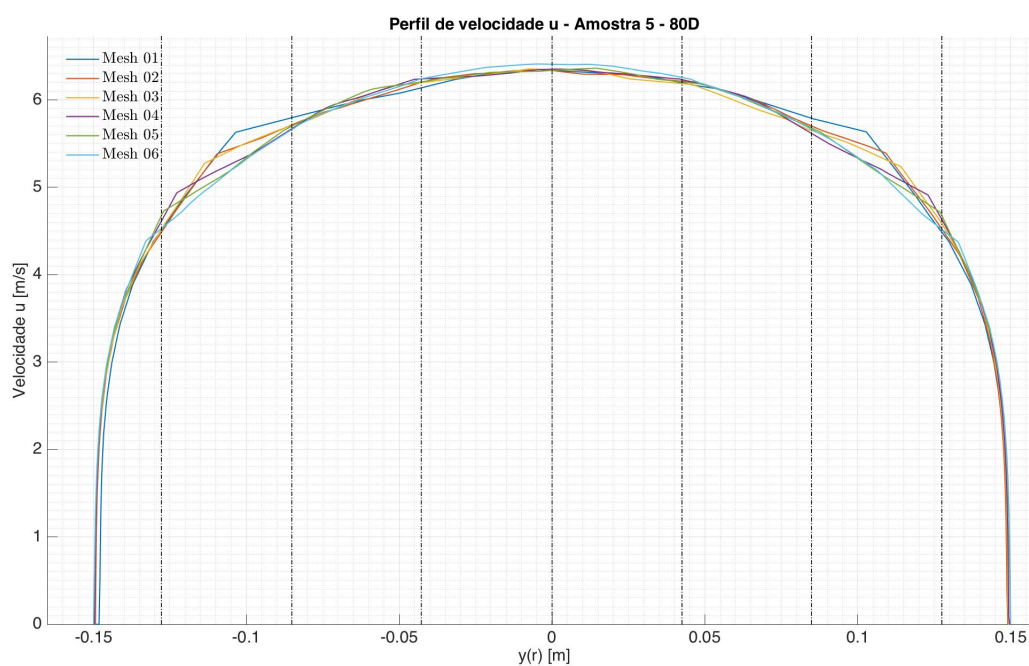


Figura 6.19. Perfil da componente axial de velocidade,  $u$  [m/s], da amostra SE 5 - 80D

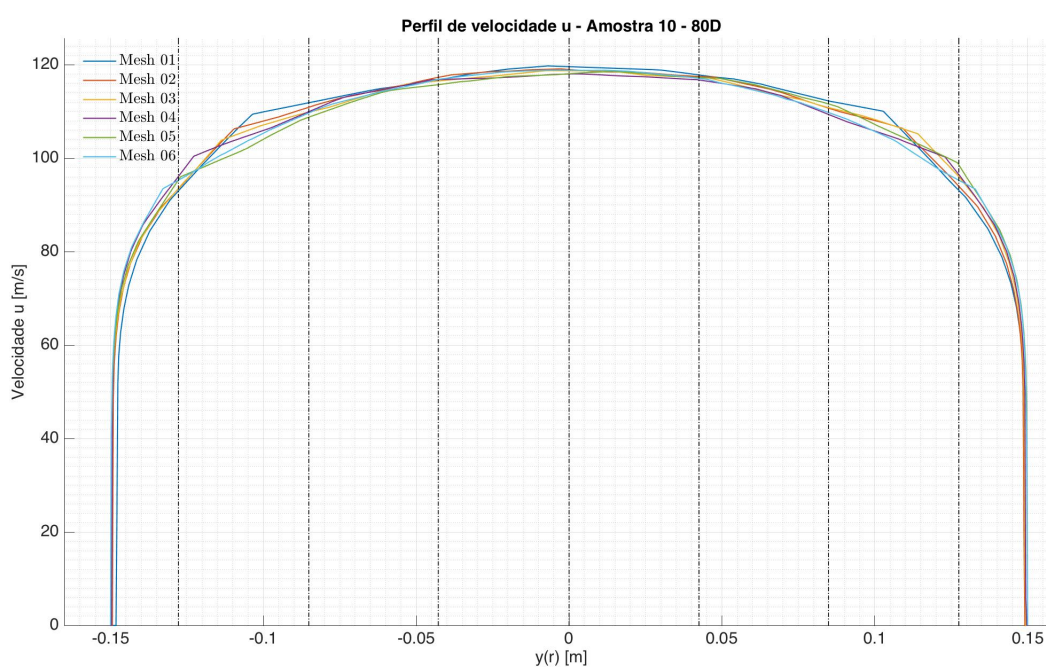


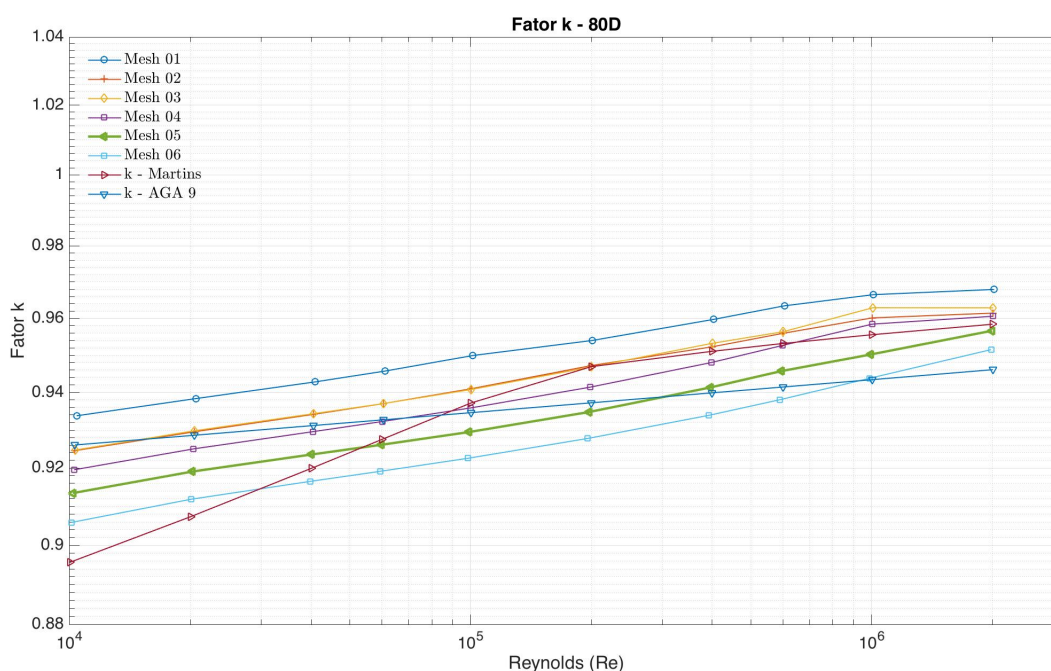
Figura 6.20. Perfil da componente axial de velocidade,  $u$  [m/s], da amostra SE 10 - 80D

### 6.2.2.6 Análise do fator $k$ a $80D$

A Tabela (6.21) confirma o comportamento de aproximação dos valores do fator de perfil  $k$  com os encontrados pela equação fornecida pela AGA (2007) a medida que a distância

entre o medidor e a curva aumenta, como observado na Figura (6.21).

A Tabela (6.22) também confirma que o aumento da distância de coleta de dados tende a aproximar os resultados apresentados por esse trabalho e Martins (2012). Podendo destacar os resultados encontrados pela malha Mesh 5, que apresentaram diferenças abaixo de 1% para o maior número de casos analisados.



**Figura 6.21.** Perfil do fator de perfil  $k$  - SE 80D

Observando a Figura (6.21) observa-se que as curvas dos resultados do problema inverso agora apresentam um comportamento similar ao da curva da Equação (3.22), proposta pela AGA (2007).

Como esperado, o aumento da distância levou o perfil de velocidade a se desenvolver completamente, diminuindo a interferência causada pela presença da curva. Isso levou uma aproximação dos resultados obtidos aplicando a técnica dos problemas inversos com os propostos tanto por Martins (2012) quanto pela AGA (2007), ambos apresentando, para a maior parte das simulações, diferenças abaixo de 1% utilizando a malha Mesh 5.

Esse resultado se configura como um excelente teste para a metodologia proposta, pois



Ref	k (AGA)	Mesh 1	Dif(%)	Mesh 2	Dif(%)	Mesh 3	Dif(%)
SE1	0.9261	0.9338	0.8264	0.9246	-0.1586	0.9247	<b>-0.1410</b>
SE2	0.9286	0.9384	1.0377	0.9296	<b>0.1022</b>	0.9298	0.1304
SE3	0.9312	0.9428	1.2334	0.9342	0.3211	0.9344	0.3406
SE4	0.9327	0.9457	1.3765	0.9370	0.4639	0.9370	0.4650
SE5	0.9346	0.9499	1.6110	0.9410	0.6809	0.9408	0.6590
SE6	0.9372	0.9540	1.7584	0.9472	1.0561	0.9469	1.0182
SE7	0.9399	0.9597	2.0669	0.9523	1.3034	0.9532	1.4017
SE8	0.9415	0.9635	2.2823	0.9559	1.5186	0.9564	1.5635
SE9	0.9434	0.9665	2.3887	0.9602	1.7438	0.9629	2.0250
SE10	0.9461	0.9679	2.2549	0.9614	1.5969	0.9629	1.7444
Ref	k (AGA)	Mesh 4	Dif(%)	Mesh 5	Dif(%)	Mesh 6	Dif(%)
SE1	0.9261	0.9196	-0.7024	0.9135	-1.3687	0.9059	-2.2150
SE2	0.9286	0.9250	-0.3830	0.9191	-1.0292	0.9119	-1.8246
SE3	0.9312	0.9296	<b>-0.1697</b>	0.9236	-0.8184	0.9165	-1.5887
SE4	0.9327	0.9323	<b>-0.0418</b>	0.9261	-0.7039	0.9191	-1.4647
SE5	0.9346	0.9359	<b>0.1374</b>	0.9295	-0.5444	0.9226	-1.2951
SE6	0.9372	0.9414	0.4497	0.9348	<b>-0.2537</b>	0.9278	-1.0075
SE7	0.9399	0.9480	0.8640	0.9413	<b>0.1600</b>	0.9339	-0.6301
SE8	0.9415	0.9527	1.1799	0.9457	0.4587	0.9381	<b>-0.3515</b>
SE9	0.9434	0.9584	1.5690	0.9502	0.7186	0.9438	<b>0.0467</b>
SE10	0.9461	0.9606	1.5100	0.9566	1.1054	0.9515	<b>0.5751</b>

**Tabela 6.21.** Convergência do fator de perfil  $k$  a  $80D$  da curva, comparada aos resultados encontrados pela equação da AGA (2007).

Ref	k (Martins)	Mesh 1	Dif(%)	Mesh 2	Dif(%)	Mesh 3	Dif(%)
SE1	0.8957	0.9338	4.0841	0.9246	3.1275	0.9247	3.1448
SE2	0.9074	0.9384	3.3058	0.9296	2.3881	0.9298	2.4157
SE3	0.9199	0.9428	2.4311	0.9342	1.5260	0.9344	1.5455
SE4	0.9275	0.9457	1.9262	0.9370	1.0151	0.9370	1.0161
SE5	0.9372	0.9499	1.3426	0.9410	0.4061	0.9408	0.3842
SE6	0.9469	0.9540	0.7416	0.9472	0.0291	0.9469	<b>-0.0090</b>
SE7	0.9511	0.9597	0.9034	0.9523	<b>0.1275</b>	0.9532	0.2274
SE8	0.9532	0.9635	1.0658	0.9559	0.2893	0.9564	0.3350
SE9	0.9556	0.9665	1.1340	0.9602	0.4780	0.9629	0.7639
SE10	0.9584	0.9679	0.9837	0.9614	0.3146	0.9629	0.4647
Ref	k (Martins)	Mesh 4	Dif(%)	Mesh 5	Dif(%)	Mesh 6	Dif(%)
SE1	0.8957	0.9196	2.5997	0.9135	1.9526	0.9059	<b>1.1305</b>
SE2	0.9074	0.9250	1.9122	0.9191	1.2781	0.9119	<b>0.4978</b>
SE3	0.9199	0.9296	1.0394	0.9236	0.3957	0.9165	<b>-0.3682</b>
SE4	0.9275	0.9323	0.5099	0.9261	<b>-0.1509</b>	0.9191	-0.9106
SE5	0.9372	0.9359	<b>-0.1410</b>	0.9295	<b>-0.8275</b>	0.9226	-1.5835
SE6	0.9469	0.9414	-0.5860	0.9348	<b>-1.2997</b>	0.9278	-2.0645
SE7	0.9511	0.9480	-0.3190	0.9413	<b>-1.0343</b>	0.9339	-1.8370
SE8	0.9532	0.9527	<b>-0.0547</b>	0.9457	<b>-0.7881</b>	0.9381	-1.6117
SE9	0.9556	0.9584	<b>0.3003</b>	0.9502	<b>-0.5648</b>	0.9438	-1.2480
SE10	0.9584	0.9606	0.2262	0.9566	<b>-0.1855</b>	0.9515	-0.7249

**Tabela 6.22.** Convergência do fator de perfil  $k$  a  $80D$  da curva, comparado aos resultados de Martins (2012).

reproduz resultados amplamente conhecidos e validados.

As diferenças apresentadas são da mesma ordem de grandeza daquelas apresentadas para o tubo reto (caso 1). Assim, mostra-se a robustez da aplicação das técnicas de problemas inversos na previsão do fator  $k$  em escoamentos assimétricos, visto que o fenômeno de assimetria não alterou a qualidade da previsão do fator  $k$  pela técnica.

## Capítulo 7

### Conclusão e trabalhos futuros

A estimativa do fator de perfil  $k$  para medição ultrassônica por tempo de trânsito foi efetivamente obtida pela aplicação das técnicas de problemas inversos, segundo a metodologia proposta Figura (5.1).

Embora não tenham sido viabilizados dados experimentais, a proposta de utilizar dados simulados numericamente com erros aleatórios se mostrou robusta e eficiente, mesmo para erros introduzidos das ordens de 5%, 10% e 15% , conforme Tabela (6.7) (nessa faixa, não foram observadas diferenças significativas nos resultados, para qualquer nível de erro).

Para a implantação da metodologia foi necessário desenvolver uma interessante interface entre Matlab e Ansys (Anexo A), que proporcionou a solução direta para a técnica de problema inverso (tendo em vista que o modelo matemático de escoamento turbulento assimétrico não possui solução analítica). Essa interface proporciona uma ferramenta muito útil no estudo de outros problemas de mecânica dos fluidos, envolvendo ou não a técnica de problema inverso.

A validação da metodologia proposta foi obtida, em primeiro lugar, para tubo reto, com trecho de desenvolvimento de 80D (Caso 1), quando o escoamento torna-se completamente desenvolvido (simétrico). Nesse caso, o fator de perfil  $k$ , obtido no presente trabalho, difere do fator previsto em norma em menos de 1,3%, aproximadamente - Tabela (6.4). Esse valor é considerado compatível com os erros dos “perfis experimentais” simulados.

Por fim, foram obtidas estimativas para o fator de perfil  $k$  para escoamentos assimétricos. Nesse caso, a validação ocorreu também para seção de medição a  $80D$  à jusante da curva, quando o escoamento torna-se completamente desenvolvido. Observou-se que, nessa situação, as diferenças entre os resultados presentes e os obtidos pelas referências (Martins e AGA), alcançaram valores da ordem de 1,5% na Tabela (6.21) (quando a convergência até mesh 5 já é suficiente). Tal diferença é da mesma ordem obtida no Caso 1, que indica uma menor influência dos efeitos da curva com o aumento da distância, validando o estudo a  $80D$ , indicando o desenvolvimento do perfil de velocidade como observado no Caso 1.

Na situação em que o escoamento mostrava-se mais assimétrico (Caso 2, a  $10D$ ), a diferença máxima, entre o valor obtido e da referência (Martins (2012)), é de 3,5% para  $Re = 1 \times 10^4$ , já a partir de malha Mesh 5, conforme pode ser observado na Tabela (6.12). Observa-se também que a diferença reduz com o aumento de  $Re$ , sendo que os valores se igualam em  $Re = 1 \times 10^5$  - Figura (6.13).

Para o Caso 2, a  $20D$ , as diferenças se mantiveram abaixo de 3% já na malha Mesh 4 - Tabela (6.17). Também nesse caso, as maiores diferenças estão em valores de  $Re$  mais baixos e, conforme Figura (6.17), os fatores obtidos e de referência se igualam em  $Re = 8 \times 10^4$ .

Atribuem-se as diferenças observadas principalmente aos processos de convergência de malha, tal como foi comentado na seção 5.3.1. Porém, de forma a manter o custo computacional exequível, optou-se por adotar as malhas tais como descritas.

Apesar de considerar os melhores resultados para casos utilizando as malhas Mesh 4 e Mesh 5, as malhas menos refinadas também apresentaram resultados satisfatórios em algumas faixas de velocidade, como apresentado na malha Mesh 2 para os casos SE 4, SE 5 e SE 6, Tabela (6.12), onde apresentaram diferenças abaixo de 1%. Em vista desses resultados, é possível obter uma aproximação do fator de perfil  $k$  em menos tempo e com menor custo computacional.

Futuramente, com a disponibilidade de recursos computacionais mais avançados e processamento paralelo mais robusto, deve ser analisada a redução dessas diferenças em malhas mais refinadas. E em vista de corrigir defeitos de convergências das malhas, trabalhos futuros devem tentar apresentar uma malha mais homogênea.

Além do desafio acadêmico para solução de um problema complexo, deve-se simular mais casos de escoamentos assimétricos encontrados comumente em plantas industriais, de forma a corrigir erros de medição de vazão, onde são considerados, a priori, escoamentos completamente desenvolvidos.

## Referências Bibliográficas

- ABNT (2010). ABNT NBR 15855:2010 - Medição de gás por medidores do tipo ultrassônicos multitrajetórias. Norma Brasileira, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- AGA (2007). Measurement of gas by multipath ultrasonic meters. A.G.A Report No. 9, American Gas Association, Washington, DC, USA.
- Alifanov, O. M. (1994). *Inverse heat transfer problems*. International series in heat and mass transfer. Springer-Verlag.
- ANP/INMETRO (2000). Portaria conjunta ANP/INMETRO No 1. 20.06.2011 - DOU - Diário Oficial da União.
- Ansys (2013a). *ANSYS FLUENT Theory Guide*. Ansys, Inc., Canonsburg, PA, USA, release 15.0 edition.
- Ansys (2013b). *ANSYS FLUENT™ Version 15.0*. Ansys, Inc.
- Bokar, J. and Özisik, M. (1995). An inverse analysis for estimating the time-varying inlet temperature in laminar flow inside a parallel plate duct. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 38(1):39 – 45.
- Brasil, W. M., Su, J., and Freire, A. P. S. (2004). An inverse problem for the estimation of upstream velocity profiles in an incompressible turbulent boundary layer. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47(6-7):1267 – 1274.
- Brassier, P., Hosten, B., and Vulovic, F. (2001). High-frequency transducers and correlation method to enhance ultrasonic gas flow metering. *Flow Measurement and Instrumentation*, 12(3):201 – 211.
- Chen, L. (2016). A high-order modified levenberg–marquardt method for systems of non-

- linear equations with fourth-order convergence. *Applied Mathematics and Computation*, 285:79 – 93.
- Colaço, M. J., Orlande, H. R. B., and Dulikravich, G. S. (2006). Inverse and optimization problems in heat transfer. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 28:1 – 24.
- da Fonseca, H. M. (2012). *Soluções de Problemas Inversos com Medidas Termográficas em Micro-escalas*. Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, Rio de Janeiro, RJ - Brasil.
- Dell’Isola, M., Cannizzo, M., and Diritti, M. (1997). Measurement of high-pressure natural gas flow using ultrasonic flowmeters. *Measurement*, 20(2):75 – 89.
- Delmée, G. J. (2003). *Manual de Medição de Vazão*. Edgard Blücher Ltda, 3<sup>a</sup> edition.
- Engl, H. W., Hanke, M., and Neubauer, A. (1996). *Regularization of Inverse Problems: Mathematics and its Applications*. Kluwer Academic Publishers.
- Gallagher, J. E. (2006). Cáp. 6 - Ultrasonic Flowmeter. In Gallagher, J. E., editor, *Natural Gas Measurement Handbook*, pages 135 – 162. Gulf Publishing Company.
- GERG (2000). Gerg Project on Ultrasonic Gas Flow Meters, Phase II. GERG Technical Monograph 11, GROUPE EUROPEEN DE RECHERCHES GAZIERES.
- Hadamard, J. (1923). *Lectures on Cauchy’s Problem in Linear Differential Equations*. Yale University, New Haven.
- Håkansson, E. and Delsing, J. (1992). Effects of flow disturbance on an ultrasonic gas flowmeter. *Flow Measurement and Instrumentation*, 3(4):227 – 233.
- Heritage, J. (1989). The performance of transit time ultrasonic flowmeters under good and disturbed flow conditions. *Flow Measurement and Instrumentation*, 1(1):24 – 30.
- Hilgenstock, A. and Ernst, R. (1996). Analysis of installation effects by means of computational fluid dynamics—cfd vs experiments. *Flow Measurement and Instrumentation*, 7(3-4):161–171.
- Holm, M., Stang, J., and Delsing, J. (1995). Simulation of flow meter calibration factors for various installation effects. *Measurement*, 15(4):235 – 244.



- Levenberg, K. (1944). A Method for the Solution of Certain Non-linear Problems in Least Squares. *Quarterly of Applied Mathematics*, 2:164–168.
- Liu, F. and Ozisik, M. (1996). Simultaneous estimation of fluid thermal conductivity and heat capacity in laminar duct flow. *Journal of the Franklin Institute*, 333(4):583 – 591.
- Marquardt, D. (1963). An Algorithm for Least Squares Estimation of Nonlinear Parameters. *J. Soc. Ind. Appl. Math*, 11:431–441.
- Martins, R. S. (2012). Installation effects of upstream elbows on the correction factor of single-path transit-time ultrasonic flow meters. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Espírito Santo - UFES.
- MathWorks, T. (2015). Matlab™ version r2015b.
- Nikuradse, J. (1966. Translated from 'Gesetzmässigkeiten der turbulenten Strömung in glatten Rohern' Forsch. Arb. Ing.-Wes. No. 356 (1932)). Laws of turbulent flow in smooth pipes. NASA TT F-10, 359, National Aeronautics and Space Administration, Washington, USA.
- Ozisik, M. N. and Orlande, H. R. B. (2000). *Inverse Heat Transfer: Fundamentals and Applications*. Taylor & Francis, New York.
- Raišutis, R. (2006). Investigation of the flow velocity profile in a metering section of an invasive ultrasonic flowmeter. *Flow Measurement and Instrumentation*, 17(4):201 – 206.
- Ramos, R. (2006). Desenvolvimento de um medidor de vazão de gás por ultra-som: modelagem, protótipo e testes. Master's thesis, Universidade Federal do Espírito Santo - UFES.
- Reynolds, O. (1894a). On the dynamical theory of incompressible viscous fluids and the determination of the criterion. *Proceedings of the Royal Society of London*, 56(336-339):40–45.
- Reynolds, O. (1894b). *On the Dynamical Theory of Incompressible Viscous Fluids and the Determination of the Criterion*. Philosophical transactions of the Royal Society of London. Ser. A. Royal Society.
- Schlichting, H. (1968). *Boundary-Layer Theory*, volume McGraw-Hill series in Mechanical Engineering. McGraw-Hill, New York, USA, 6<sup>a</sup> ed. edition.

- Tarantola, A. and Valette, B. (1982). Generalized Nonlinear Inverse Problem Solved Using the Least Squares Criterion. In *Reviews of Geophysics and Space Physics*, volume 20, pages 219–232.
- Weissenbrunner, A., Fiebach, A., Schmelter, S., Bär, M., Thamsen, P., and Lederer, T. (2016). Simulation-based determination of systematic errors of flow meters due to uncertain inflow conditions. *Flow Measurement and Instrumentation*, pages –.
- Zheng, D., Zhang, P., Zhang, T., and Zhao, D. (2013). A method based on a novel flow pattern model for the flow adaptability study of ultrasonic flowmeter. *Flow Measurement and Instrumentation*, 29:25 – 31.

# Apêndice A

## Scripts/Interface Matlab - Ansys

A seguir são mostrados os scripts do utilizados no Matlab para desenvolver o Problema Inverso aplicado na dinâmica do escoamento assimétrico, utilizando uma interface de comunicação entre as plataformas do Matlab e Ansys Fluent/CFD-Post.

Os códigos são apresentados da seguinte forma:

- Script de controle: dados iniciais do problema e coleta dos dados de referência;
- Script do Problema Inverso: contém os passos para execução do PI;
- Script da Interface Matlab/Fluent/CFD-Post: executa e recolhe as informações do problema direto;
- Script do Journal da Plataforma Ansys Fluent: manipula o Journal do Fluent, responsável pelo passo-a-passo a ser executado dentro do programa;
- Script do Journal da Plataforma Ansys CFD-Post: manipula o Journal do CFD-Post, responsável pelo passo-a-passo a ser executado dentro do programa;
- Script para cálculo da velocidade no caminho acústico considerando a influência das componentes  $u,v,w$ : Equação (3.23).

```

%% Script de controle

clc
clear all
cd(fullfile('/home/lftc/Documents/Rafael/PI_Files'))
global diam turb L n alpha ro mi mesh x dev amostra Geo eps linesamples

%% Dados Iniciais

% Fatores Geométricos
diam = 0.3; % Diâmetro da tubulação [m]
L = (diam^2 + diam^2)^0.5; % Distância entre os medidores [m]
n = 1000; % Número de pontos no AP
alpha = pi/4; % Angulo do AP

% Propriedades do Fluido
ro = 1.185; % Densidade da substância
mi = 1.831*10^-5; % Propriedade da substância - Visc. dinâmica

% Parâmetros do Fluent
turb = sprintf('RNG'); % Modelo de Turbulência (RNG / Standart)
Geo = sprintf('SE'); % Geometria ('SP' - Straight Pipe ; 'SE' - Single
Elbow)

% Parâmetros do CFD-Post
x = 80; % Distância da coleta de dados (x*D - medido em diâmetros) [10,
20, 80]
dev_v = [0.01]; % Perturbação do escoamento de medição (ruído)
angulo = [0] ; % Angulo do AP em relacao ao eixo
linesamples_v = [1000]; % Número de pontos de coleta no caminho acústico

% Parâmetros do Problema Inverso
teta = angulo(1,1);
Re = [8.5e4]; % Estimativa inicial
eps_v = [ 1e-3 ]; % Define o peso da variável EPS do PI

%%
filename_I = sprintf('- Resultado_Geral_%s_%gD_2.dat', Geo, x);
fileID_I = fopen(filename_I,'wt');
fprintf(fileID_I,'\n Chute Inicial \t Iter \t Re \t k \t
Amostra\t Mesh\t Dev\t Teta\n ');
fprintf(fileID_I,'
----- \n');

for e = 1:length(eps_v)
    eps = eps_v(1,e);

for amostra = 1:10 % Definição da amostra a ser usada

    amostra1 = sprintf('Amostra_%s_%g.dat', Geo, amostra);
    amostra2 = sprintf('Amostra_%s_%g.cas', Geo, amostra);
    copyfile(amostra1, 'Amostra.dat');
    copyfile(amostra2, 'Amostra.cas');

    for mesh = 1:6 % Definição da malha a ser usada

        for l = 1:length(linesamples_v)

```

```

for a = 1:length(dev_v) % Definição do desvio da amostra
    for q = 1:length(angulo) % Definição do ângulo de coleta
da amostra
        linesamples = linesamples_v(1,l);
        dev = dev_v(1,a);
        teta = angulo(q,1);
        M_Journal_CFD (x,teta,linesamples); % Script que
determina as condições da coleta de dados no CFD-Post
        V_AP = M_Amostra(teta); % Importa o vetor velocidade
sobre o caminho acústico da amostra de referência
        for p = 1:length(Re)
            [T_Re,k_amostra] = M_Problema_Inverso_AP(Re(p,1),
V_AP,teta,mesh); % Script do PI
            fprintf(fileID_I, '    %.9g \t',Re(p,1));
            fprintf(fileID_I, '\t %d \t    %10.5f \t %.5f \t
%.2g \t %.2g\t %g\t %g\n \n',T_Re(end,1:2),k_amostra,amostra,mesh,
dev,teta);
        end
    end
end
end
end
end
fclose('all');
movefile(
(filename_I, '/home/lftc/Documents/Rafael/PI_Files/Fluent_CaseData_Files/')
;

```

```

%% Script do Problema Inverso

function [T_Re,k_amostra] = M_Problema_Inverso_AP(Re,V_AP,teta,mesh)

    format longG
    global diam ro mi cont maxIter x dev
    tic

    %% Dados Iniciais

    % Fatores do Problema Inverso
    mi_PI = 10^-5; % Parâmetro de formação do novo valor p/ o Prob. Inverso (PI)
    eps = 10^-3; % Valor de perturbação do parâmetro em análise no PI
    maxIter = 10^4; % Número máximo de iterações do PI
    Cstop = 10^-5; % Cond. de parada - Refina o resultado

    % Equações
    V_m = @(x) x*mi/(ro*diam); % x = Re
    Re_n = @(x) (x*ro*diam)/(mi); % x = V_m
    k = @(x,y) x/y; % V_m/V_UFM

    %% Passo 01

    % Estimativa inicial - Fluent
    [P_V_f1] = M_Inlet(Re); % Function para o script da interface Matlab/Fluent/CFD-Post
    [V_n] = M_Vel(P_V_f1,teta); % Cálculo da velocidade sobre o caminho acústico considerando a influência de v(u,v,w)
    disp('Fluent (Estimativa inicial) - OK')

    %% Probl. Inverso
    for cont = 1:maxIter

        T_Re(cont,1) = cont;
        T_Re(cont,2) = Re;
        M_Display (T_Re)

    %% Passo 02

        S = (V_AP - V_n)'*(V_AP - V_n);
        % S = Valor da função objetivo 1
        % V_AP = Dados amostrais, #referência
        % V_n = Dados encontrados a partir da estimativa inicial e
        % comparação para os passos seguintes

    %% Passo 03

        Re_down = Re - Re*eps; % % % Variável EPS do PI, formação da Matriz Jacobiana
        [P_V_down] = M_Inlet(Re_down);
        [V_J] = M_Vel(P_V_down,teta);
        M_Display (T_Re)
        disp('Fluent (1/2) - OK')

        J = [(V_n - V_J)/(V_m(Re*eps))]; %% Matriz Jacobiana

        omega = diag(diag(J'*J));
    end
end

```

```

%% Passo 04

    delta_P = (J'*J+mi_PI*omega)\(J'*(V_AP - V_n));
    % delta_P = Variação do passo

%% Passo 05

    Re_novo = Re + Re_n(delta_P(1,1));
    % Nova velocidade para a condição de entrada no problema direto

%% Passo 06

    [P_V_f2] = M_Inlet(Re_novo);
    [V_novo] = M_Vel(P_V_f2,teta);
    M_Display (T_Re)
    disp('Fluent (2/2) - OK')

%% Passo 07

    S_old = S;
    S = (V_AP - V_novo)'*(V_AP - V_novo); % Cálculo da nova função
objetivo para comparação entre as estimativas

%% Passo 08

    dif = abs(Re_novo - Re);

    T_Re(cont,3) = Re_novo;
    T_Re(cont,4) = Re;
    T_Re(cont,5) = dif;

    M_Display (T_Re)

    if dif <= Cstop % Condição de parada
        break
    end

    if S >= S_old % Determina a direção do PI
        mi_PI = 10*mi_PI;
    else
        Re = Re_novo; % Caso a nova estimativa seja melhor que a
estimativa inicial do passo
        V_n = V_novo;
        P_V_f1 = P_V_f2;
        mi_PI = 0.1*mi_PI; % Variável presente no cálculo do
delta_P, diminuindo a diferença entre um passo e outro tendendo a
convergência
    end

    % Salva todas as variáveis do programa
    workspace = sprintf('Re_%g_%g_workspace_mesh%g_SIM.mat',T_Re
(1,2),teta,mesh);
    save (workspace);
end

%%
delete (workspace)

```

```

% % Salva todas as variáveis do AP simulado (Re - correto)
filename3 = sprintf('Re_%g_%g_%gD__V_n__mesh%g_dev%g.dat',T_Re(1,2),
teta,x,mesh,dev);
fileID3 = fopen(filename3,'wt');
[i,j] = size(P_V_f1);
fprintf (fileID3,' u [m/s] \t v [m/s] \t w [m/s] \t x [m] \t
y [m] \t z [m] \n');
for a = 1:i
    fprintf (fileID3,'%10g \t %10g \t %10g \t %10g \t %10g \t %10g
\n',P_V_f1(a,:));
end
fclose(fileID3);

%T = table(Re,Re_novo,k_novo,cont)
Res = [Re,cont];
disp(' Re cont');
disp(Res);

k_amostra = k(V_m(T_Re(end,2)),sum(V_AP));
%k_AGA = 1/(1.12-0.01*log(T_Re(end,2)));
%Q_Ramon_entrada = V_m(Re_Ramon)*pi*(diam^2)/4;
Q_simulado = V_m(T_Re(end,2))*k_amostra*pi*(diam^2)/4;
%Q_AGA = V_m(T_Re(end,2))*k_AGA*pi*(diam^2)/4;
disp('k_amostra');
disp(k_amostra);

t = toc;
PI_time = t/3600;

%% Arquivo Resultado

filename = sprintf('Re_%g_%g__Resultado_mesh%g_dev%g.dat',T_Re(1,2),
teta,mesh,dev);
fileID = fopen(filename,'wt');
fprintf(fileID,' Iter \t Re \t \t Re_V_novo \t \t Re_V_n
\t \t Dif(novo - n) \n');
fprintf(fileID,'
-----
\n');

[i,j] = size(T_Re);
for a = 1:i
    fprintf(fileID,' %.9g \t %.17g \t %.17g \t %.17g \t
%3.18f \n',T_Re(a,:));
end

fprintf(fileID,'\n k_amostra - %.10g \n',k_amostra);
fprintf(fileID,'\n Q_simulado - %.10g\n \n',Q_simulado);

fprintf(fileID,'\n\n\n
----- \n\n');
fprintf(fileID,'\t Tempo de simulação: %.9g horas.\n',PI_time);
fprintf(fileID,'\t Erro de amostragem: %.2g.',dev);
fprintf(fileID,'\n\n
-----\n');
fprintf(fileID,'\n 0 Problema Inverso atingiu seu objetivo na %g
iteração.\n',T_Re(end,1));

```



```

fprintf(fileID, '\n A partir do PI foi poss?vel obter o valor %.10g
para o n?mero de Reynolds.\n', Re);
fclose(fileID);

% Mudan?a de pasta dos Arquivos finais

destination = sprintf('C:\\Users\\administrator\\Documents\\Rafael\\-
PI_beta\\Fluent_CaseData_Files\\Fluent_CaseData_mesh%g_dev%g.cas', mesh,
dev);
destination2 = sprintf('C:\\Users\\administrator\\Documents\\Rafael\\-
PI_beta\\Fluent_CaseData_Files\\Fluent_CaseData_mesh%g_dev%g.dat', mesh,
dev);
destination3 = sprintf('C:\\Users\\administrator\\Documents\\Rafael\\-
PI_beta\\Fluent_CaseData_Files\\POST_file_mesh%g_dev%g.cdat', mesh, dev);
destination4 = sprintf('C:\\Users\\administrator\\Documents\\Rafael\\-
PI_beta\\Fluent_CaseData_Files\\');
destination5 = sprintf('C:\\Users\\administrator\\Documents\\Rafael\\-
PI_beta\\Fluent_CaseData_Files\\OUTPUT_FLUENT_mesh%g_dev%g.dat', mesh, dev);
copyfile('Fluent_CaseData.cas', destination);
copyfile('Fluent_CaseData.dat', destination2);
copyfile('POST_file.cdat', destination3);
copyfile(filename, destination4);
copyfile(filename3, destination4);
copyfile('OUTPUT_FLUENT.cdat', destination5);

% Salva todas as vari?veis do programa
workspace = sprintf('Re_%g_%g_workspace_mesh%g_dev%g_FINAL.mat', T_Re
(1,2), teta, mesh, dev);
save (workspace);
copyfile(workspace, destination4);

delete (filename)
delete (filename3)
delete (workspace)

end

```

```

%% Script da Interface Matlab/Fluent/CFD-Post

function [Velocidade] = M_Inlet(Re)
    global diam ro mi turb mesh teta T_Re Geo

    %ro = 1.185; % Densidade da substância
    %mi = 1.831*10^-5; % Propriedade da substância - Visc. dinâmica
    %diam = 0.3; % Diâmetro da tubulação = 0.3 m

    V_m = (Re*mi)/(ro*diam); % Calcula da velocidade de entrada do fluido em relação ao número de Reynolds estabelecido na estimativa do PI
    M_Journal_Fluent (turb,V_m,mesh,Geo) % Script responsável por alterar a rotina dos programas Fluent e CFD-Post com as novas condições de contorno

%%
% Fluent & CFD-POST

    %Journal_Fluent (Problema direto)
    !"fluent" 3ddp -mpi=openmpi -t35 -i
"/home/lftc/Documents/Rafael/PI_Files/Journal_Fluent"

    %CFD-Post (Salva as componentes da velocidade em arquivos .dat)
    !"cfdpost" -line -f "/home/lftc/Documents/Rafael/PI_Files/POST_file.cdat" -s Journal_Session_Post.cse

% Importando as velocidades do AP

A = importdata('ux_vel.dat',' ',5);
U = A.data;

A = importdata('vx_vel.dat',' ',5);
V = A.data;

A = importdata('wx_vel.dat',' ',5);
W = A.data;

A = importdata('vy_vel.dat',' ',5);
Y = A.data;

A = importdata('wz_vel.dat',' ',5);
Z = A.data;

Velocidade(:,1) = U(:,2);
Velocidade(:,2) = V(:,2);
Velocidade(:,3) = W(:,2);
Velocidade(:,4) = U(:,1);
Velocidade(:,5) = Y(:,1);
Velocidade(:,6) = Z(:,1);

end

```

```

%% Script do Journal da Plataforma Ansys Fluent
% Responsável pelo passo a passo a ser realizado dentro do Ansys Fluent,
% editando a cada iteração as novas condições de contorno do problema
% direto.
function M_Journal_Fluent (model,F_inletV,mesh,Geo)

    % Fluent Journal
    filename = sprintf('Journal_Fluent');
    fileID = fopen(filename,'rt+'); % Abre arquivo Inlet
    B = textscan(fileID,'%s','delimiter','\n');
    B = B{1,1};

    file = sprintf('GEO_100D_%s_mesh%g', Geo, mesh);
    c_stop = 9;
    continuity = 6;
    x_velocity = 6;
    y_velocity = 6;
    z_velocity = 6;
    k = 6;
    epsilon = 6;
    F_iter = 1750;
    % Parâmetros para condição de parada do problema direto
    B{2,1} = sprintf('(cx-gui-do cx-set-text-entry "Select File*Text" "%s.\msh"',file);
    B{10,1} = sprintf('(cx-gui-do cx-set-toggle-button "Viscous Model*Frame1*Table1*Frame6(k-epsilon Model)*ToggleBox6(k-epsilon Model)*%s" #f)',model);
    B{11,1} = sprintf('(cx-gui-do cx-activate-item "Viscous Model*Frame1*Table1*Frame6(k-epsilon Model)*ToggleBox6(k-epsilon Model)*%s"',model);
    B{26,1} = sprintf('(cx-gui-do cx-set-real-entry-list "velocity-inlet-7-1*Frame4*Frame1(Momentum)*Frame1*Table1*Frame12*Table12*RealEntry2 (Velocity Magnitude)" '( %g))',F_inletV);
    B{40,1} = sprintf('(cx-gui-do cx-set-real-entry-list "Residual Monitors*Frame1*Table1*Frame2*Table2*Frame1(Equations)*Table1(Equations)*RealEntry11" '( %ge-0%g))', c_stop, continuity);
    B{41,1} = sprintf('(cx-gui-do cx-set-real-entry-list "Residual Monitors*Frame1*Table1*Frame2*Table2*Frame1(Equations)*Table1(Equations)*RealEntry17" '( %ge-0%g))', c_stop, x_velocity);
    B{42,1} = sprintf('(cx-gui-do cx-set-real-entry-list "Residual Monitors*Frame1*Table1*Frame2*Table2*Frame1(Equations)*Table1(Equations)*RealEntry23" '( %ge-0%g))', c_stop, y_velocity);
    B{43,1} = sprintf('(cx-gui-do cx-set-real-entry-list "Residual Monitors*Frame1*Table1*Frame2*Table2*Frame1(Equations)*Table1(Equations)*RealEntry29" '( %ge-0%g))', c_stop, z_velocity);
    B{44,1} = sprintf('(cx-gui-do cx-set-real-entry-list "Residual Monitors*Frame1*Table1*Frame2*Table2*Frame1(Equations)*Table1(Equations)*RealEntry35" '( %ge-0%g))', c_stop, k);
    B{45,1} = sprintf('(cx-gui-do cx-set-real-entry-list "Residual Monitors*Frame1*Table1*Frame2*Table2*Frame1(Equations)*Table1(Equations)*RealEntry41" '( %ge-0%g))', c_stop, epsilon);
    B{51,1} = sprintf('(cx-gui-do cx-set-integer-entry "Run Calculation*Frame1*Table1*IntegerEntry9(Number of Iterations)" %g)', F_iter);
    fclose(fileID);

    % Salvando o novo arquivo Inlet p/ aplicação no Fluent
    fileID = fopen(filename,'wt');

```

```
[nrows,ncols]=size(B);  
for i = 1:nrows  
    fprintf(fileID, '%s\n',B{i,1});  
end  
fclose(fileID);  
end
```

```

%% Script do Journal da Plataforma Ansys CFD-Post
% Responsável pelo passo a passo a ser realizado dentro do Ansys CFD-Post,
% editando as configurações para a coleta de dados das simulações do
problema direto.

```

```

function M_Journal_CFD (x,teta,linesamples)
    global diam
    %% CFD-POST Journal

    filename = sprintf('Journal_Session_Post.cse');
    fileID = fopen(filename,'rt+'); % Abre arquivo
    B = textscan(fileID,'%s','delimiter','\n');
    B = B{1,1};

    x1_point = x*diam;
    y1_point = -0.15;
    x2_point = (x+1)*diam;
    y2_point = 0.15;

    B{29,1} = sprintf('Point 1 = %g [m], %g [m], 0 [m]',x1_point,
y1_point);
    B{30,1} = sprintf('Point 2 = %g [m], %g [m], 0 [m]',x2_point,
y2_point);
    B{38,1} = sprintf('Rotation Angle = %g [degree]',teta);

    fclose(fileID);

    % Salvando o novo arquivo Inlet p/ aplica??o no CFD_Post
    fileID = fopen(filename,'wt');
    [nrows,ncols]=size(B);
    for i = 1:nrows
        fprintf(fileID,'%s\n',B{i,1});
    end

    %% CFD_POST Journal - Amostra Experimental

    filename = sprintf('Journal_Session_Post_Ramon.cse');
    fileID = fopen(filename,'rt+'); % Abre arquivo
    B = textscan(fileID,'%s','delimiter','\n');
    B = B{1,1};

    B{23,1} = sprintf('Line Samples = %g',linesamples);
    B{29,1} = sprintf('Point 1 = %g [m], %g [m], 0 [m]',x1_point,
y1_point);
    B{30,1} = sprintf('Point 2 = %g [m], %g [m], 0 [m]',x2_point,
y2_point);
    B{38,1} = sprintf('Rotation Angle = %g [degree]',teta);

    fclose(fileID);

    % Salvando o novo arquivo Inlet p/ aplica??o no CFD_Post
    fileID = fopen(filename,'wt');
    [nrows,ncols]=size(B);
    for i = 1:nrows
        fprintf(fileID,'%s\n',B{i,1});
    end
end

```

%% Script para cálculo da velocidade no caminho acústico considerando a  
 influência das componentes u,v,w

```
function [V_UFM_f] = M_Vel(Vel,teta)
    global L n alpha

%           ----- V_UFM (Martins) -----
%
%   alpha = pi/4; % Angulo do AP
%   teta = 0; % Angulo do AP em relacao ao eixo
%   n = 999;
%   diam = 0.3;
%   L = (diam^2 + diam^2)^0.5;

    V_UFM_f = zeros(1000,1);

    for p = 2:n
        delta_L = [Vel(p,4)-Vel(p-1,4),Vel(p,5)-Vel(p-1,5),Vel(p,6)-Vel(p-1,6)];
        dL = (delta_L(1,1)^2+delta_L(1,2)^2+delta_L(1,3)^2)^0.5;
        V_UFM_n = (dL/L)*(((Vel(p,1)+Vel(p-1,1))/2)...
            +(((Vel(p,2)+Vel(p-1,2))/2)*tan(alpha)*cos(teta))...
            +(((Vel(p,3)+Vel(p-1,3))/2)*tan(alpha)*sin(teta)));
        V_UFM_f(p-1,1) = V_UFM_n;
    end
end
```