

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

**FELIPE CARVALHO DA SILVA**

**ANALISE COMPARATIVA DE MEDIDOR DE VAZÃO EM FLARE  
POR TECNOLOGIA ÓTICA E PITOMETRIA UTILIZANDO TÚNEL  
DE VENTO**

VITÓRIA

2012

**FELIPE CARVALHO DA SILVA**

**ANALISE COMPARATIVA DE MEDIDOR DE VAZÃO EM  
FLARE POR TECNOLOGIA ÓTICA E PITOMETRIA  
UTILIZANDO TÚNEL DE VENTO**

Dissertação apresentada ao Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia Mecânica  
da Universidade Federal do Espírito Santo,  
como requisito parcial para obtenção do  
título de Mestre em Engenharia Mecânica.  
Orientador: Prof. Dr. Rogério Ramos

VITÓRIA  
2012

**FELIPE CARVALHO DA SILVA**

**ANALISE COMPARATIVA DE MEDIDOR DE VAZÃO EM FLARE  
POR TECNOLOGIA ÓTICA E PITOMETRIA UTILIZANDO  
TÚNEL DE VENTO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

**COMISSÃO EXAMINADORA**

---

Rogério Ramos, DSc. – Orientador  
Universidade Federal do Espírito Santo

---

Marcio Martins Soares, DSc.  
Universidade Federal do Espírito Santo

---

Márcio Coelho de Mattos, DSc.  
Universidade Federal do Espírito Santo

---

Bruno Venturini Loureiro, DSc.  
Faculdade do Centro Leste

## AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador, Rogério Ramos, que sempre mostrou dedicação ao estudo. Participou dos principais momentos, desde a concepção e a montagem dos experimentos até a escrita final, sempre me incentivando alcançar as conquistas.

Ao pesquisador Leonardo Pereira Bastos, pela atenção prestada à montagem da instrumentação do experimento.

Aos profissionais do corpo docente e discente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, pelo apoio e instrução prestados e pela disposição dos laboratórios e ferramentas.

A CAPES -Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior- pelo auxílio prestado.

A minha família, em especial, meu pai Selmo, minha mãe Lélia, minhas irmãs Christiane e Jade, pelo constante apoio e incentivo, de várias maneiras, a continuar e alcançar essa e tantas outras conquistas ao longo da vida. Aos meus tios e demais parentes que sempre se mostraram interessados por este trabalho de pesquisa e conseguiam me incentivar para alcançar mais esta conquista. À importante e necessária ajuda da minha irmã Chris e do meu concunhado Matt.

Aos grandes amigos e incentivadores que fiz no Rio de Janeiro, em especial aos Engenheiros MSc. Marco A. Godoy Jurumenha, Marcus Simões da Silva, Roberto Godinho Tavares, de Furnas Centrais Elétricas.

Aos amigos e colegas do PPGE que dividiram os momentos e dificuldades, ao longo dos períodos de estudos comigo, em especial, ao Elias Kfuri e Talita Barcellos.

Aos grandes amigos “concurseiros”, em especial Carlos Eduardo Mazzini, Phellipe Barcellos, Daniel Navarro, Juan Zattera, Alan Roberto Sucupira, Tiago Boiher, Lucas Magalhães e João Paulo Macieira, que foram exemplos de amizade e de superação.

Aos profissionais e “petroleiros” aos quais agradeço todos os dias por poder trabalhar junto: Sandro, Katiesca, Feijoli, Gilson, Paula, Cris, Pablo, Marcelo,

Ana Maria, Gabriel, Fabiano e tantos outros. Agradeço, em especial, ao incentivo dos atuais chefes Antovany J. Santos e Carlos Alberto C. Ferro, para o término do presente trabalho de pesquisa.

Aos amigos que fizeram parte das grandes conquistas desde a graduação na UFES até hoje, e a todos os amigos, parentes e colegas que contribuíram positivamente para que eu pudesse alcançar mais esta conquista.

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

---

S586a Silva, Felipe Carvalho da, 1986-  
Análise comparativa de medidor de vazão em flare por tecnologia ótica e pitometria utilizando túnel de vento / Felipe Carvalho da Silva. – 2012.  
154 f. : il.

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

1. Medidores de fluxo. 2. Pitot, Tubos de. 3. Detectores ópticos. 4. Doppler, Velocímetro por laser. 5. Pré-sal. I. Ramos, Rogério. II. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. III. Título.

CDU: 621

---

## RESUMO

Com as recentes descobertas da indústria petrolífera brasileira, relacionadas às reservas no pré-sal, a tecnologia de medição de vazão está sendo reavaliada, tendo em vista as grandes concentrações de CO<sub>2</sub> encontradas nessas reservas. A tecnologia de medição de vazão por velocimetria óptica (OFM) possui níveis de precisão semelhantes aos obtidos com os medidores de vazão utilizados atualmente. Essa tecnologia possui as características de independência com relação à composição química e às propriedades termodinâmicas dos gases. O presente trabalho se dedica ao estudo experimental de comparação das leituras de velocidade entre tubo de Pitot e medidor de vazão por velocimetria óptica. Para isso foi efetuada qualificação e quantificação dos perfis de velocidades em escoamento no túnel de vento, propondo metodologia de uso de retificadores de fluxo e amortecimento das leituras obtidas com o tubo de Pitot, e análises de leituras realizadas com o sensor óptico visando avaliar os efeitos de instalação do dispositivo nos resultados obtidos. Os resultados indicam que medidores de vazão ópticos por tempo de trânsito, para níveis médios e altos de velocidade, podem fornecer a leitura esperada da vazão mesmo estando num desalinhamento de  $\pm 5^\circ$ , apesar de constar no manual de instalação do fabricante garantia destes resultados do medidor quando num desalinhamento de, no máximo, até  $\pm 2^\circ$ . Com relação ao efeito intrusivo do sensor óptico nas leituras simultâneas com o tubo de Pitot, percebe-se, em geral, que a partir de aproximadamente  $Re > 2,05 \times 10^5$ , o efeito intrusivo desta influência foi suprimido por outros efeitos. Por fim, para uma devida caracterização do escoamento por meio de pitometria, a fim de efetuar a comparação com a medição *Laser*, e alcançar satisfatórios resultados com o tubo de Pitot, foi necessário fazer uso de dispositivos específicos como retificadores de fluxo e de amortecimento (*damping*) dos valores medidos.

Palavras-chave: Medidores de fluxo, Tubos de Pitot, Detectores ópticos, Velocímetro por laser Doppler, Pré-sal.

## ABSTRACT

With recent discoveries by the oil industry related to the reserves in Brazilian pre-salt, flow measurement technology is being re-evaluated in view of the large CO<sub>2</sub> concentrations found in these reserves. A technology that has accuracy levels similar to those obtained with flow meters currently used and also measures independent characteristics to the composition and thermodynamic properties of gases is optical flow measurement velocimetry (OFM). The present work is related to experimental study, comparison of the speed readings from Pitot tube flow meters and optical velocimetry. This experimental study consists of qualifying and quantifying the velocity profiles among the possible configurations of flow in the wind tunnel, proposing methodology using flow conditioners and damping of the readings obtained with the Pitot tube, and analysis of readings taken with the optical sensor to evaluate the device installation effects in the results. The results indicate that transit-time optical flow meters for medium to high speed levels, could provide read-cohesive flow even in a misalignment of up to  $\pm 5^\circ$ , although it appears in the installation manual of the manufacturer guarantees of results meter when a misalignment of at most up to  $\pm 2^\circ$ . Regarding the optical sensor intrusive effect in the readings simultaneous with the Pitot tube, it is perceived, in general, from approximately  $Re > 2,05 \times 10^5$ , the intrusive effect of this influence is suppressed by other effects. Finally, for a proper flow study through Pitometry in order to make the comparison with the optical flow metering and achieve satisfactory results with the Pitot tube, the use of specific devices of flow conditioning and damping of the measured values had to be made.

Keywords: Flow Meters, Pitot tubes, Optical detectors, Laser Doppler Speedometer, Pre-salt.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1 – ESQUEMA SIMPLIFICADO DE MEDIÇÕES OPERACIONAIS E FISCAIS NA INDÚSTRIA DO PETRÓLEO E GÁS.....	25
FIGURA 2.1 - LEITURAS TÍPICAS DE TEMPERATURA EM LINHAS DE FLARE (°C).....	31
FIGURA 2.2 - ESQUEMA CANÔNICO REPRESENTANDO CORTE CENTRAL A UM TUBO DE PITOT ESTÁTICO [12].....	34
FIGURA 2.3 - PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DA VELOCIMETRIA L2F [22].....	37
FIGURA 2.4. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DA VELOCIMETRIA LDV [24].....	38
FIGURA 2.5 - EXEMPLO DO RESULTADO DE UMA CALIBRAÇÃO PARA O L2F EM TUBO Ø 8”[30] .....	42
FIGURA 2.6 - EXEMPLOS DE RETIFICADORES DE FLUXO.[35].....	45
FIGURA 3.1 – (A) DETALHE DO PAINEL DE COMANDO DO PLC; (B) DETALHE DO DIFUSOR INSTALADO À MONTANTE DO ESCOAMENTO.....	47
FIGURA 3.2. ESQUEMA GERAL DE MONTAGEM DOS TUBOS.....	48
FIGURA 3.3 – (A) DETALHE DA JUNÇÃO DO ROTOR À TUBULAÇÃO DE 8”; (B) DETALHE DA TELA INSTALADA À JUSANTE DO ROTOR.....	48
FIGURA 3.4 – POSIÇÃO E DISTÂNCIAS DOS MEDIDORES AO LONGO DO TUBO DE 8”.....	50
FIGURA 3.5 – ALINHAMENTO PLANO DO DUTO: A) PROCEDIMENTO UTILIZADO; B) DISPOSITIVO UTILIZADO.....	51
FIGURA 3.6 – VISTA “AS BUILT” DOS RETIFICADORES DE FLUXO: A)	

EM VISTA FRONTAL; B) COM O DISPOSITIVO MONTADO.....	52
FIGURA 3.7 - METODOLOGIAS UTILIZADAS PARA O DAMPING: A) OBTENÇÃO DO COMPRIMENTO A PARTIR DE SUA MASSA; B) MONTAGEM FINAL DAS TUBULAÇÕES CAPILARES.....	53
FIGURA 3.8 - MONTAGEM DO TRANSDUTOR DE PRESSÃO E DO DAMPING.....	54
FIGURA 3.9 - CARRO DE FIXAÇÃO UTILIZADO NO LABORATÓRIO NO PASSADO[19] : A) CROQUI COM VISTAS FRONTAL E LATERAL; B) VISTA DA MONTAGEM EM OPERAÇÃO.....	55
FIGURA 3.10 - VISTA ISOMÉTRICA DO PROJETO DO CONJUNTO FIXADOR DO TUBO DE PITOT.....	56
FIGURA 3.11 - VISTA “AS BUILT” DO PROJETO DO CONJUNTO FIXADOR DO TUBO DE PITOT.....	56
FIGURA 3.12 – GEOMETRIA E DETALHES DE UM TUBO DE PITOT DE NARIZ ELIPSÓIDAL, CONFORME A ISO 3966 [39].....	58
FIGURA 3.13 - SENSOR ÓTICO PARA INSERÇÃO, Ø3/4 COM VÁLVULA[43].....	65
FIGURA 3.14 - INSERÇÃO DO SENSOR ÓTICO Ø3/4 EM TUBOS MAIORES QUE Ø6” [43].....	66
FIGURA 3.15 – TELA DE CONFIGURAÇÃO DOS PARÂMETROS DO MEDIDOR PHOTON <sup>R</sup> .....	66
FIGURA 3.16 – UNIDADE DE PROCESSAMENTO DE SINAIS À PROVA DE EXPLOSÃO.....	67
FIGURA 3.17 – DIAGRAMA DE BLOCOS REFERENTE AO CÁLCULO EFETUADO PELA UNIDADE DE PROCESSAMENTO.....	68

FIGURA 3.18 – MONITORAMENTO DOS DADOS DE SAÍDA DO PÓS PROCESSAMENTO.....	69
FIGURA 3.19 – FOTO DA INSTALAÇÃO DO SENSOR A LASER.....	71
FIGURA 3.20 – DETALHE DOS ACESSÓRIOS DE CONTROLE DE INSERÇÃO E ALINHAMENTO.....	71
FIGURA 4.1: PERFIS DE VELOCIDADE OBTIDOS COM O EXPERIMENTO 2 A: A)700RPM, B)950RPM, C) 1200RPM.....	75
FIGURA 4.2: DIFERENÇAS PERCENTUAIS DE PONTOS SIMÉTRICOS NO ESCOAMENTO NA MONTAGEM DO EXPERIMENTO EXP2 (SEM RETIFICADORES) EM: A)700RPM, B)950RPM, C) 1200RPM.....	76
FIGURA 4.3: PERFIS DE VELOCIDADE OBTIDOS COM O EXPERIMENTO EXP1 A: A)700RPM, B)950RPM, C) 1200RPM.....	77
FIGURA 4.4: DIFERENÇAS PERCENTUAIS DE PONTOS SIMÉTRICOS NO ESCOAMENTO DURANTE O EXPERIMENTO 1 (RETIFICADOR À JUSANTE) EM: A)700RPM, B)950RPM, C) 1200RPM.....	78
FIGURA 4.5: PERFIS DE VELOCIDADE OBTIDOS COM O EXPERIMENTO 5 (RETIFICADORES À MONTANTE E JUSANTE, SEM DAMPING) A: A)700RPM, B)950RPM, C) 1200RPM.....	80
FIGURA 4.6: DIFERENÇAS PERCENTUAIS DE PONTOS SIMÉTRICOS NO ESCOAMENTO DURANTE O EXPERIMENTO 5 EM: A)700RPM, B)950RPM, C) 1200RPM.....	81
FIGURA 4.7: PERFIS DE VELOCIDADE OBTIDOS COM O EXPERIMENTO 5 A: A)700RPM, B)950RPM.....	82
FIGURA 4.8: DIFERENÇAS PERCENTUAIS DE PONTOS SIMÉTRICOS NO ESCOAMENTO DURANTE O EXPERIMENTO 8 EM: A)700RPM, B)950RPM.....	82
FIGURA 4.9: ANÁLISE DO EFEITO DE INSTALAÇÃO DO DAMPING SEM	

RETIFICADORES DE FLUXO (EXP2) E (EXP3) A: A)700RPM, B)950RPM, C) 1200RPM.....	84
FIGURA 4.10: ANÁLISE DO EFEITO DE INSTALAÇÃO DO DAMPING COM RETIFICADOR À JUSANTE (EXP4) E (EXP1) A: A)700RPM, B)950RPM, C) 1200RPM.....	87
FIGURA 4.11: ANÁLISE DO EFEITO DE INSTALAÇÃO DO DAMPING COM RETIFICADOR À MONTANTE(EXP7) E (EXP8) A: A)700RPM, B)950RPM, C) 1200RPM.....	91
FIGURA 4.12: : ANÁLISE DO EFEITO DE INSTALAÇÃO DO DAMPING COM RETIFICADORES À MONTANTE E JUSANTE (EXP5) E (EXP6) A: A)700RPM, B)950RPM, C) 1200RPM.....	94
FIGURA 4.13: DESVIO PADRÃO MÉDIO EM TRÊS NÍVEIS DE VELOCI- DADES PARA AS CONFIGURAÇÕES REFERENTES AOS: A)EXP2 E EXP3, B) EXP1 E EXP4, C)EXP7 E EXP8, D) EXP5 E EXP6.....	97
FIGURA 4.14: VERIFICAÇÃO DAS CONFIGURAÇÕES DE EXPERIMENTOS COM RELAÇÃO AO PERFIL TEÓRICO DE HINZE [12] ESPERADO A: A)700RPM, B)950RPM, C) 1200RPM.....	99
FIGURA 4.15: PERFIS DE VELOCIDADES OBTIDOS NAS DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE DAMPING PARA: A)700RPM, B)950RPM, C) 1200RPM.....	102
FIGURA 4.16: VERIFICAÇÃO DO USO DE DAMPING PELA MÉDIA E PELA PRECISÃO.....	103
FIGURA 4.17: PERFIS DE VELOCIDADES OBTIDOS NOS EXPERIMENTOS 6C, 6E E 6F, PARA: A)700RPM, B)950RPM, C) 1200RPM.....	104
FIGURA 4.18: ASSIMETRIAS PERCENTUAIS OBTIDAS NOS EXPERIMENTOS 6C, 6E E 6F, PARA: A)700RPM, B)950RPM, C) 1200RPM.....	105

FIGURA 4.19: COMPARAÇÃO DOS PERFIS DE VELOCIDADES OBTIDOS NOS EXPERIMENTOS 6C, 6E E 6F COM OS PERFIS TEÓRICOS, PARA: A)700RPM, B)950RPM, C) 1200RPM.....	107
FIGURA 4.20: DIFERENÇAS PERCENTUAIS DAS VELOCIDADES LOCAIS PARA OS PERFIS 6C, 6E E 6F EM RELAÇÃO AO PERFIL TEÓRICO DE HINZE [39] EM: A)700RPM, B)950RPM, C) 1200RPM.....	112
FIGURA 4.21:RAMPAS DAS LEITURAS DE MEDIÇÕES DE VELOCIDADES SIMULTÂNEAS COM OS DIFERENTES MEDIDORES.....	114
FIGURA 4.22:RAMPAS DAS LEITURAS DE MEDIÇÕES DE VAZÃO SIMULTÂNEAS COM OS DIFERENTES MEDIDORES.....	116
FIGURA 4.23:RAMPAS DAS LEITURAS DE MEDIÇÕES DE VAZÃO SIMULTÂNEAS COM OS DIFERENTES MEDIDORES CONSIDERANDO AS DUAS METODOLOGIAS.....	117
FIGURA 4.24: LEITURA DA VELOCIDADE MÉDIA COM O SENSOR ÓPTICO EM 4 DIFERENTES POSIÇÕES DE INSERÇÃO DO SENSOR, EM BAIXO NÍVEL DE VELOCIDADE (700 RPM) .....	118
FIGURA 4.25: LEITURA DA VELOCIDADE MÉDIA COM O SENSOR ÓPTICO EM 4 DIFERENTES POSIÇÕES DE INSERÇÃO DO SENSOR, EM MÉDIO NÍVEL DE VELOCIDADE (950 RPM).....	118
FIGURA 4.26: LEITURA DA VELOCIDADE MÉDIA COM O SENSOR ÓPTICO EM 4 DIFERENTES POSIÇÕES DE INSERÇÃO DO SENSOR, EM ALTO NÍVEL DE VELOCIDADE (1200 RPM).....	119
FIGURA 4.27: LEITURA DA VELOCIDADE MÉDIA E PARTÍCULAS COM O SENSOR ÓPTICO CONSIDERANDO 5 DIFERENTES ANGULAÇÕES DO SENSOR, EM BAIXO NÍVEL DE VELOCIDADE (700 RPM) .....	120
FIGURA 4.28: LEITURA DA VELOCIDADE MÉDIA E PARTÍCULAS COM O SENSOR ÓPTICO CONSIDERANDO 5 DIFERENTES ANGULAÇÕES	

DO SENSOR, EM MÉDIO NÍVEL DE VELOCIDADE (950 RPM).....	121
FIGURA 4.29: LEITURA DA VELOCIDADE MÉDIA E PARTÍCULAS COM O SENSOR ÓPTICO CONSIDERANDO 5 DIFERENTES ANGULAÇÕES DO SENSOR, EM ALTO NÍVEL DE VELOCIDADE (1200 RPM) .....	121
FIGURA 4.30: VERIFICAÇÃO DA PRECISÃO DO OFM E COMPARAÇÃO COM TRABALHO CIENTÍFICO [30].....	123
FIGURA 4.31: EFEITOS DE INSTALAÇÃO NA MEDIÇÃO DE VAZÃO POR DISPERSÃO A LASER.....	124
FIGURA 4.32 - COMPARAÇÃO COMPLETA DOS PERFIS DE VELOCIDADE RELATIVOS AOS EXPERIMENTOS SEGUINDO A CONFIGURAÇÃO 6 A: A) 700RPM, B)950 RPM, C)1200 RPM.....	126
FIG. A.1 – SIMULAÇÃO DE ARRANJO DE TUBULAÇÕES VISANDO O MÁXIMO DE PREENCHIMENTO DA SECÇÃO TRANSVERSAL PARA TUBOS DE 25MM.....	144
FIG. A.2 – SIMULAÇÃO DE ARRANJO DE TUBULAÇÕES VISANDO O MÁXIMO DE PREENCHIMENTO DA SECÇÃO TRANSVERSAL PARA TUBOS DE 32MM.....	144
FIG. A.3 – PROJETO DE ARRANJO DE TUBULAÇÕES PARA CONSTRUÇÃO DE RETIFICADOR DE FLUXO TIPO C ADAPTADO PARA ARRANJO COLMÉIA.....	146
FIG A4- A) FOTO SUPERIOR “AS BUILT” DO PROJETO CONSTRUÍDO. B) FOTO LATERAL “AS BUILT” DO PROJETO CONSTRUÍDO.....	147
FIG. B.1 – ESQUEMA GEOMÉTRICO BIDIMENSIONAL DO SUPORTE SOBRE A SECÇÃO DE MEDIÇÃO.....	150
FIG. B.2 – CROQUI DA VISTA SUPERIOR DO BRAÇO DE FIXAÇÃO DA HASTE DO SENSOR, MONTADO NO CONJUNTO ELEVATÓRIO....	152

FIG. B.3 – CROQUI DA VISTA LATERAL DOS COMPONENTES ELEVATÓRIOS DA HASTE DO SENSOR.....	153
FIG. B.4 – CROQUI DA VISTA ISOMÉTRICA DO CONJUNTO FIXADOR E ELEVATÓRIO DA HASTE DO SENSOR PRESTES A SER MONTADO.....	154
FIGURA B.5 – VISTA “AS BUILT” DO PROJETO DO CONJUNTO FIXADOR DO TUBO DE PITOT.....	154

## LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 – QUADRO COMPARATIVO DOS MEDIDORES DE VAZÃO POR TEMPO DE TRÂNSITO (ADAPTADO DE [11][32][33]).....	43
TABELA 3.1 - DIMENSÕES E PESOS DA TUBULAÇÃO UTILIZADA.....	47
TABELA 3.2 – MATRIZ DE EXPERIMENTOS REALIZADOS COM O PITOT: CARACTERIZAÇÃO DO PERFIL DE VELOCIDADES, EM TRÊS PATAMARES DE VELOCIDADE DO ROTOR (700,950 E 1200 RPM).....	49
TABELA 3.3 - MEDIDAS GEOMÉTRICAS DO TUBO DE PITOT ITMP 120....	58
TABELA 3.4 - VERIFICAÇÃO DE CONFORMIDADE GEOMÉTRICA DO TUBO DE PITOT ITMP 120 DA KIMO, À ISO 3966/2008.....	59
TABELA 4.1: ROTAÇÕES DO MOTOR UTILIZADAS EM TODOS OS EXPERIMENTOS.....	72
TABELA 4.2 – COMPARAÇÃO DE METODOLOGIA DE CÁLCULO: FABRICANTE X NORMA.....	74
TABELA 4.3: QUADRO-RESUMO COM OS VALORES CARACTERÍSTICOS PARA OS EXPERIMENTOS NAS CONFIGURAÇÕES SEM <i>DAMPING</i> .....	83
TABELA 4.4 - ANÁLISE DO EFEITO DE INSTALAÇÃO DO <i>DAMPING</i> SEM RETIFICADORES DE FLUXO - EXP2 & EXP3 – VELOCIDADES LOCAIS(M/S).....	85
TABELA 4.5 - ANÁLISE DO EFEITO DE INSTALAÇÃO DO <i>DAMPING</i> SEM RETIFICADORES DE FLUXO - EXP2 & EXP3 - PERCENTUAIS DA VELOCIDADES LOCAIS (M/S) - EXP2 & EXP3.....	86
TABELA 4.6 - ANÁLISE DO EFEITO DE INSTALAÇÃO DO <i>DAMPING</i> COM RETIFICADOR À JUSANTE - EXP1 & EXP4 - VELOCIDADES LOCAIS (M/S) - EXP1 & EXP4.....	89
TABELA 4.7 – ANÁLISE DO EFEITO DE INSTALAÇÃO DO <i>DAMPING</i> COM RETIFICADOR À JUSANTE - EXP1 & EXP4 - VARIAÇÃO DAS VELOCIDADES LOCAIS (M/S) - EXP1 & EXP4.....	90
TABELA 4.8 - ANÁLISE DO EFEITO DE INSTALAÇÃO DO <i>DAMPING</i> COM RETIFICADOR À MONTANTE – EXP7 & EXP8 - VELOCIDADES	

LOCAIS (M/S) – EXP7 & EXP8.....	92
TABELA 4.9 – ANÁLISE DO EFEITO DE INSTALAÇÃO DO <i>DAMPING</i> COM RETIFICADOR À MONTANTE – EXP7 & EXP8 - VARIAÇÃO DAS VELOCIDADES LOCAIS (M/S) – EXP7 & EXP8.....	93
TABELA 4.10 - ANÁLISE DO EFEITO DE INSTALAÇÃO DO <i>DAMPING</i> COM RETIFICADORES À MONTANTE E JUSANTE EXP5 & EXP6 – VELOCIDADES LOCAIS (M/S) – EXP5 & EXP6.....	95
TABELA 4.11 – ANÁLISE DO EFEITO DE INSTALAÇÃO DO <i>DAMPING</i> COM RETIFICADORES À MONTANTE E JUSANTE EXP5 & EXP6 – VARIAÇÃO DAS VELOCIDADES LOCAIS (M/S) – EXP5 & EXP6.....	96
TABELA 4.12 - QUADRO-RESUMO COM NÚMERO DE REYNOLDS E DESVIO-PADRÃO NOS EXPERIMENTOS.....	98
TABELA 4.13 – VAZÃO OBTIDA (EXP6) E VAZÃO TEÓRICA ESPERADA PARA O MESMO EXPERIMENTO.....	100
TABELA 4.14 – VELOCIDADES LOCAIS PARA A CONFIGURAÇÃO 6 (EXP6).....	108
TABELA 4.15 – COMPARAÇÃO DAS VELOCIDADES LOCAIS PARA A CONFIGURAÇÃO 6 (EXP6).....	109
TABELA 4.16 – VAZÃO VOLUMÉTRICA TEÓRICA X VAZÃO VOLUMÉTRICA MEDIDA (6C, 6E E 6F).....	113
TABELA 4.17: VELOCIDADES MÉDIAS DE ESCOAMENTO NOS CINCO PATAMARES.....	115
TABELA 4.18 – COMPARAÇÃO DAS VAZÕES MEDIDAS COM OS DIFERENTES MEDIDORES CONSIDERANDO OU NÃO O DESCONTO NA ÁREA TRANSVERSAL.....	117
TABELA 4.19 – MEDIÇÕES COM ERRO DE INSTALAÇÃO DO OFM.....	119
TABELA 4.20 – MEDIÇÕES OFM.....	122
TABELA 4.21 – VALORES OBSERVADOS NA FIGURA 4.31.....	124
TABELA 4.22 - COMPARATIVO DAS VELOCIDADES LOCAIS A 700 RPM ENTRE OS PERFIS 6C E 6I.....	127
TABELA 4.23 - COMPARATIVO DAS VELOCIDADES LOCAIS A 950RPM ENTRE OS PERFIS 6C E 6I.....	127
TABELA 4.24 –COMPARATIVO DAS VELOCIDADES LOCAIS A 1200 RPM	

ENTRE OS PERFIS 6C E 6I.....	128
TABELA A.1 - TIPOS DE RETIFICADORES DE FLUXO	
APRESENTADOS.....	142

## LISTA DE SÍMBOLOS

$a$	Velocidade termodinâmica do som no escoamento [m/s]
$d_i$	Diâmetro interno do orifício de tomada de pressão total [m];
$D$	Diâmetro interno do duto [m]
$f_s$	Frequência de amostragem [Hz]
$Ma$	Número de Mach
$N$	Número de partículas efetivamente atravessando o feixe de <i>Laser</i>
$P$	Pressão absoluta do gás [Pa]
$P_0$	Pressão barométrica [Pa]
$\Delta p$	Pressão diferencial medida pelo Pitot [Pa]
$r$	Coordenada radial [m]
$R$	Raio interno da tubulação [m]
$Re$	Número de Reynolds
$S$	Distância entre os feixes <i>laser</i>
$T$	Temperatura do gás [K]
$Tu$	Turbulência
<b><math>S</math></b>	Espaçamento [mm]
<b><math>\Delta S</math></b>	Incerteza de espaçamento [ $\mu\text{m}$ ]
$V$	Velocidade média do escoamento [m/s]
$v_0$	Velocidade máxima do escoamento [m/s]
$V_{min}$	Velocidade mínima operacional do medidor [m/s]
$V_{max}$	Velocidade máxima operacional do medidor [m/s]

## Letras gregas

$\alpha$	Coeficiente de descarga do tubo de Pitot
$\nu$	Viscosidade dinâmica do fluido [ $m^2/s$ ]
$\rho$	Massa específica do fluido utilizado [ $kg/m^3$ ]
$\mu$	Viscosidade dinâmica do fluido [Pa.s]
$\bar{\mu}$	Média
$\sigma$	Desvio padrão
$\lambda_m$	Densidade linear mássica
$\sigma_d$	Desvio-padrão na velocidade devido a erros no espaçamento dos feixes
$\sigma_t$	Desvio-padrão na velocidade devido a erros no tempo de lapso
$\sigma_v$	Incerteza da velocidade
$\tau$	Tempo de lapso ou Intervalo de tempo entre estes pulsos [s]

## LISTA DE SIGLAS

AGA	American Gas Association
AMCA	Air Movement and Control Association
ANP	Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
ASME	American Society of Mechanical Engineers
CEESI	Colorado Engineering Experiment Station
CPVC	Chlorinated Polyvinyl Chloride
FDIS	Final Draft International Standard
HWA	Hot Wire Anemometry
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
ISO	International Organization for Standardization
IRAM	Instituto Argentino de Normalización y Certificación
LabMaqFlu	Laboratório de Máquinas de Fluxo da Ufes
LDV	Laser Doppler Velocimeters
L2F	Laser-Two-Focus
OFM	Optical Flow Meters
PIV	Particle Image Velocimetry
PPGEM	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
PVC	Polyvinyl chloride
SNR	Signal-to-Noise Ratio
UFES	Universidade Federal do Espírito Santo

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	24
1.1 MOTIVAÇÃO.....	24
1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO.....	27
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA DA MEDIÇÃO DE VAZÃO.....	28
2.1 SOBRE O GÁS DE QUEIMADORES OU GÁS DE <i>FLARE</i> .....	29
2.2 SIMILARIDADE ENTRE O ESCOAMENTO NO TÚNEL DE VENTO E <i>FLARE</i> .....	30
2.3 FUNDAMENTOS DA MEDIÇÃO DE VAZÃO POR TUBO DE PITOT .....	33
2.4 FUNDAMENTOS DA MEDIÇÃO DE VAZÃO POR DISPERSÃO A LASER .....	36
2.4.1 Precisão do Método L2F.....	39
2.4.2 Faixa de Medição (Rangeabilidade).....	40
2.5 USO DE CONDICIONADORES DE FLUXO EM MEDIÇÃO DE VAZÃO.....	44
3 MONTAGENS EXPERIMENTAIS.....	46
3.1 CONFIGURAÇÃO DO TÚNEL DE VENTO.....	46
3.2 DESCRIÇÃO DA MONTAGEM DO EXPERIMENTO NO TÚNEL DE VENTO.....	49
3.3 APARATO EXPERIMENTAL.....	51
3.4 TUBO DE PITOT .....	57
3.4.1 Justificativa da Utilização e Metodologia empregada com o Tubo de Pitot .....	59
3.5 – O MEDIDOR DE VAZÃO POR DISPERSÃO A LASER TIPO L2F .....	65

3.5.1. Unidade de processamento de sinais.....	67
3.5.2 Cabo de fibra ótica.....	69
3.5.3 Metodologia empregada com o L2F .....	70
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>72</b>
4.1 CARACTERIZAÇÃO DO ESCOAMENTO NO TÚNEL DE VENTO..	72
4.1.1 Validação da Metodologia de Cálculo das Velocidades Locais do Tubo de Pitot.....	73
4.1.2 Caracterização do Perfil de Velocidades Com e Sem Retificador de fluxo.....	75
4.1.3 Caracterização do Perfil de Velocidade Com Damping.....	83
4.1.4 Escolha e Verificação do Melhor Perfil de Velocidades obtido para o escoamento no Túnel Considerando os 3 patamares de velocidades do roto.....	104
4.1.5 Verificação da premissa de Escoamento Completamente desenvolvido.....	109
4.2 RESULTADOS DA MEDIÇÃO DA VAZÃO COM O MEDIDOR DE DISPERSÃO A LASER .....	116
4.2.1 - Influência da inserção do Medidor.....	121
4.2.2 Influência do Ângulo de Medição.....	123
4.3 Influência da Inserção do Medidor De Vazão Ótico no Perfil Levantado pelo Tubo de Pitot à 21D à Jusante do Medidor L2f.....	128
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E PROPOSIÇÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>132</b>
<b>6 REFERÊNCIAS.....</b>	<b>136</b>
APÊNDICE A- Memorial de Cálculo dos Retificadores de Fluxo.....	141
APÊNDICE B- Projeto do Suporte do Medidor tubo de Pitot.....	151

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 MOTIVAÇÃO

Entre 1953 a 1997, a exploração e produção (E&P) de petróleo e gás natural no Brasil foi realizada por meio de regime de monopólio (Lei 2.004, 1953) [1]. Ao longo deste período, as medições quantitativas da matéria-prima dos processos operacionais eram uma atividade secundária, pois todo processo era dominado por uma só empresa, que era responsável pela medição, arrecadação e distribuição de tributos ao Estado. Nesta época surgiu a famosa peça de marketing: “Do Poço ao Posto”.

No entanto, o monopólio sobre hidrocarbonetos foi revogado com o advento da Lei do Petróleo (Lei 9.478, 1997) [2] e as concessões de exploração, assim como os processos não são mais dominados por uma só empresa, o que evidenciou e reforçou a importância, tanto operacional quanto financeiramente e de maneira fiscal (relacionada também a arrecadação de royalties dos governos e municípios), da medição correta dos volumes e massas de matéria-prima na cadeia de produção do petróleo. Na Figura 1.1 tem-se um esquema simplificado evidenciando a importância da medição da vazão mássica dos produtos nos processos da indústria do petróleo e gás. Tais medições são cruciais para o correto balanço de massa dos principais componentes extraídos do reservatório, no reaproveitamento de parte destes, no caso da reinjeção e nas medições fiscais e de receita durante a comercialização dos produtos e subprodutos do petróleo.

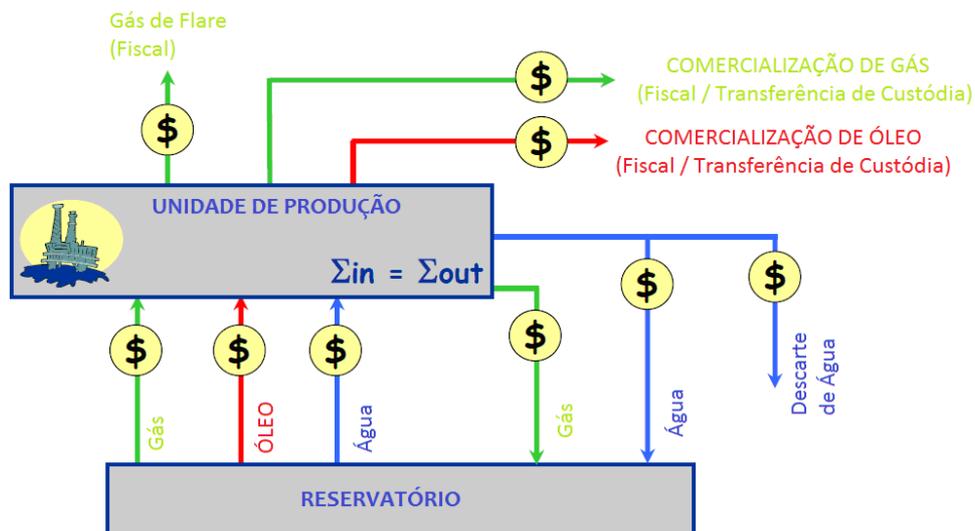


Figura 1.1 – Esquema simplificado de medições operacionais e fiscais na indústria do petróleo e gás.

Essa conjuntura só foi alterada no ano de 2000, com a publicação da Portaria Conjunta ANP/INMETRO N° 1 [3]. Este documento regula tecnicamente as condições, os procedimentos e os requisitos mínimos de sistemas de medição de vazão de petróleo e gás natural, visando resultados precisos e padronizados, inclusive identificando e classificando medidor de vazão operacional e medidor fiscal. Dentre os objetivos da portaria estão:

1. Regulamentação da medição de petróleo e gás natural na área de exploração, produção e de transporte;
2. Aprovar o Regulamento Técnico de Medição de Petróleo e Gás Natural;
3. Estabelecer os requisitos mínimos para os sistemas de medição de petróleo e gás;
4. Definir: medidores, calibração e incertezas;

Por outro lado, uma das técnicas de medição de vazão de gás natural, ou “gás de *flare*”, por exemplo, é a tecnologia de medição ultrassônica, que tem sido estudada e utilizada na indústria de petróleo e gás, há alguns anos, por apresentar a vantagem de ser um método não intrusivo, o que, além de gerar menor perturbação no escoamento medido, por também não possuir partes móveis, torna o processo de medição mais robusto.

No entanto, com os recentes acontecimentos da indústria petrolífera brasileira relacionados às reservas no pré-sal, esta tecnologia de medição de vazão está sendo reavaliada, tendo em vista as grandes concentrações de CO<sub>2</sub> encontradas nessas reservas e que é reconhecidamente uma grande atenuante das ondas ultrassônicas.

O conjunto de campos petrolíferos do pré-sal descobertos no Brasil a partir do ano de 2006, se estende entre o litoral dos estados do Espírito Santo até Santa Catarina. Apenas com a descoberta dos três primeiros campos do pré-sal, Tupi, Iara e Parque das Baleias, as reservas brasileiras comprovadas, que eram de 14 bilhões de barris, aumentaram para 33 bilhões. Além destas, existem reservas possíveis e prováveis de 50 a 100 bilhões de barris [4].

Não obstante a esse aumento considerável de volume em reservas petrolíferas e produção de petróleo advindo do pré-sal no Brasil, observou-se que a partir de agosto de 2011 foi iniciada uma experiência pioneira de captura e armazenamento de carbono em águas profundas, que consiste em absorver grandes quantidades de CO<sub>2</sub> existentes no pré-sal.

Considerando que a grande concentração de CO<sub>2</sub> associada ao óleo é um dos grandes desafios daquela província, por ser altamente corrosiva e formar ácidos indesejáveis, precisa ser tratada em estruturas feitas com materiais especiais e superresistentes. Além do CO<sub>2</sub>, há nestas reservas do pré-sal alto índice de salinidade da água associada ao óleo e ao gás, além da presença considerável de contaminantes, por exemplo, o Enxofre. [5]

Outro fator importante é que, em 2010, produtoras de óleo e gás no país, por meio de um termo de ajuste com a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Bio-Combustíveis (ANP), foram obrigadas a reduzir mais de 50% a queima atual de gás natural em suas plataformas até o ano de 2015. [6]

Todos esses fatores recentes evidenciaram a necessidade de pesquisa em estudo científico e aplicação de nova tecnologia de medição de vazão de gás natural.

Uma nova tecnologia, que possui níveis de incerteza semelhantes aos obtidos com os medidores de vazão utilizados atualmente e que tem as características de independência, com relação à composição e propriedades

termodinâmicas dos gases é a tecnologia de medição de vazão por velocimetria óptica.

## 1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

Assim, propõe-se no presente trabalho o estudo experimental, de comparação das leituras de velocidade entre tubo de Pitot e medidor de vazão por velocimetria óptica, com os seguintes objetivos secundários:

- a) Usando a técnica de pitometria, qualificar e quantificar os perfis de velocidades dentre as configurações possíveis de escoamento, determinando a configuração a ser seguida como referência para comparação com resultados de velocidade e vazão obtidos com o medidor óptico de vazão;
- b) Analisar os efeitos de metodologia de uso de retificadores de fluxo, analisando sua influência no perfil de velocidade esperado;
- c) Analisar os efeitos de metodologia de amortecimento nas leituras de velocidades locais (“damping”) utilizando tubos capilares, de maneira a diminuir variabilidade das leituras dos perfis de velocidade obtidos com o Tubo de Pitot, sem prejudicar os valores absolutos esperados;
- d) Validar a premissa de escoamento turbulento e completamente desenvolvido nas secções transversais de medição em túnel de vento;
- e) Avaliar os princípios de funcionamento do medidor de vazão por velocimetria óptica, operando em condições de flare;
- f) Comparar a dispersão das medições simultâneas com o tubo de Pitot e o medidor óptico de vazão, assim como a interferência no perfil de velocidades esperada devido à presença intrusiva do sensor óptico no escoamento;
- g) Avaliar os efeitos de inserção e angulação do sensor óptico;
- h) Avaliar o comportamento das medições (média e variabilidade);

- i) Avaliar a incerteza global da medição nestas situações, identificando os erros encontrados.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA DA MEDIÇÃO DE VAZÃO

No começo da revisão bibliográfica, temos uma descrição do que é gás de *Flare*, dados sobre sua operação, assim como os desafios tecnológicos associados a este.

Num segundo momento são descritos os conceitos que reforçam as premissas de utilização de ar ambiente como fluido de trabalho por se comportar de forma similar ao escoamento em gás de *flare*, citando as semelhanças hidrodinâmicas existentes. Posteriormente, é apresentado o histórico relacionado ao tubo de Pitot na medição de vazão, o seu funcionamento geral é descrito e especificamente aquele utilizado neste trabalho. Também é relacionado à normatização vigente e defendido, com base no estado da arte, o seu uso como parâmetro de comparação com as demais tecnologias de medição.

Depois, são apresentados os fundamentos da medição de vazão por dispersão a laser, de maneira a explicitar os principais tipos existentes, seu princípio de funcionamento, apresentar sua estimativa de incerteza e precisão, faixa de operação e apresentar seus principais aspectos tecnológicos comparando com a principal tecnologia de medição de gás de *flare* utilizada atualmente: o Medidor Ultrassônico.

A última parte da revisão bibliográfica cita os principais conceitos relacionados ao uso dos retificadores de fluxo, com relação ao estado da arte na comunidade científica e com relação a normatização vigente.

## 2.1 SOBRE O GÁS DE QUEIMADORES OU GÁS DE *FLARE*

Queimadores de gás (Gás Flare) é um dispositivo de combustão a gás utilizado em instalações industriais, tais como refinarias de petróleo, indústrias químicas, fábricas de processamento de gás natural, bem como em locais de produção de petróleo ou gás como poços de petróleo, poços de gás e petróleo offshore.

Nas plantas industriais, labaredas são utilizadas principalmente para queimar o gás inflamável libertado por válvulas de alívio de pressão durante as paradas da planta. Os queimadores também são frequentemente utilizados para a combustão planejada de gases durante períodos relativamente curtos.[4]

Na maioria dos casos, quando óleo de petróleo bruto é extraído e produzido a partir de poços de petróleo em terra ou de poços *offshore*, gás natural bruto associado com o óleo é trazido à superfície também. Em regiões do mundo sem infraestrutura de transporte de gases, grandes quantidades de gás associado são comumente queimados como resíduos ou gás inutilizável. A queima de gás associado pode ocorrer no topo de uma pilha de queima vertical ou pode ocorrer em um alargamento ao nível do solo. Essa queima constitui um perigo para a saúde humana e também contribui significativamente para as emissões mundiais de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>).

A quantidade de queima de gás associado aos locais de perfuração de petróleo é uma fonte significativa de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Cerca de  $4,0 \times 10^8$  toneladas de Dióxido de Carbono são emitidas anualmente desta forma e isso equivale a cerca de 1,2% das emissões mundiais de dióxido de carbono. A medição de vazão destes queimadores permite estimar as emissões de gases-estufa, como metano e dióxido de carbono contribuindo para emitir os relatórios ambientais obrigatórios e evitar penalidades ambientais.

Algumas das condições críticas que caracterizam estes queimadores, são que os gases de queima escoam tipicamente a baixa pressão (aproximadamente a 0,7 bar) e que apresentam níveis de impurezas consideráveis [7]. Tais condições geralmente refletem em baixas vazões, o que

dificulta o uso de medidores de vazão mais sofisticados. Outros grandes desafios na medição de vazão de gás de *Flare* é a possível presença de contaminantes agressivos ( $H_2S$ , HF e CO) e a alta faixa de operação de medição necessária (cerca de 4000:1).

## **2.2 SIMILARIDADE ENTRE O ESCOAMENTO NO TÚNEL DE VENTO E FLARE**

A técnica de similaridade de escoamentos ou semelhança dinâmica é amplamente utilizada para testes de equipamentos sob condições controladas, mesmo em equipamentos que operam em condições muito adversas dos escoamentos em túnel de vento.

Assim, grandes estruturas diferentes como edifícios, aviões, navios, submarinos ou plataformas off-shore podem ser simuladas através de protótipos em escala, testados em túnel de vento ou canais hidráulicos e os resultados obtidos podem ser extrapolados para a escala real através de técnicas de similaridade entre os escoamentos reais e os simulados.

A similaridade ou semelhança dinâmica entre dois escoamentos (*flare* e o túnel de vento neste caso) implica, principalmente, em [8]:

- 1) Semelhança Geométrica
- 2) Semelhança Térmica
- 3) Semelhança Cinética
- 4) Semelhança Dinâmica

Embora os diâmetros dos tubos de polipropileno do túnel de vento não coincidirem exatamente com as dimensões dos tubos de *flare*, essa diferença não representa nenhuma restrição na proposta de estudo por similaridade. Na realidade, o termo “*semelhança geométrica*” se refere a:

- i) Geometria da seção dos tubos (circular nos dois casos);
- ii) Razão entre comprimento e diâmetro que influencia no comprimento de desenvolvimento, o qual é expresso em número de diâmetros (como 10D,

20D...) e, nesse caso, os tubos de polipropileno do túnel de vento atendem plenamente a aplicação;

iii) Rugosidade relativa das paredes: Os tubos de polipropileno do túnel de vento também atendem à aplicação vista a baixa rugosidade obtida com seu acabamento interno.

Assim como no caso da semelhança geométrica, a exigência de semelhança térmica não significa que as temperaturas no túnel de vento devam ser idênticas às temperaturas vigentes em *flare*. A semelhança térmica indica que a distribuição de temperaturas ao longo dos dutos de escoamento será semelhante, ou seja, os pontos de aquecimento e resfriamento devem ser posicionados analogamente.

Assim, como será considerada distribuição homogênea da temperatura tanto no túnel de vento quanto em *flare*, o critério de semelhança será respeitado. Na Figura 2.1, há algumas das leituras de temperaturas de linhas de *flare* em diversas plataformas instaladas na costa brasileira.

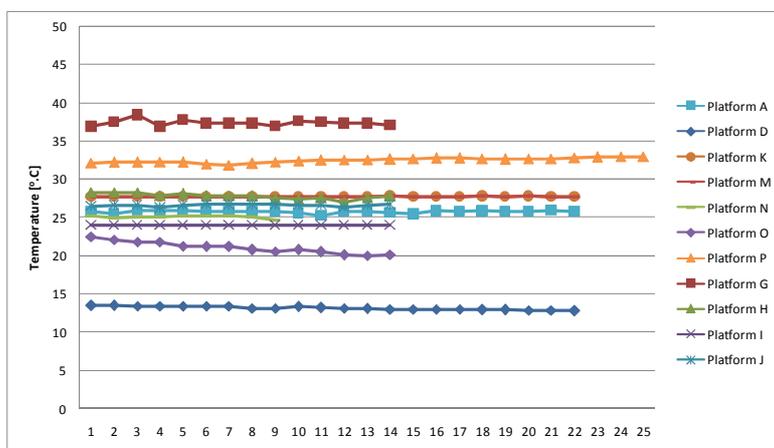


Figura 2.1- Leituras típicas de Temperatura em linhas de *flare* (°C) [9]

A semelhança cinética implica que os escoamentos típicos em *flare* e túnel de vento apresentam a mesma distribuição de velocidades. Assim, a forma mais natural de se obter essa semelhança é conseguir que o escoamento seja completamente desenvolvido em ambos os casos.

Obviamente, é difícil de imaginar que o escoamento em *flare* seja completamente desenvolvido em todos os casos e situações, mas essa é uma

condição que deve ser almejada em túnel de vento e que pode ser efetivamente aferida através de diversas medições distribuídas ao longo dos comprimentos dos tubos e comparando-as entre as posições. Também é possível analisar se a condição de escoamento é atingida na posição da seção de medição através de simulações computacionais, utilizando-se de *softwares* específicos que utilizem modelagens de fluidodinâmica computacional.

Por sua vez, a semelhança dinâmica implica em se comparar os efeitos das propriedades fluidodinâmicas dos escoamentos em *flare* e túnel de vento, principalmente no que se refere à compressibilidade dos escoamentos e as relações entre efeitos viscosos e de inércia.

A semelhança dinâmica entre um *flare* e o túnel de vento é obtida por análise dimensional utilizando-se o Teorema de *Buckingham-Pi* e implica na igualdade dos seguintes parâmetros adimensionais:

a) Número de Mach:  $Ma = \frac{V}{a}$

b) Número de Reynolds:  $Re = \frac{V \cdot D}{\nu}$

c) Trecho reto para desenvolvimento do escoamento:  $L_{cd} = \frac{L}{D}$

Onde:

$V$  = Velocidade média do escoamento [m/s];

$a$  = é a velocidade termodinâmica do som no escoamento [m/s];

$D$  = Diâmetro interno da tubulação [m];

$\nu$  = Viscosidade dinâmica do fluido [m<sup>2</sup>/s].

Para se obter a similaridade dinâmica entre os escoamentos em *flare* e no túnel de vento, a condição de  $Ma < 0,3$  indica que ambos escoamentos são considerados incompressíveis, isto é, as propriedades termodinâmicas de estagnação são as mesmas. Ainda é necessário que os números de Reynolds sejam equivalentes, ou seja:  $Re_{flare} = Re_{túnel}$ .

A utilização do modelo de gás perfeito para avaliar as propriedades termofísicas de gás natural em *flare* foi analisada por Salgado e Ramos [9] que em seu trabalho defenderam essa premissa ao comparar as propriedades termodinâmicas simuladas pela “AGA report n.º10” [10] às propriedades obtidas através da abordagem de aproximação por gases perfeitos. Segundo os autores, quanto maior a concentração de metano no gás de *flare*, menor será a diferença nestas propriedades, estando então com o comportamento mais próximo aos gases perfeitos à  $T=20^{\circ}\text{C}$  e  $P=1\text{ barA}$ , que são condições operacionais típicas em *flare*.

### 2.3 FUNDAMENTOS DA MEDIÇÃO DE VAZÃO POR TUBO DE PITOT

Henri Pitot (1695-1771), engenheiro francês especializado em hidráulica, apresentou um instrumento utilizado para medir a velocidade da água, que ficou conhecido como tubo de Pitot. Este instrumento se aprimorou e hoje é usado para medir velocidade, a partir de pressão diferencial, e vazão de fluidos em diversas áreas da tecnologia, como na hidráulica, hidrologia, aeronáutica e na indústria de petróleo e gás.

Henri Pitot, na época do desenvolvimento do “tubo de Pitot”, utilizou o Rio Sena para testar várias das suas teorias e instrumentos, tendo realizado várias experiências com vista a determinar a velocidade de escoamento da água em diferentes partes da secção transversal do rio.

O tubo de Pitot daquela época era bastante rudimentar [11]: Compunha-se basicamente de um tubo de vidro curvado em um ângulo reto cujo ramal vertical era mantido fora d’água, enquanto o ramal horizontal, provido de um ramal em forma de funil era colocado dentro da corrente d’água.

Com o passar do tempo, aperfeiçoou-se muito o aparelho idealizado utilizando-se a medição de corrente de líquidos ou de gases em tubos fechados e pressurizados.

O tubo de Pitot estático utilizado no presente trabalho, também denominado tubo de Prandtl, tem suas tomadas de pressão total e estática combinadas num só instrumento. É um aparelho constituído de dois tubos coaxiais formando figura em L, conforme Figura 2.2.

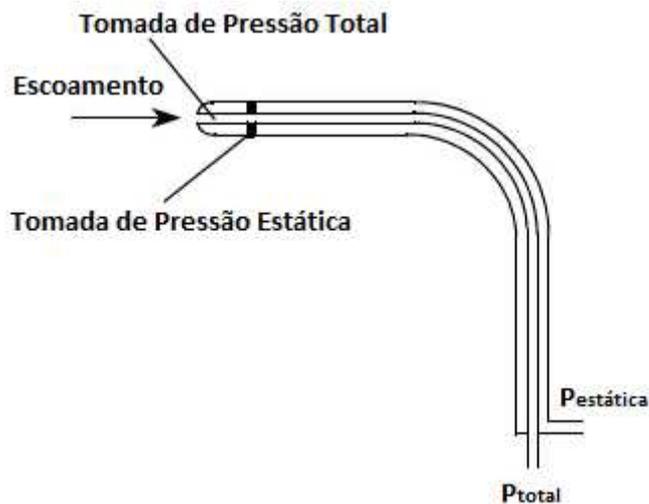


Figura 2.2 – Esquema canônico representando corte central a um tubo de Pitot Estático. [12]

A extremidade do tubo interno, colocada face à corrente, mede a pressão total, enquanto a pressão estática é medida através dos pequenos orifícios da parede do tubo externo, distantes da ponta do tubo. A pressão diferencial resultante (diferença entre a pressão total e a pressão estática) é chamada pressão dinâmica, a partir da qual é possível relacionar com a velocidade local no escoamento através da equação de Bernoulli.

A normatização internacional ISO/FDIS 3966/2008 [13], descreve os requisitos do sensor e da metodologia para medição de vazão de fluidos em dutos fechados visando alcançar, a nível de confiança de 95%, uma incerteza na vazão não superior a  $\pm 2\%$ .

Devido à considerável flutuação dos dados advindos da medição de pressão diferencial, a norma faz referência à possibilidade de uso de amortecimento das leituras de pressão (“damping”), objetivando um

comportamento linear e simétrico de forma a amenizar as flutuações de leitura que sejam configuradas como ruídos.

Na medição de vazão em dutos com tubo de Pitot evidencia-se os efeitos de vizinhança devido à formação da camada-limite hidrodinâmica próximo a parede do duto. K.G. Ranga Raju et al [14], em seu trabalho, pesquisou a respeito das variações das velocidades medidas com relação a velocidade real buscando uma formulação para correção das velocidades medidas próximas à parede interna do duto.

A.J. Pesarini et al [15], propôs, no caso específico de medição de vazão em túnel de vento com tubo de Pitot, uma distribuição de pontos de medição específica com base em um intervalo de velocidades em específico, visando conseguir um desvio menor do que a encontrada com a norma “IRAM standard 19004”. [ 16]

Rex Klopfenstein Jr. [17], em seu trabalho, buscou mostrar a melhor metodologia de medição de vazão com tubo de Pitot. Segundo a sua pesquisa, a determinação das faixas de velocidade mínima e máxima de operação é crucial para leituras confiáveis com o medidor.

Vários trabalhos científicos vêm utilizando a pitometria junto a outras técnicas de medição de vazão, tendo os resultados advindos do tubo de Pitot como referência. Queiroz [18] realizou levantamento de perfis de velocidade e mediu intensidade turbulenta utilizando pitometria e anemometria térmica. Salgado [19], em sua tese, utilizou-se de pitometria junto com medição ultrassônica por tempo de trânsito para caracterizar a medição de vazão ultrassônica em dutos que contenham acidentes de linha. Soares [20], através das técnicas de pitometria e anemometria térmica de fio a quente (HWA), caracterizou velocidades e vazões em um túnel de vento.

## 2.4 FUNDAMENTOS DA MEDIÇÃO DE VAZÃO POR DISPERSÃO A LASER

A medição ótica é a uma tecnologia que apenas recentemente tem sido utilizada para medição de vazão de gás, embora alguns instrumentos, como analisadores de gases, utilizem propriedades referentes à luz como absorção específica, fluorescência ou dispersão.

Os métodos óticos para medição de vazão de gás, mais conhecidos como “*Optical Flow Meters (OFM)*”, utilizam velocimetria ótica, ou seja, a medição da velocidade do gás para obter, a partir desta, a vazão volumétrica no escoamento. Existem dois tipos de métodos de velocimetria ótica: [21]

- Medidores de *laser* Doppler (“*Laser Doppler Velocimeters – LDV*”);
- Medidores de tempo de trânsito ótico.

Este último pode ser dividido em:

- Laser de dois focos (*Laser-Two-Focus - L2F*);
- Medidores por cintilação;
- Medidores por absorção.

A velocimetria por *laser* Doppler (LDV) é a forma mais antiga de velocimetria ótica proposta pelos primeiros medidores comerciais a *laser*. Normalmente, apresentam as seguintes vantagens e desvantagens [22]:

- Vantagens:
  - Excelente precisão;
  - Capacidade de medição em velocidades elevadas;
  - Capacidade de medição em escoamentos tridimensionais.
- Desvantagens:
  - Alto custo;
  - Necessita de partículas muito específicas e adequadas à medição, devido à baixa razão sinal-ruído (*signal-to-noise ratio - SNR*).

Thompson [23], em 1968, foi o primeiro autor a descrever a possibilidade de implementação do método L2F para medição de escoamentos.

O princípio operacional da velocimetria por tempo de trânsito óptico (L2F) do medidor óptico de vazão de gás é apresentada na Figura 2.3. Pequenas partículas que acompanham o gás natural e gases industriais passam através de dois feixes *laser* instalados no tubo. A luz do *laser* é dispersa quando uma partícula atravessa o primeiro feixe. A instrumentação óptica detecta a luz dispersa em um fotodetector P1, que gera um pulso. Se a mesma partícula atravessa o segundo feixe, a instrumentação óptica detecta a luz dispersada em um segundo fotodetector P2, o qual converte a luz em um segundo pulso elétrico. Pela medida do intervalo de tempo entre estes pulsos,  $\tau$ , e pela distância entre os feixes *laser* (S), a velocidade local do gás é calculada como:

$$V = S/\tau \quad (2.1)$$

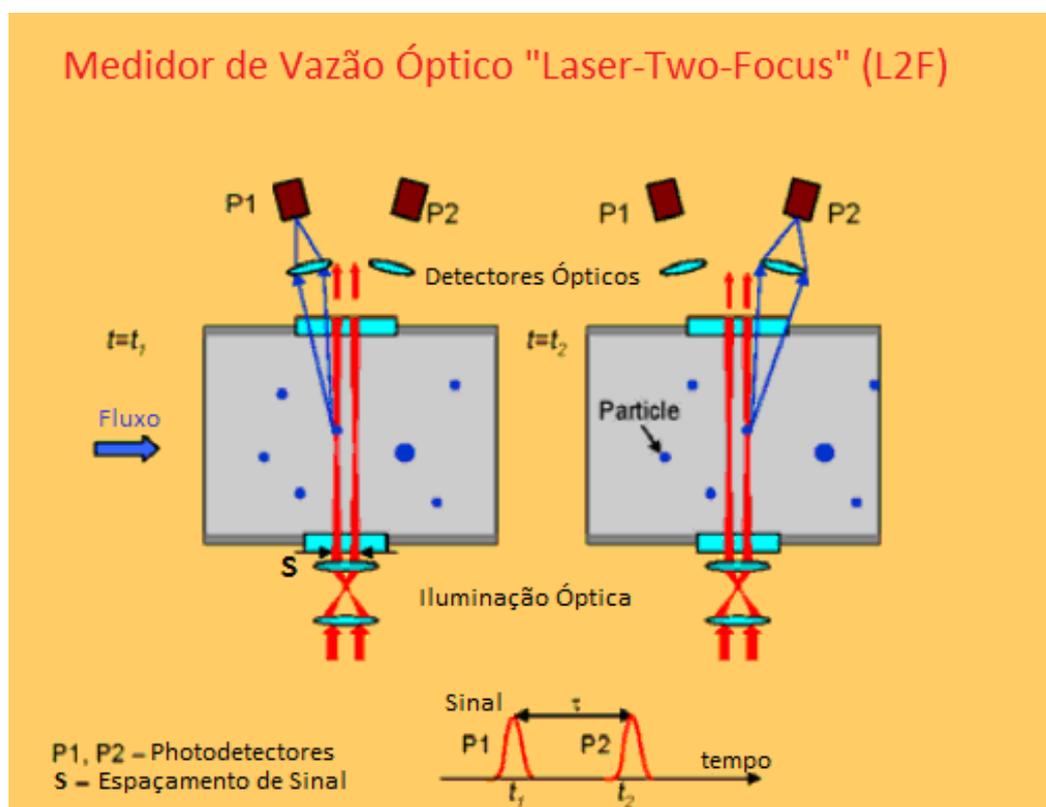


Figura 2.3. Princípio de funcionamento da velocimetria L2F [22]

A velocidade do escoamento real do gás é determinada de uma forma mais complexa, pois nem todas as partículas fluem axialmente devido à turbulência, e seus tamanhos e formas são aleatórios. O Tempo de Lapso ( $\tau$ ), portanto, é definido com base na estatística do tempo necessário para a qual um número de partículas efetivas são detectadas. [22]

Ao contrário dos Medidores por *Laser Doppler* (LDV), os medidores por L2F geralmente não necessitam de partículas específicas, devido à sua elevada Razão Sinal-Ruído (SNR). A técnica LDV, por outro lado, consiste de múltiplas franjas que ocorrem após a interferência em dois feixes convergentes, conforme resumido na Figura 2.4.

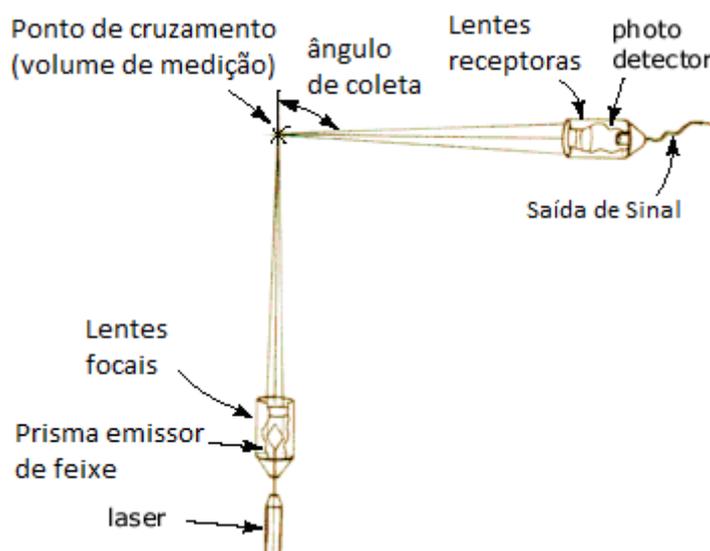


Figura 2.4. Princípio de funcionamento da velocimetria LDV [24]

Fotodetectores tais como os fotodiodos utilizados em velocimetria L2F para gás, registram fótons individuais, o que permite a utilização de *lasers* de baixa potência. Estes semi-condutores transmitem de 1 a 5 mW através de fibras óticas e podem ser focados em planos medindo entre 20 a 30  $\mu\text{m}$ , para medição em dutos de 2 a 6 polegadas de diâmetro.

### 2.4.1 Precisão do Método L2F

A velocidade linear do gás pode ser medida com alta precisão utilizando o método L2F, independente da pressão, temperatura e composição do gás.[21] A partir da equação (2.2), a incerteza da velocidade  $\sigma_v$ , pode ser estimada como:

$$\sigma_v = \sqrt{(\sigma_d^2 + \sigma_t^2)} \quad (2.2)$$

Em que  $\sigma_d$  e  $\sigma_t$  são os desvios-padrão na velocidade devido aos erros no espaçamento dos feixes e no lapso de tempo em que a partícula percorre este espaçamento, respectivamente.

A incerteza no espaçamento ótico é definida a partir da precisão com a qual o feixe pode ser medido. Para feixes típicos, o espaçamento é  $S=1mm$ , com incerteza do posicionamento  $\Delta S=1 \mu m$ . A incerteza ótica seria então de 0.1%. A incerteza no lapso de tempo é, normalmente, menor e definida pela frequência de amostragem  $f_s$ . Smart [25], por exemplo, relatou uma incerteza na velocidade menor que 0,02%, enquanto usada uma conversão analógico-digital com uma frequência de amostragem de 100MHz. O número de partículas efetivamente atravessando os dois feixes laser,  $N$ , contribui para a incerteza da velocidade em aproximadamente  $1/\sqrt{N}$ . Entretanto, a conversão da velocidade linear medida em um ponto para uma velocidade média, conduz a uma incerteza maior, devido às variações no perfil de velocidades e à turbulência.

De acordo com Schodl [26], o erro total da velocimetria L2F, pode ser menor do que 0,5% em um dado perfil de velocidades, se a intensidade da turbulência não exceder 4%.

O valor  $N$  é determinado pelos seguintes fatores:

- O próprio medidor, o que inclui: a eficiência na geração e detecção dos sinais óticos, a capacidade de detecção dos fotodetectores, a potência do laser e o comprimento de onda;

- A pureza do gás escoando pelo tubo;
- As velocidades de escoamento do gás e o nível de turbulência.

A eficiência da dispersão de luz é determinada pelo tamanho das partículas e pelo comprimento de onda do laser. Medidores L2F que operam próximo da região de infra-vermelho (850nm) podem medir a velocidade do ar com um diâmetro de partículas mínimo de  $0.3\mu\text{m}$ , aproximadamente [25]. Diminuindo o comprimento de onda, o tamanho detectável de partículas pode ser reduzido para menos de  $0.1\mu\text{m}$ . Durante o desenvolvimento do medidor de gás L2F, foram encontradas partículas de gás típicas em *pipelines* na faixa de 1 a  $10\mu\text{m}$  [27].

A medida que a velocidade do gás diminui, o número de partículas detectáveis é reduzido. Numa certa velocidade mínima,  $V_{min}$ , o medidor ótico não pode mais distinguir o escoamento organizado de um movimento estocástico de partículas, devido à estratificação térmica e outros fatores externos. Então, o valor de  $V_{min}$  estabelece a vazão mínima e, conseqüentemente, a faixa de medição (“rangeabilidade”) do medidor.

#### 2.4.2 Faixa de Medição (Rangeabilidade)

A faixa de operacional medição ou “rangeabilidade” é, provavelmente, o parâmetro mais importante de qualquer medidor de gás de *flare*. Alguns fabricantes de medidores ultrasônicos para *flare* declaram valores de  $V_{min}$  de 0,03 m/s e  $V_{max}$  de 80m/s, portanto com uma faixa de medição acima de 2500:1.

Em contraste, medidores L2F não tem limites para  $V_{max}$ , virtualmente. Foram relatados experimentos em velocidades extremas, acima de  $V_{max}=720$  m/s, durante testes de medidores L2F para aviões supersônicos [25]. Foram relatados casos, também, em que se utilizou medidores L2F em escoamentos supersônicos ( $Ma=2,0$ ) para caracterização do escoamento da combustão.[28]

Existem relatos de experimentos transônicos com turbinas que alcançaram  $Ma=1.3$  e Turbulência  $Tu=15$  [29].

A velocidade mínima para *OFM Photon<sup>TM</sup>* é definida pela presença de partículas – quanto mais sujo o gás, menor  $V_{min}$  é possível. Tem sido mostrado que escoamentos através de medidores óticos podem ser medidos abaixo de  $V_{min}=0.1$  m/s, como confirmado pelo teste no loop de escoamento do *Colorado Engineering Experiment Station – CEESI* associado à Universidade do Colorado [30]. O Medidor tipo L2F foi testado em velocidades acima de  $V_{max}=100$ m/s, utilizadas para definir a faixa operacional de medição de 1000:1.

#### **i. Precisão da Velocidade e calibração**

Uma amostra de  $N$  pulsos obtidos de uma série de eventos de dispersão é ponderada para produzir cada dado. Isto diminui a variabilidade causada pela turbulência na medida da velocidade local por um fator de ordem  $\sqrt{N}$ .

Exemplificando, supõe-se que o desvio-padrão da velocidade do fluido em escoamento completamente turbulento no centro do tubo seja, tipicamente, de 5% das leituras. O número de partículas correlacionadas está, usualmente, dentro de uma faixa de 10 a 100 amostras por intervalo de amostragem. Então, o desvio-padrão da velocidade medida é reduzido para 0,5 a 1,5%.

Um exemplo de relatório de calibração é mostrado na Figura 2.5. A incerteza da velocidade para um espaçamento desconhecido pode ser desprezada desde que o espaçamento seja controlado com uma incerteza melhor que  $1 \mu m$  e a distância entre os planos *laser* seja de  $1,0mm$ .

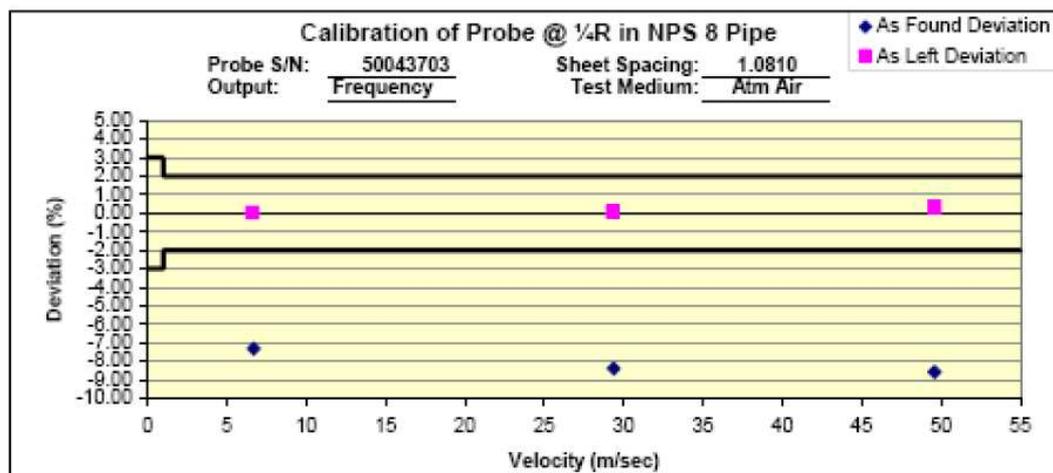


Figura 2.5 - Exemplo do resultado de uma calibração para o L2F em tubo Ø 8"[30]

Essa característica demonstra uma importante vantagem do medidor L2F pois, uma vez calibrado, não são necessárias re-calibrações da unidade. Da mesma forma que as leituras de um medidor ultra-sônico dependem apenas da distância entre transdutores e diferentes tempos de trânsito, o L2F depende do espaçamento fixo e tempo de trânsito das partículas. Se não houver variações destes dois parâmetros não haverá variação nas leituras.

## ii. Aspectos Tecnológicos do Medidor L2F

Um tipo de medidor de vazão amplamente utilizado atualmente para medição de gás de *flare* é o medidor ultra-sônico por tempo de trânsito. Tal equipamento já foi bastante estudado e teve o funcionamento caracterizado em diversos estudos [19][31].

O medidor óptico por tempo de trânsito L2F, cuja tecnologia leva a resultados semelhantes ao medidor ultrassônico tem sido discutido e apresentado como uma opção para medição de vazão de gás de *flare* [21][22][32].

Grande parte desse destaque da tecnologia L2F provém da independência da composição do gás nos resultados de medição, frente à considerável influência que o medidor de vazão ultra-sônico sofre com relação à presença de espécies atenuantes na composição do gás. Segue abaixo na Tabela 2.1 com comparativo básico das vantagens e desvantagens de ambos medidores por tempo de trânsito, Ultrassônico e Óptico.

Tabela 2.1 – Quadro Comparativo dos Medidores de Vazão por Tempo de Trânsito  
(adaptado de [11][32][33])

	<b>Medidor Ultrassônico</b>	<b>Medidor Óptico L2F</b>
Incertezas de Medição	Medição do tempo de trânsito (erro instrumental) Parâmetros da instalação (erro geométrico)	Medição do tempo de trânsito (erro instrumental) Parâmetros da instalação (erro geométrico)
Tipo de Medição	Velocidade	Velocidade
Medição por	Por Trajetória ou Múltiplas Trajetórias	Por ponto de medição.
Diâmetro do Duto Aplicado	> 3"	Qualquer (por inserção)
Faixa operacional de medição	Até 2000:1	Virtualmente Ilimitada (1000:1 comprovada)
Requerimento de Trecho Reto	10 à 30 D à montante, 5 à 10D à Jusante	10 à 30 D à montante, 5 à 10D à Jusante
Queda de Pressão	Desprezível	Desprezível
Necessário Conhecer T e P	Vazão Volumétrica Presente= Não, Vazão Volumétrica Padrão= Sim, Massa = Sim  *Obs.: Velocidade do Som medida está relacionada à massa específica	Vazão Volumétrica Presente= Não, Vazão Volumétrica Padrão= Sim, Massa = Sim
Dependência da Composição	Sim	Não
Adequado em Gás Úmido /Sujo	Há Restrições	Moderado
Precisão	Alta	Alta
Confiabilidade	Estável, sem partes móveis, requer calibração periódica após seu comissionamento.	Estável, sem partes móveis, Fácil Instalação, Vida útil de 5 anos, não requer calibração periódica após seu comissionamento.
Normatização	ASME / MFC-YY / AGA 9	Não Existente
Temperatura Operacional	Geralmente acima de 150°C com precisão	Qualquer temperatura de processo (virtualmente)

Resistência à Vibração do Duto e Ruído Acústico	Sofre influência da interferência do som	O som não afeta a precisão e nenhuma das características de desempenho
Desempenho em Variações de Condição de escoamento	Mudanças bruscas de vazão podem afetar leitura da velocidade do som medido	Menos afetado nas medições de vazão pela variação da vazão
Instalação do Medidor	Tipicamente necessários dois pontos de instalação	Único ponto de Instalação: menor manutenção e menor tendência à erros.
Outros Comentários	Eliminação de vorticidade	Eliminação de vorticidade

Dentre as características discutidas, destacam-se as vantagens do L2F em suas medições com relação aos aspectos de menor presença de interferência acústica na medição, facilidade de instalação, ampla faixa de temperatura operacional, resistência a variações de vazão, maiores aspectos de confiabilidade e aplicabilidade em uma gama maior de diâmetro de dutos.

Outros aspectos como faixa operacional de medição e precisão são de patamares muito próximos em ambas as tecnologias, além de ainda não existir normatização internacional para medição de gás com a tecnologia L2F e existir poucos estudos no mundo e, principalmente no Brasil, a respeito da tecnologia L2F aplicada a medição de vazão de gás. Estes aspectos demonstram a necessidade de maiores estudos científicos correlatos, uma vez que a tecnologia de medição de vazão de gás por dispersão a Laser já vem sendo utilizada com sucesso em algumas das principais empresas industriais e companhias petrolíferas do mundo. [33]

## 2.5 USO DE RETIFICADORES DE FLUXO EM MEDIÇÃO DE VAZÃO

Por sua vez, os retificadores de fluxo são acessórios instalados em trecho de tubulação com o objetivo de proporcionar ao escoamento que alcance a condição de completamente desenvolvido, necessitando de um menor comprimento de trecho reto da tubulação [34]. São aplicados, também, para diminuir os efeitos de acidentes de linha nas medições de vazão efetuadas e diminuir o nível de turbulência do escoamento, de maneira a

minimizar os erros sistemáticos nas medições de vazão. Na Figura 2.6 são mostrados exemplos de retificadores de fluxo.



Figura 2.6 - Exemplos de retificadores de fluxo. [35]

Há vários tipos de retificadores de fluxo, dentre eles, os conhecidos e descritos em normatização brasileira são os tipos: Zanker, Sprengle, feixe de tubos, retificador AMCA, e retificador Étoile. [36]

Na norma, ISO 5167-1 [36], são estabelecidas as premissas tecnológicas a serem seguidas por cada um dos tipos de retificadores de fluxo. Também são apresentadas estimativas da perda de carga que cada um pode ocasionar.

A precisão geométrica de fabricação dos retificadores de fluxo, assim como sua correta instalação e dimensionamento com relação à perda de carga admitida são os fatores preponderantes para que estes dispositivos possam alcançar os objetivos propostos. Outro fator importante é a posição de instalação do retificador de fluxo com relação ao sensor do medidor de vazão, visto que diferentes níveis de dispersão dos valores medidos podem ser obtidos se o dispositivo for instalado à montante e/ou à jusante da posição de medição de vazão no duto. Motivos que levam uma série de pesquisas

tecnológicas sobre as melhores práticas de configuração, instalação e operação deste dispositivo.

Schlüter e Merzkirch [37] testaram três retificadores de fluxo diferentes, expostos ao acidente de linha de dupla curva perpendicular fora de plano, utilizando a tecnologia de velocimetria de imagem de partículas (PIV – “*Particle Image Velocimetry*”) com objetivo de analisar a efetividade de alguns tipos de retificadores e o trecho reto à montante necessário para o completo desenvolvimento do escoamento. Segundo os autores, a tecnologia de PIV é rápida, porém não foi possível agregar tanta informação sobre o escoamento como quando se usa a técnica de “*Laser Doppler Anemometry*” - LDA, por exemplo.

Fratolillo e Massarotti [38] apresentaram um estudo comparativo entre alguns modelos de retificadores de fluxo, utilizando-se de metodologia de dinâmica dos fluidos computacional. A análise foi realizada com base em parâmetros, como por exemplo, o efeito de recirculação (efeito “swirl”) e a simetria do perfil de velocidades. Chegaram ao parecer que, de fato, cada tipo de retificador de fluxo leva a resultados advindos de desempenhos distintos em relação aos parâmetros adotados, ou seja, um retificador de fluxo que minimize o efeito de assimetria não será melhor, necessariamente, ao minimizar a recirculação e vice-versa.

### **3 MONTAGENS EXPERIMENTAIS**

#### **3.1 CONFIGURAÇÃO DO TÚNEL DE VENTO**

O escoamento é aspirado, promovido por um soprador com potência de 15 HP, instalado no extremo à jusante dos tubos, após o *plenum*. Assim, a pressão do escoamento promovido nos tubos é levemente inferior à pressão atmosférica. O soprador é acionado por um inversor de frequência que controla sua rotação que, por sua vez, é comandado por um Controlador Lógico

Programável (PLC) montado em um quadro de controle específico, conforme a Figura 3.1-a.



(a)

(b)

Figura 3.1 – (a) Detalhe do inversor de frequência;  
(b) Detalhe do difusor instalado à montante do escoamento.

O escoamento aspirado permite a formação de um perfil de velocidades no interior do tubo a partir de um perfil uniforme na entrada, que é mais favorável ao desenvolvimento de um perfil completamente desenvolvido.

As dimensões dos tubos e as suas respectivas posições de montagem estão mostradas na Tabela 3.1 e na Figura 3.2. À montante dos tubos está instalado um bocal em fibra de vidro, conforme visto na Figura 3.1-b. A disposição das peças que compõe cada tubo está mostrada na Figura 3.2 e as dimensões de cada tubo e cada peça na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Dimensões e Pesos da Tubulação Utilizada

	Dext (mm)	e (mm)	Dint (mm)	Peso Específico (kg/m)	Ldifusor (mm)	L1 (mm)	L2 (mm)	Lspool (mm)	L3 (mm)	L4 (mm)
Tubo 8"	198	8	182	4,5	184,6	2250	2250	1500	2235	1800

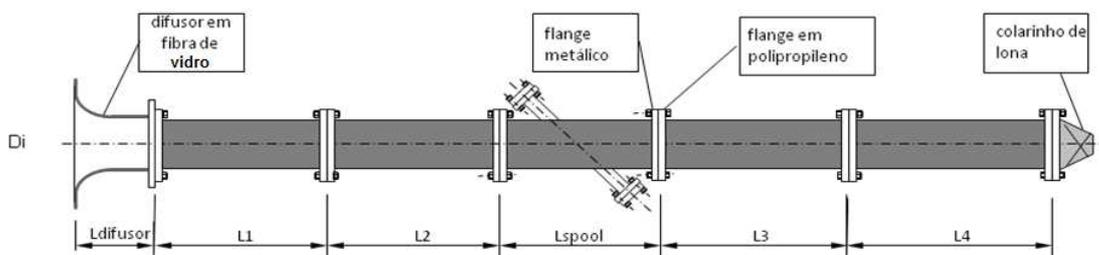


Figura 3.2. Esquema geral de montagem dos tubos

As flanges destes componentes do túnel de vento, descritos anteriormente, são em nylon e possuem encaixe tipo macho-fêmea, de forma a promover o bom alinhamento da parede interna, buscando eliminar a possibilidade de desalinhamento e/ou vazamentos.

Conforme Figura 3.3-a, à jusante dos tubos, a interligação do escoamento ao rotor se faz pela válvula tipo “janela” do Plenum acoplada com um “colarinho” de lona hermeticamente vedado com uma cinta com presilha de pressão em aço. A saída de ar do rotor se dá por um duto de 20”, onde instalou-se uma tela retificadora de escoamento em aço (vide Figura 3.3-b) com intuito de que, em baixas vazões, reduza as flutuações no escoamento dentro do duto frente a influência da circulação de ar externo.



Figura 3.3 – (a) Detalhe da junção do rotor à tubulação de 8”; (b) Detalhe da tela instalada à jusante do rotor.

### 3.2 DESCRIÇÃO DA MONTAGEM DO EXPERIMENTO NO TÚNEL DE VENTO

A montagem da matriz de experimentos de medições contou com a instalação de dois medidores distintos em série no tubo de 8”, descritos no capítulo anterior: medidor Óptico de gás por tempo de modelo óptico de Inserção “Focus™ Probe OFM” do fabricante Photon Control e tubo de Pitot modelo ITMP120 do fabricante KIMO.

Foram efetuadas medições na presença de apenas um ou dos dois medidores mencionados acima, em série e dependendo do objetivo da bateria de experimento em que se utilizou. Na Figura 3.4 são mostrados os pontos estratégicos nos quais foram feitas as inserções dos medidores e na Tabela 3.2 estão resumidos os experimentos que foram montados e as respectivas posições de instalação dos medidores e acessórios utilizados.

Tabela 3.2 – Matriz de Experimentos Realizados com o Pitot: Caracterização do perfil de velocidades, em três patamares de velocidade do rotor (700,950 e 1200 rpm)

Experimento	Retificador de fluxo à montante	Retificador de fluxo à jusante	Instalação de Damping	Posição do Pitot	Observações
Exp1	-	X	-	Ponto B	
Exp2	-	-	-	Ponto B	
Exp3	-	-	X	Ponto B	
Exp4	-	X	X	Ponto B	
Exp5	X	X	-	Ponto B	
Exp6 ou 6C	X	X	X	Ponto B	
Exp7	X	-	X	Ponto B	
Exp8	X	-	-	Ponto B	
Damping1	X	X	X	Ponto B	Comprimento do capilar: 303,4cm
Damping2	X	X	X	Ponto B	Comprimento do capilar: 192,4cm
Damping3	X	X	X	Ponto B	Comprimento do capilar: 43,4cm
6E	X	X	X	Ponto B	Teste de repetibilidade do Exp 6
6F	X	X	X	Ponto A	
6I	X	X	X	Ponto B	Photon instalado no Ponto A

As distâncias selecionadas para as instalações, conforme vistas na Figura 3.4, foram escolhidas de forma a propiciar o melhor perfil de velocidades considerando as limitações de comprimento do tubo.

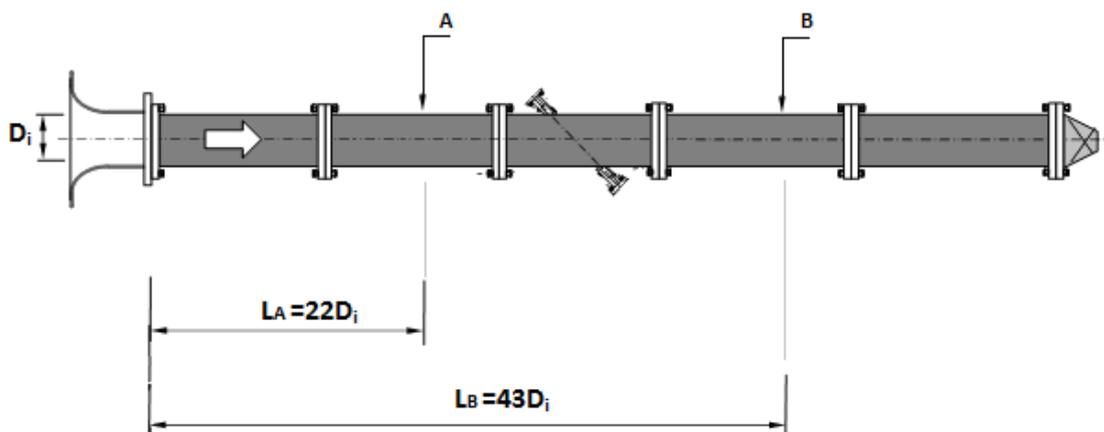


Figura 3.4 – Posição e distâncias dos medidores ao longo do tubo de 8”

Como pode ser observado da Figura 3.4, todas as medidas dos trechos retos se iniciam após o difusor. Foi feita a opção de distanciamento dentre os medidores de forma a propiciar leituras simultâneas dos dois aparelhos com a premissa de manter o Tubo de Pitot o mais afastado possível do Photon, que é outro medidor de inserção, sem comprometer o espaçamento necessário à jusante do escoamento.

Essa montagem será validada adiante, na Seção 4.1.5 na comparação dos perfis de velocidades obtidos nas secções transversais A e B, em condições semelhantes com o mesmo medidor de referência, o Tubo de Pitot.

Todas as medições de velocidade efetuadas com o medidor Photon, foram realizadas com este medidor instalado na secção transversal A, sendo que apenas nos procedimentos de leituras simultâneas com os medidores e durante a bateria de testes denominada 6l, o medidor Photon esteve montado simultaneamente, em série com o tubo de Pitot. Ambos em suas posições preconizadas para medição e cálculo da velocidade média.

### 3.3 APARATO EXPERIMENTAL

O plano vertical que atravessa longitudinalmente a tubulação, ao longo de todos seus trechos, foi identificado com o uso de uma ferramenta niveladora *laser*, que emite um feixe plano de luz concentrada ao mesmo tempo em que encontra o melhor alinhamento vertical do feixe no duto. A marcação horizontal foi obtida rebatendo o ângulo perpendicular ao plano vertical encontrado, conforme mostrado nas Figuras 3.5.a e 3.5.b.



a)



b)

Figura 3.5 – Alinhamento plano do duto:  
a) Procedimento; b) Dispositivo *laser* utilizado.

Para analisar a melhoria no desenvolvimento de perfil de velocidades e nos resultados de medição global de vazão, frente à possibilidade de perda de carga, foram projetados, construídos e utilizados dois retificadores de fluxo semelhantes.

Os retificadores foram presos, cada um, com três pequenos parafusos necessários para fixá-los no duto, de forma que não oferecessem considerável obstrução ao escoamento, conforme Figuras 3.6. Os critérios, normatização utilizada e requisitos para projeto e construção dos retificadores de fluxo estão

descritos, de maneira completa, no Apêndice A – Memorial de Cálculo dos retificadores de fluxo.

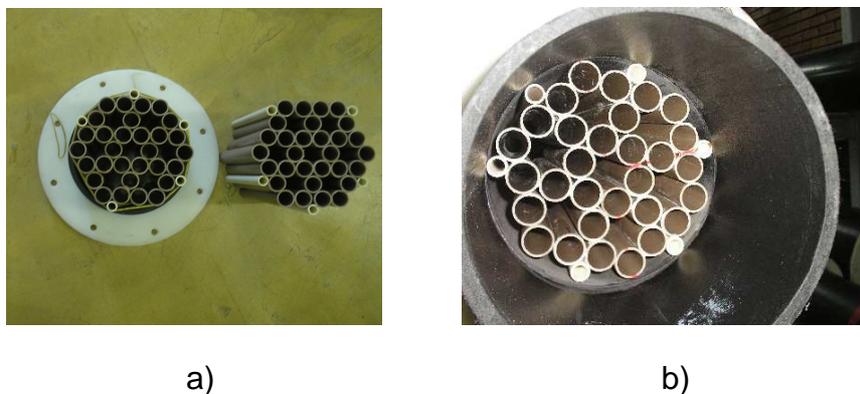


Figura 3.6 – Vista “as built” dos Retificadores de Fluxo: a) em vista frontal; b) com o dispositivo montado.

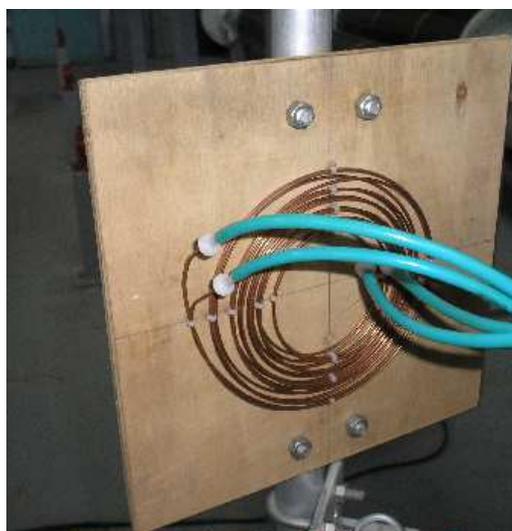
Os procedimentos com o Damping foram efetuados buscando uma tubulação capilar que tivesse comportamento linear e simétrico, conforme ISO3966 [39]. As extremidades das tubulações capilares foram vedadas com peças de nylon especialmente torneadas e a junção destas vedadas com silicone industrial. Durante sua instalação, a tubulação capilar de cobre utilizada foi presa por abraçadeiras de polímero sob superfície plana de maneira a evitar qualquer dobra da tubulação. Os cortes efetuados nas tubulações para alcançar o comprimento ideal foram feitos de maneira criteriosa.

Foi utilizada balança digital de precisão de centésimos de gramas para medir o peso, tanto do capilar utilizado na tomada de pressão dinâmica, quanto do utilizado na tomada de pressão estática do Tubo de Pitot. Com base na sua densidade mássica linear ( $\lambda_m = 18,964 \text{ g/m}$ ), efetuaram-se os cortes nas tubulações capilares, com cortador específico para tal, de maneira que a extremidade dos capilares não fossem deformadas pelo excessivo cisalhamento, evitando a obstrução destes. Os cortes nos tubos capilares das tomadas de pressão estática e dinâmica foram executados simultaneamente, de forma que alcançassem a mesma massa e, conseqüentemente, o mesmo comprimento. A metodologia descrita acima para amortecimento das medições

de pressão no transdutor de pressão, e a montagem destes capilares de liga de Ferro-Cobre, estão ilustrados nas Figuras 3.7-a e 3.7-b.



a)



b)

Figura 3.7 – Metodologias utilizadas para o Damping: a) Obtenção do comprimento a partir de sua massa; b) Montagem final das tubulações capilares.

Foi utilizado transdutor de pressão para medir a pressão diferencial medida pelo Tubo de Pitot em milímetros de coluna d'água - mmca, com precisão de centésimos de milímetros de coluna d'água, para depois se converter os valores medidos em velocidade local. A montagem deste dispositivo está demonstrada na Figura 3.8.

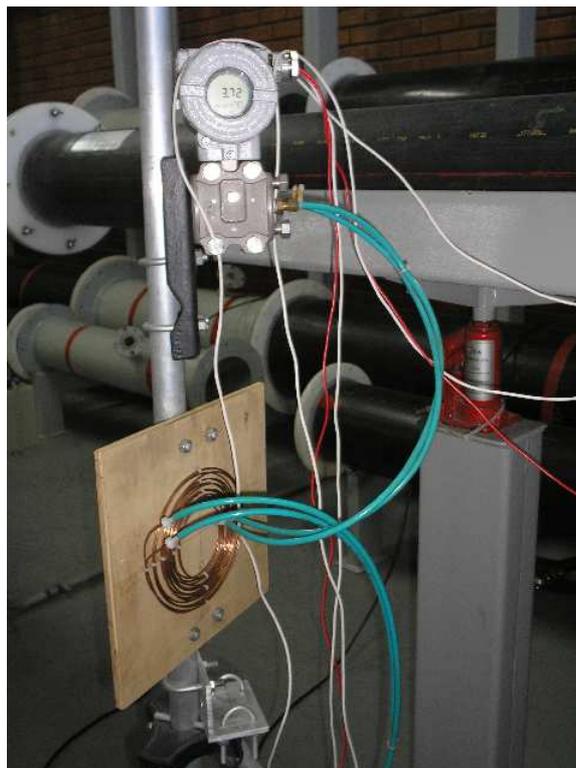


Figura 3.8 – Montagem do transdutor de pressão e do damping.

A fixação do conjunto medidor onde se encontrava instalado o Tubo de Pitot, no Laboratório de Maquinas de Fluxo da UFES foi criada e utilizada em trabalho científico anterior [20]. Tal montagem utilizava uma plataforma móvel metálica, cuja estrutura suportava o Tubo de Pitot, conforme Figuras 3.9a e 3.9b. Esta estrutura, por possuir a referência geométrica de fixação o plano do piso do laboratório, e por não ser fixa a tubulação do túnel de vento, historicamente apresentou-se desfavorável com relação às flutuações dos dados medidos frente aos efeitos vibratórios diferentes nos dois conjuntos: entre a plataforma e a tubulação do túnel de vento.

Tendo em vista os graus de liberdade existentes entre a estrutura e a tubulação, tal montagem também não facilitava um alinhamento preciso do tubo de Pitot em relação ao eixo do tubo.

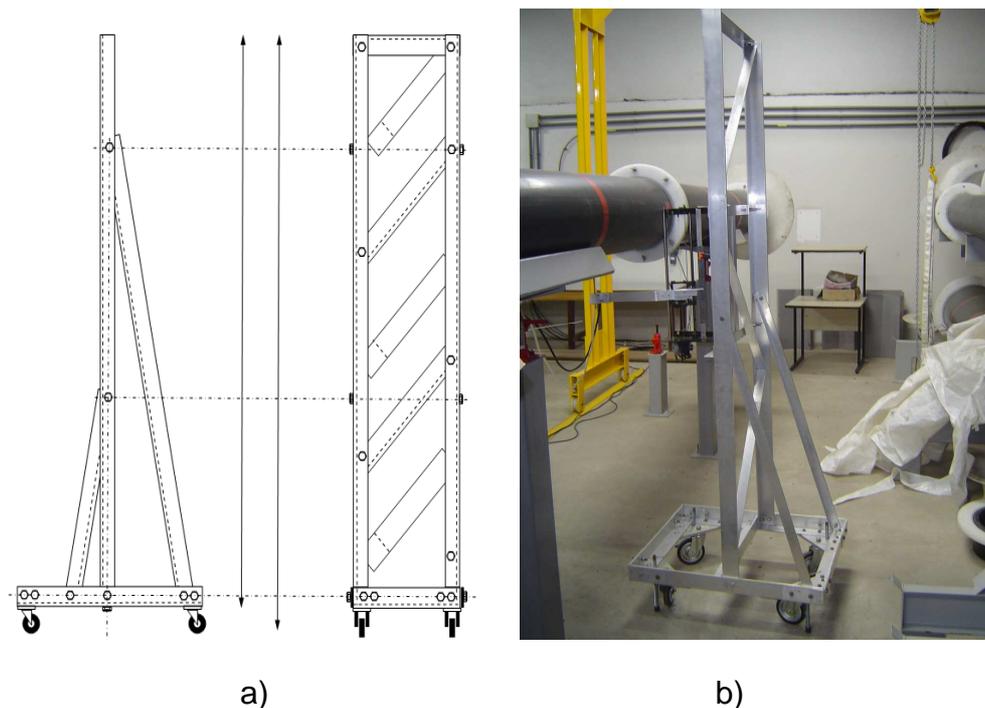


Figura 3.9 – Carro de fixação utilizado no laboratório no passado[19] : a) croqui com vistas frontal e lateral; b) vista da montagem em operação.

Com o objetivo de minimizar estes efeitos, projetou-se e construiu-se um novo conjunto de fixação do Tubo de Pitot, em que o conjunto fica rigidamente preso a um perfil metálico “tipo U”, o qual, por sua vez, se fixa logo acima da tubulação do túnel de vento, de maneira a melhor fixar e alinhar o medidor no escoamento, visto que nesta fixação o conjunto tende a vibrar em conjunto e o perfil metálico alinha o medidor ao se fixar acima da tubulação.

Nas Figuras 3.10 e 3.11 é possível ver a concepção tridimensional da idéia e a montagem efetiva “*as built*” para comparação.

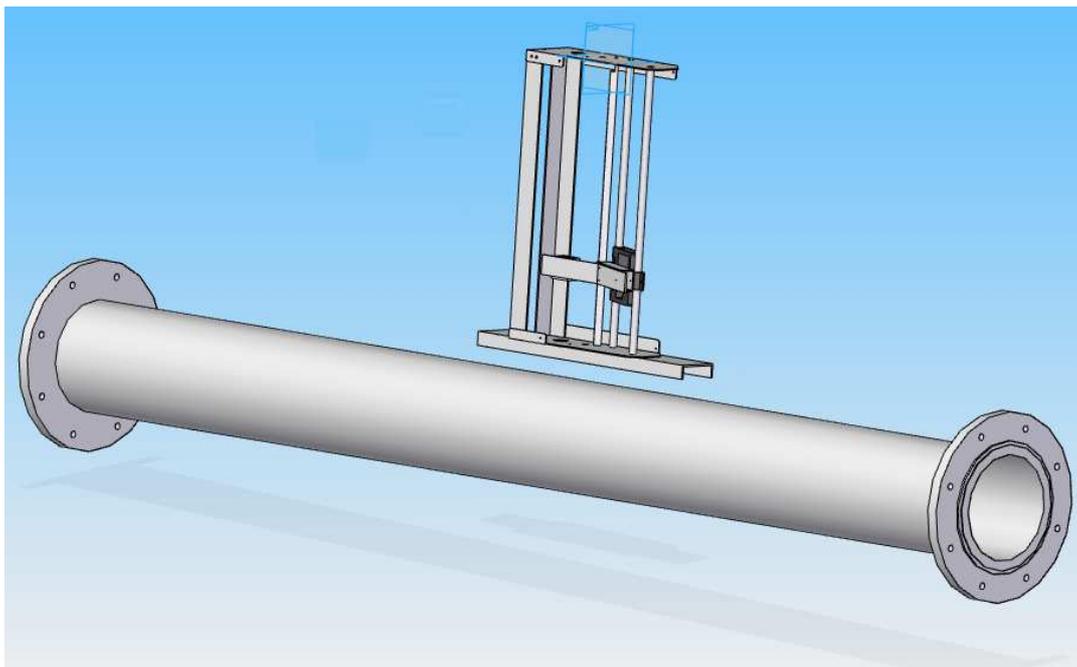


Figura 3.10 – Vista isométrica do Projeto do conjunto fixador do Tubo de Pitot.



Figura 3.11 – Vista “as built” do Projeto do conjunto fixador do Tubo de Pitot.

As premissas, metodologia, modelagem e projeto completo do suporte fixador do Tubo de Pitot encontram-se no Apêndice B – projeto do suporte do medidor Tubo de Pitot. A fixação do suporte sobre a tubulação do túnel de

vento se deu com o uso de duas cintas de *nylon* e a medição da posição do Tubo de Pitot, no escoamento se deu com o uso de uma trena a *laser*.

No conjunto de polias necessários para deslizar o Tubo de Pitot ao longo da secção transversal do escoamento, instalou-se um contra-peso de chumbo com a mesma massa do medidor e demais componentes, com o objetivo de igualar os pesos e, conseqüentemente, a tração em ambos os lados da polia, buscando o equilíbrio e precisão do conjunto frente aos efeitos de vibrações e efeito gravitacional sobre as massas componentes do conjunto.

As polias estão acopladas a um motor de passo e, assim, está pré-disposta a automação do movimento. Porém, esse recurso não foi utilizado nos experimentos descritos e a movimentação utilizada foi manual.

### **3.4 TUBO DE PITOT**

A norma ISO 3966 de 2008 [39] é a que define os elementos e dimensões de um tubo de Pitot estático e os procedimentos a serem executados para avaliar a vazão em um duto através das estimativas de velocidades locais, obtidas por leituras de diferenças de pressão. A forma preconizada que mais se enquadra ao modelo ITMP 120 da KIMO utilizado é visualizada na Figura 3.12, que corresponde à Figura A.2 da norma.

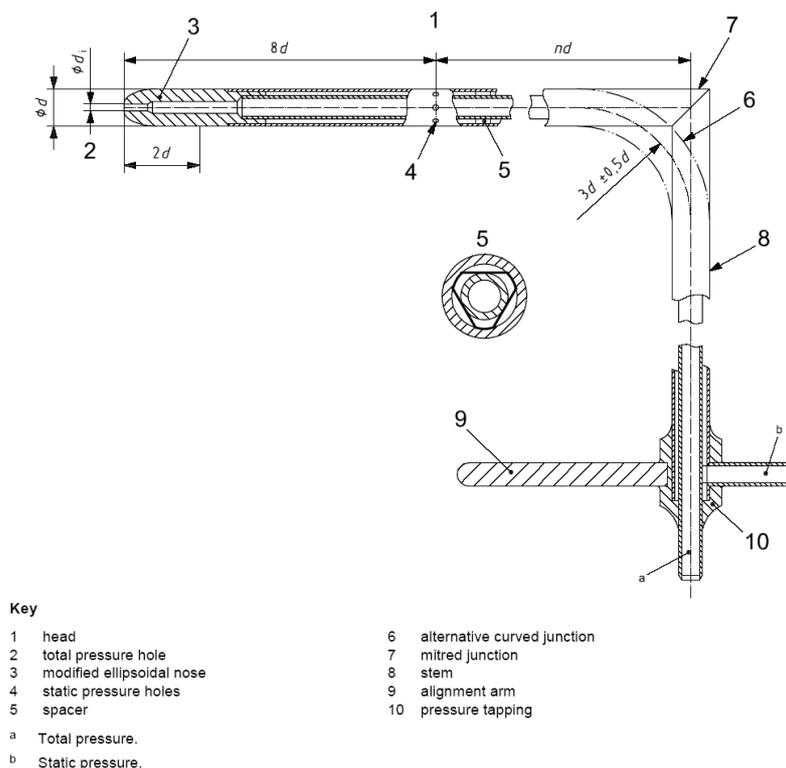


Figura 3.12 – Geometria e detalhes de um tubo de Pitot de nariz elipsóidal, conforme a ISO 3966 [39]

Um levantamento dimensional do Pitot, efetuado no Laboratório de Metrologia da UFES, está listado na Tabela 3.3 e a verificação de conformidade dimensional com a norma ISO 3966 encontra-se na Tabela 3.4.

Tabela 3.3 - Medidas Geométricas do Tubo de Pitot ITMP 120

Elemento	Dimensão (mm)	Símbolo
1	Diâmetro da cabeça	d
2	Diâmetro da haste	d'
3	Extensão da haste	$L_{\text{haste}}$
4	Extensão da cabeça	$L_{\text{cabeça}}$
5	Extensão do nariz	$L_{\text{nariz}}$
6	Furos de pressão estática:	
6.1	Diâmetro dos furos	$D_{\text{furo}}$
6.2	Quantidade	$N_{\text{furo}}$
6.3	Distância do topo do nariz	35,85
6.4	Distância até o eixo da haste	47,15
7	Raio entre cabeça e haste	R
8	Braço de alinhamento	Não-existe
9	Ângulo entre haste e nariz (em graus)	90,018°

Da Tabela 5.4, observa-se que quatro itens não estão em conformidade com a ISO 3966, porém as diferenças entre os valores são próximas e considerou-se que tais não-enquadramentos não fossem críticos. Desta forma, foi considerado o uso do tubo de Pitot ITMP120 como uma referência confiável de medição de velocidade de escoamento no túnel de vento, utilizando-se de metodologia proveniente desta norma.

Tabela 3.4 - Verificação de conformidade geométrica do tubo de Pitot ITMP 120 da KIMO, à ISO 3966/2008

Elemento	Simbolo	Localização na ISO 3966/2008	Valor recomendado	Verificação de Conformidade
1 Tipo do Pitot		Appendix A	-	Conforme
2 Extensão da haste	$L_{haste}$	-		
3 Extensão da cabeça	$L_{cabeça}$	5.1	15d - 25d	Conforme
4 Extensão do nariz	$L_{nariz}$	Appendix A	= 2d	Não-Conforme
5 Furos de pressão estática:				
5.1 Diâmetro dos furos	$D_{furo}$	5.2-d-1	$\leq 1,6\text{mm}$	Conforme
5.2 Quantidade	$N_{furo}$	5.2-d-2	$\geq 6$	Conforme
5.3 Distância dos furos ao topo do nariz		5.2-d-3	$\geq 6d$	Conforme
5.4 Distância dos furos até o eixo da haste		5.2-d-4	$\geq 8d$	Não-conforme
6 Raio entre cabeça e haste	R	5.2-f	$= (3\pm 0,5)d$	Não-conforme
7 Braço de alinhamento		5.2-g	Existe	Não-conforme
9 Ângulo entre haste e nariz		Appendix A	$90^\circ \pm 1^\circ$	Conforme

### 3.4.1 Justificativa da Utilização e Metodologia empregada com o Tubo de Pitot

De acordo com a norma ISO3966/2008 [39], o coeficiente de descarga do Tubo de Pitot considerado pela norma é praticamente igual a 1 (um). Desta forma, escolheu-se o Tubo de Pitot como referência para comparação com os dados advindos do medidor velocimétrico a *laser*, visto que os valores advindos do Tubo de Pitot são suficientemente próximos dos valores reais no

experimento. O coeficiente de descarga do Tubo de Pitot nos experimentos puderam ser considerados igual a 1 (um) pois, em todos os experimentos, mantiveram-se os limites mínimos e máximos de velocidades. A velocidade mínima é limitada de forma que não esteja inferior ao número de Reynolds Mínimo ( $Re_{min} = 200$ ). Enquanto a velocidade máxima, devido à compressibilidade, é limitada pelo Número de Mach Máximo ( $Ma_{max} = 0,25$ ).

Conforme a norma, para o diâmetro interno médio do duto utilizado de 182mm, seguramente o tubo de Pitot pode ser utilizado entre os limites de 0,017 m/s a 85,00 m/s. Neste amplo intervalo de velocidades, o coeficiente de descarga ( $\alpha$ ) pode ser adotado como 1 (um), viabilizando os testes descritos a seguir.

Conforme o Capítulo 8 da ISO3966/2008 [39], partindo da premissa de escoamento incompressível, a seguinte condição deve ser obedecida:

$$\Delta p = \frac{2 \times 10^4}{\rho} \left( \frac{\mu}{\alpha d_i} \right)^2 \quad (3.1)$$

Onde:

- $\Delta p$  é a pressão diferencial medida pelo Pitot (Pa);
- $\rho$  é a massa específica do fluido utilizado -ar atmosférico- ( $\text{kg/m}^3$ );
- $\mu$  é a viscosidade dinâmica do fluido (Pa.s)
- $d_i$  é o diâmetro interno do orifício de tomada de pressão total (m);
- $\alpha$  é o coeficiente de descarga do tubo de Pitot: assumido como igual a 1 (adimensional).

Chama atenção, todavia o outro limite que a norma [39] impõe, em sua tabela 8.1, para escoamentos compressíveis. Para um coeficiente isentrópico de 1.1, por exemplo, a norma estabelece que, em qualquer hipótese, deve-se

observar  $\frac{\Delta p}{\rho} \leq 0,035$ . É verdade que o escoamento do teste pode ser considerado incompressível, embora o fluido de teste seja compressível. Observa-se que os valores da razão  $\frac{\Delta p}{\rho}$  para o escoamento testado estão muito abaixo deste limite, ao menos três vezes abaixo que o valor máximo aceitável, já considerando o pior dentre os casos.

Para efetuar o levantamento dos perfis de velocidade experimentais no túnel de vento, procedeu-se com a medição das pressões diferenciais locais com o tubo de Pitot, em posições normalizadas, ao longo da secção transversal do túnel de vento, conforme a metodologia Log-Linear [39].

Conforme a Tabela 3 da referida norma [39], optou-se por medir a velocidade local em 5 pontos por raio, ao longo do diâmetro referente à secção transversal do duto e mais o ponto central do escoamento, tendo em vista a medição precisa neste ponto ser necessária para se comparar os perfis teóricos de velocidades com o perfis de velocidades experimentais obtidos.

Devido a limitações de montagem do túnel de vento, procedeu-se com a medição nos pontos anteriormente descritos apenas no plano vertical do duto, ao invés de se medir em ao menos 2 planos ortogonais conforme descrito na referida norma. A medição da posição da cabeça do tubo de Pitot no escoamento foi efetuada com dispositivo de medição óptica de posição comumente conhecido como trena a laser. Com isto possibilitou um erro máximo de 1 mm de posicionamento, ou seja, o equivalente a 0,55% da distância total de curso do sensor do tubo de Pitot, buscando, assim, mitigar os erros de medições nas velocidades locais devido aos erros de posicionamento das medições.

Partindo do pré-suposto que o escoamento no túnel de vento é turbulento e completamente desenvolvido nas secções transversais em que se fizeram medições, o que será analisado e discutido depois no Capítulo 4.1.5, tem-se que o perfil de velocidades no interior dos dutos pode ser estabelecido com as velocidades médias estabelecidas pela turbulência. O comportamento de tais tipos de perfis de velocidades são bastante conhecidos e amplamente estudados em muitos artigos técnico-científicos. Um dos modelos adotados

como referência para comparação com os perfis obtidos experimentalmente é o proposto pela AGA Report N° 9 [40] pela seguinte expressão:

$$v(r) = v_0 \left( 1 - \left| \frac{r}{R} \right| \right)^{\frac{1}{n}} \quad (3.2)$$

Onde:

$v_0$  é a velocidade máxima do escoamento (m/s);

$r$  é a coordenada radial (m);

$R$  é o raio interno da tubulação (m);

$n$  é o expoente que depende da natureza do escoamento.

A variável do expoente  $n$ , que é a que determina o formato do perfil de velocidades, foi calculada em função do número de Reynolds ( $Re$ ) pela seguinte equação implícita, a qual, para cada perfil, foi resolvida com método numérico iterativo:

$$n = 2 \log \left( \frac{Re}{n} \right) - 0,8 \quad (3.3)$$

Outra modelagem de perfil teórico empírico com o qual os perfis de velocidades obtidos experimentalmente foram comparados, foi a desenvolvida por De Chant [41]. Esta é simples, porém efetiva modelagem para o perfil médio turbulento de velocidades em gradientes de pressão moderados e favoráveis. A simplificação utilizada foi:

$$v(r) = v_0 \cdot \left[ \sin \left( \frac{\pi}{2} \left( \frac{r}{R} \right)^{\frac{1}{2}} \right) \right]^2 \quad (3.4)$$

Onde:

$v_0$  é a velocidade máxima do escoamento;

$r$  é a coordenada radial;

$R$  é o raio interno da tubulação;

Nos onze pontos descritos ao longo da secção transversal, utilizou-se a seguinte metodologia:

Com tubo de Pitot, em cada posição pontual descrita anteriormente, efetuou-se a medida de ao menos 40 (quarenta) valores da pressão diferencial local, sendo que foram efetuadas as medições locais durante a descida e, depois, novamente, durante a subida do tubo de Pitot no escoamento, a fim de minimizar efeitos de histerese do sensor. Os valores das velocidades diferenciais foram convertidas conforme a norma ISO 3699/2008 [39], de acordo com a relação:

$$v = \alpha \cdot (1 - \varepsilon) \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad (3.5)$$

Onde  $(1 - \varepsilon)$  é o fator de correção de compressibilidade, dado pela seguinte relação:

$$1 - \varepsilon \approx \left[ 1 - \frac{1}{2\gamma} \frac{\Delta p}{\rho} + \frac{\gamma - 1}{6\gamma^2} \left( \frac{\Delta p}{\rho} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3.6)$$

Onde:

$\gamma$  é a razão de calores específicos;

$p$  é a pressão local estática (Pa);

$\rho$  é a massa específica do fluido (kg/m<sup>3</sup>);

$\Delta p$  é a pressão diferencial indicada pelo tubo de Pitot (Pa).

A pressão estática local foi aproximada a pressão atmosférica de referência ao longo do dia em que foi realizado o teste em específico e a

temperatura local foi medida a partir da temperatura ambiente local detectada por um termo-higrômetro digital.

De posse destas duas variáveis, foi possível aproximar o valor da massa específica do ar ambiente circulando ao longo do túnel de vento, com base na *Lei de Sutherland* [37] :

$$\frac{\mu}{\mu_0} \approx \left( \frac{T}{T_0} \right)^{3/2} \left( \frac{T_0 + S}{T + S} \right) \quad (3.7)$$

Onde:

$$S_{ar} \approx 110,4 \text{ K},$$

$$T_0 = 273 \text{ K},$$

$$\mu_0 = 1,71 \times (10^5) \text{ Kg/(m.s)},$$

$T$  é a temperatura (K).

Ainda conforme a norma, usou-se modelagem algébrica, buscando obedecer ao critério descrito no item 6.4.3 desta. O qual determina que a massa específica do fluido deverá ser determinada de maneira a se certificar de que a incerteza no valor obtido não excedará  $\pm 0,5 \%$  (ao nível de confiança de 95%). [39]

Uma formulação alternativa para a medição das velocidades locais foi a descrita pelo fabricante do tubo de Pitot utilizado [42], com a qual comparou-se os valores medidos a partir da metodologia descrita na norma ISO3966/2008[39]. A formulação é a seguinte:

$$V = K \sqrt{\frac{574,2 \cdot T + 156842,77}{P_0}} \times \sqrt{\Delta P} \quad (3.8)$$

Onde:

$P_0$  é a pressão barométrica (Pa);

$T$  é a temperatura medida ( $^{\circ}\text{C}$ );

$K$  é o coeficiente do tubo de Pitot.

As baterias de experimentos descritos na Tabela 3.2 foram executadas, tendo em vista analisar os perfis de velocidades com relação aos critérios de simetria, incerteza, histerese do sensor, proximidade aos perfis teóricos empíricos esperados. Procedeu-se também uma comparação dos resultados obtidos frente aos efeitos provenientes do uso ou não-uso de retificador(es) de fluxo e/ou o mecanismo de amortecimento (“*damping*”) dos valores medidos utilizando tubulação capilar.

### 3.5 – O MEDIDOR DE VAZÃO POR DISPERSÃO A LASER TIPO L2F

O modelo utilizado de Medição por dispersão a Laser tipo L2F, consiste de um sensor (“*probe*”) óptico e uma unidade de processamento de sinais, que é conectado por um cabo de fibra óptica.

O modelo de sensor óptico de inserção utilizado foi projetado para uso em grandes diâmetros, de 6 a 32” (diâmetro nominal) típicos de instalações de *flare*. O sistema óptico é incorporado em um tubo de aço inoxidável Ø3/4”, que é instalado lateralmente ao escoamento, que atravessa perpendicularmente parte da sua secção transversal. A haste de aço inoxidável incorpora os sistemas de geração e coleta dos sinais óticos e são isolados do escoamento de gás ou fluido de trabalho por janelas óticas, conforme a Figura 3.13.

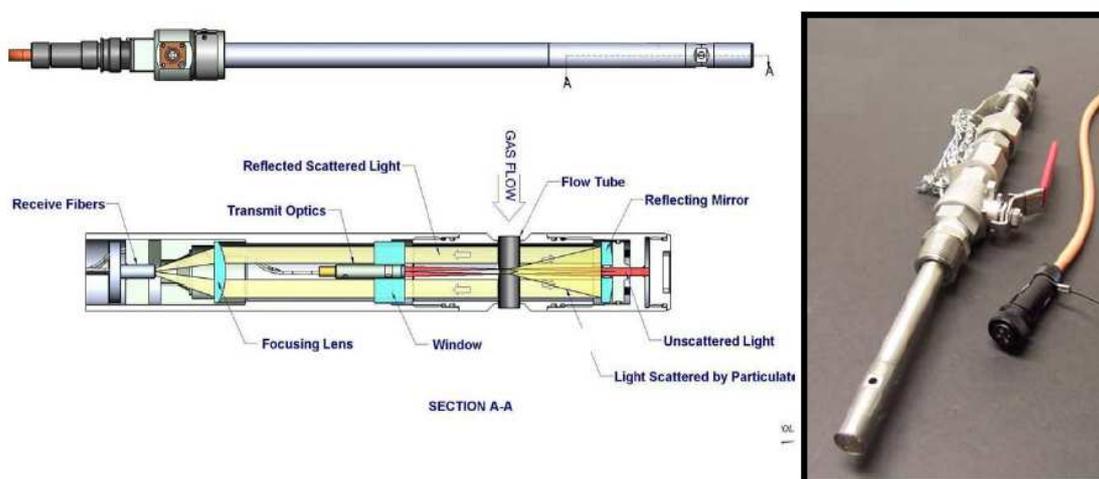


Figura 3.13 - Sensor óptico para inserção, Ø3/4 com válvula. [43]

Conforme instruções do fabricante em tubulação de 8", a posição de inserção do sensor é de  $\frac{1}{4}$  do raio interno, conforme a Figura 3.14 [43].

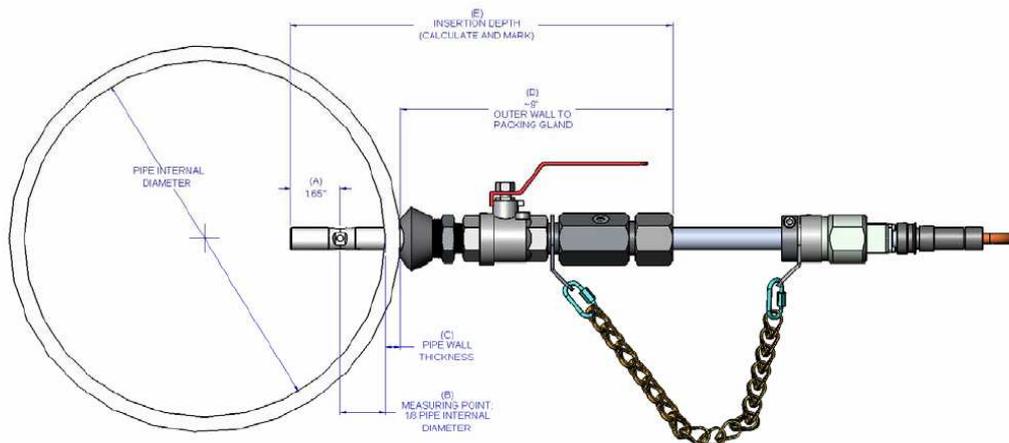


Figura 3.14 - Inserção do sensor óptico Ø3/4 em tubos maiores que Ø6". [43]

Opções de calibração estão pré-disponíveis para adoção no *software* do fabricante da unidade de processamento, porém foi utilizada apenas uma delas. A tela de configuração de parâmetros escolhida encontra-se na Figura 3.15.

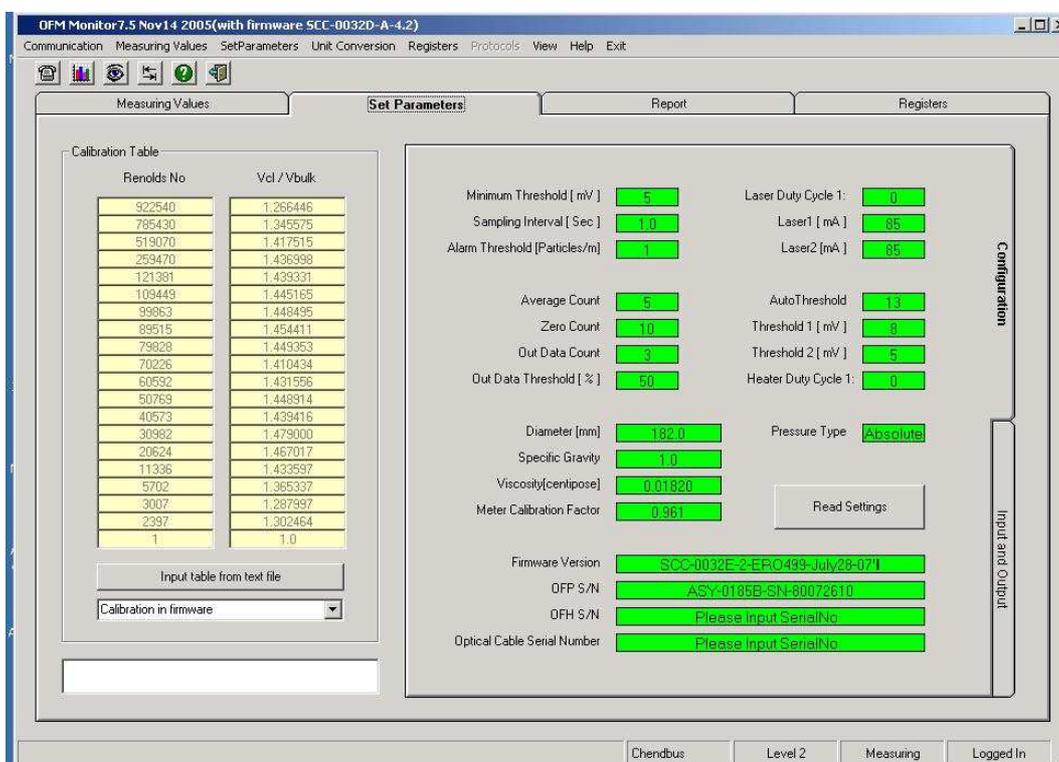


Figura 3.15 – Tela de Configuração dos parâmetros do medidor Photon<sup>R</sup>

### 3.5.1. Unidade de processamento de sinais.

O conversor ótico-eletrônico é a unidade que processa os sinais do sensor. É fabricado de forma que a placa eletrônica esteja à prova de explosão, conforme mostrado na Figura 3.16.



Figura 3.16 – Unidade de processamento de sinais à prova de explosão.

A unidade incorpora um chip de processamento de sinais digitais com conversão analógica-digital com taxas de amostragem de 12MHz. A unidade fornece diferentes saídas típicas: 4-20mA, frequência e pulso, saídas digitais RS232 ou RS484. A unidade é alimentada com 24 VDC.

Os pulsos são coletados em um intervalo de amostragem fixo, que é determinado a partir do escoamento e do número de partículas detectadas no gás ou fluido de trabalho. A velocidade pontual do escoamento (*“raw velocity”* - RV) é calculada utilizando uma rápida técnica de correlação. A velocidade pontual é então utilizada para cálculos de pós-processamento. O cálculo da vazão é realizado em três estágios como descrito na Figura 3.17. [21]

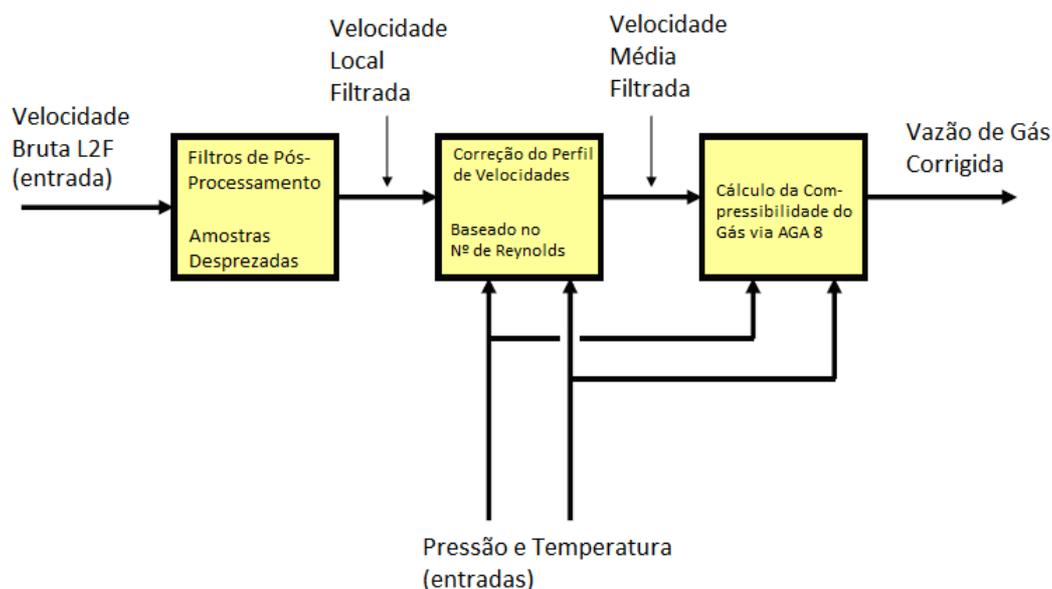


Figura 3.17 – Diagrama de blocos referente ao cálculo efetuado pela unidade de processamento.

Os filtros de pós-processamento ponderam a saída e removem leituras baseadas nos dados previamente calculados. A correção do perfil de velocidades é utilizada para calcular a velocidade média do escoamento (“*bulk velocity*” - BV) a partir da leitura de velocidade pontual usando uma tabela específica programada de calibração para a tubulação e configuração do medidor. A vazão volumétrica (“*standart flowrate*”) é determinada utilizando a compressibilidade, através de compensações de pressão e temperatura e da AGA-8. A tela do software inclusa no sistema de medição, onde constam os valores de saída aos parâmetros medidos, está mostrada na Figura 3.18.



Figura 3.18 – Monitoramento dos dados de saída do pós-processamento.

### 3.5.2 Cabo de fibra ótica

O cabo de fibra ótica acomoda um grupo de fibras *single-mode* e *multi-mode* protegido por um *conduite* metálico revestido de PVC à prova d'água. O comprimento padrão do cabo é de 20m, mas a potência do sistema permite extensões de comprimento superiores a 100m.

Devido à dificuldade em disponibilidade de meios de soldagem de fibra ótica, fez-se necessário um cuidado especial no manuseio deste *conduite* com as fibras, principalmente com relação às junções e dobras, visto que as fibras possuem ductibilidade limitada e alto custo de aquisição e manutenção, em comparação com os condutores pertencentes à outras tecnologias de transmissão.

Antes do uso, fez-se necessário uma inspeção visual das fibras no *conduite* de maneira a encontrar possíveis “vazamentos” de sinal, mais especificamente, *laser* com espectro de luz vermelho visível sendo detectado a olho nu.

### 3.5.3 Metodologia empregada com o L2F

Com o sensor instalado horizontalmente, de maneira perpendicular a superfície do túnel de vento, na secção transversal A (vide Figura 3.4), efetuou-se a montagem do sensor tipo L2F.

Foram feitas as medições instantâneas por ao menos 120 segundos seguidos com uma taxa de amostragem de 1 segundo. Foram realizados experimentos com o sensor inserido nas posições ( $\frac{1}{4} r - 10\text{mm}$ ), ( $\frac{1}{4} r$ ), ( $\frac{1}{4} r + 10\text{mm}$ ) e ( $\frac{1}{2} d_i$ ), a fim de se analisar os efeitos intrusivos da inserção do sensor no escoamento. Foram observados, também, os efeitos de instalação do sensor quanto ao alinhamento em relação ao eixo do duto.

A fim de manter o pleno controle sobre o alinhamento do sensor com o duto, foi instalado no plano de referência do medidor, um medidor de nível bolha de 3 planos conforme Figura 3.19 e, na fixação do sensor foi instalado um transferidor de ângulo com precisão de  $0,5^\circ$  ao mesmo tempo em que um ponteiro de alinhamento estava fixo no sensor em uma posição de controle do alinhamento e da inserção, conforme mostrado na Figura 3.20.



Figura 3.19 – Instalação do sensor a *Laser*, com nível de bolha em primeiro plano

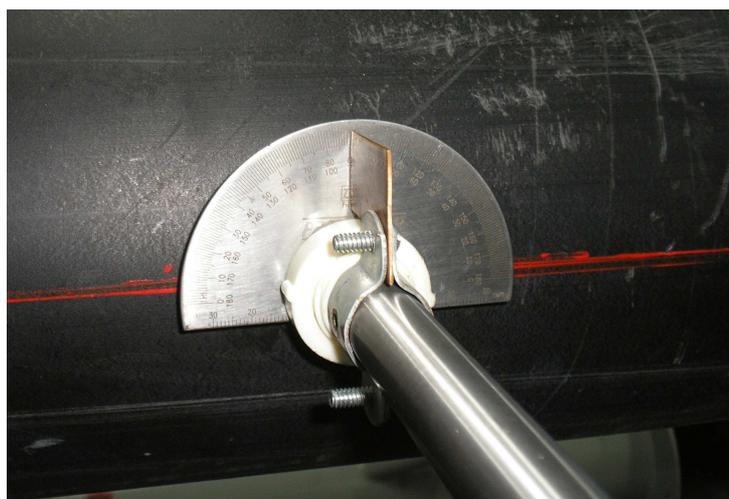


Figura 3.20 – Detalhe do transferidor e ponteiro para controle de inserção e alinhamento.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DO ESCOAMENTO NO TÚNEL DE VENTO

Durante os testes, foi respeitada a condição descrita na Equação 3.1 para todas as configurações apresentadas na Tabela 3.2, ou seja, os valores de  $\Delta p/\rho$  encontrados foram muito superiores que o valor mínimo. Todos os experimentos foram realizados nos seguintes patamares de rotação do compressor seguindo as suas justificativas, conforme a Tabela 4.1:

Tabela 4.1: Rotações do motor utilizadas em todos os experimentos

Rotação do motor [rpm]	Justificativa
700	Rotação mínima que proporciona uma diferença de pressão de 10 mmca no Pitot
950	Rotação média entre a mínima e a máxima
1200	Rotação máxima do conjunto motor/inversor de frequência

A discussão dos resultados relativos às caracterizações dos perfis de velocidades nas diferentes configurações descritas foi organizada neste capítulo de maneira a agrupar o raciocínio descrito, e não refletem a ordem cronológica com que os testes foram realizados. Uma comparação entre a formulação do fabricante do sensor e a formulação amplamente utilizada, conforme a norma [39] será descrita na seção 4.1.1. Já a análise dos perfis de velocidades obtidos experimentalmente com relação aos efeitos de formato, histerese, simetria e dispersão estão descritos na seção 4.1.2. Na seção 4.1.3 tem-se a continuidade das análises descritas em 4.1.2 porém considerando, também a análise comparativa dos perfis apresentados com perfil obtido, com o melhor *damping* utilizado e os perfis teóricos empíricos. Na seção 4.1.3, a melhor dentre as configurações de montagem do experimento apresentadas é enfatizada com relação à repetibilidade dos dados e a metodologia para se encontrar o melhor *damping* é apresentada. Na sequência, na seção 4.1.4 é reforçada a premissa de escoamento turbulento completamente desenvolvido com base nos resultados apresentados e no resultado global da vazão.

Na seção 4.2 discute-se o resultado das “rampas” de velocidade obtidas com as duas diferentes tecnologias e uma possível correção nestes valores. Em 4.2.1 é dada a ênfase no comportamento em que o erro na inserção do sensor pode ocasionar nas referidas leituras. Já em 4.2.2 é analisado o efeito de inclinação do sensor ótico do sensor ótico e em 4.2.3 é dada ênfase na influência da obstrução esperada do sensor L2F à 21D à montante do tubo de Pitot, no perfil de velocidades obtido.

#### **4.1.1 Validação da Metodologia de Cálculo das Velocidades Locais do Tubo de Pitot**

Considerando que as características construtivas, como uso ou não uso de retificador de fluxo e de técnica de uso do *damping*, não influencie especificamente em alguma das metodologias de cálculo descritas nas Equações 3.5 e 3.8, procedeu-se a uma comparação direta entre valores medidos com cada uma das equações, considerando o patamar máximo e mínimo do Número de Reynolds obtidos dentre todas as configurações descritas na Tabela 3.2, relativos às montagens referentes aos experimentos Exp5 e Exp2, respectivamente. De acordo com a norma ISO 3966 [39], a aproximação máxima do tubo de Pitot foi de 6mm da parede.

As comparações dos cálculos das velocidades locais estão mostradas nas Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Comparação de metodologia de cálculo: fabricante x norma

Posição (y/di)	Velocidade Local (m/s)		$\Delta\%$ [(“Manual” – “ISO”)/ “ISO”]
	ISO/FDIS 3966	Manual Kimo™	
$Re \cong 1,68 \cdot 10^5$ , T= 24,2°C, (Exp5)			
0,019	12,48	12,48	0,02%
0,076	12,71	12,71	0,02%
0,155	13,66	13,67	0,02%
0,215	14,25	14,25	0,02%
0,357	15,16	15,17	0,03%
0,500	15,91	15,92	0,03%
0,643	16,10	16,11	0,03%
0,785	15,19	15,19	0,03%
0,845	14,50	14,51	0,03%
0,924	13,65	13,66	0,02%
0,981	12,83	12,83	0,02%
$V_{media} =$	14,22	14,23	0,02%
$Re \cong 3,29 \cdot 10^5$ , T=27,7°C, (Exp2)			
0,019	24,66	24,70	0,15%
0,076	26,01	26,05	0,16%
0,155	27,37	27,42	0,16%
0,215	27,96	28,00	0,17%
0,357	30,05	30,10	0,18%
0,500	30,56	30,62	0,18%
0,643	30,71	30,77	0,18%
0,785	30,90	30,96	0,19%
0,845	29,65	29,71	0,18%
0,924	27,49	27,54	0,17%
0,981	25,57	25,61	0,15%
$V_{media} =$	28,27	28,32	0,17%

Percebe-se que a simplificação do fabricante sobreestima a metodologia descrita na norma. Percebe-se, também, que existe a tendência de crescimento desta discrepância de valores com o aumento do número de Reynolds, sendo que a diferença média entre as leituras de 0,02% no menor Reynolds passou para 0,17% no Reynolds máximo utilizado.

No entanto, o patamar máximo de diferenças encontrada 0,19% ainda está bastante abaixo das incertezas preconizadas pela norma, que é de até 4% com confiabilidade de 95%.

Sendo assim, ambos os equacionamentos propostos servem para o propósito de caracterização do escoamento e comparação entre os resultados advindos da tecnologia de medição óptica. Portanto, foi utilizado o

equacionamento proposto pela norma ISO/FDIS 3966:2008 [39], de forma a utilizar os parâmetros de controle e raciocínios advindos da norma.

#### 4.1.2 Caracterização do Perfil de Velocidades Com e Sem Retificador de fluxo.

Nas figuras 4.1-a, 4.1-b e 4.1-c estão mostrados os perfis de velocidade obtidos para a configuração do Experimento 2 (Exp2), onde não se fez uso de retificador de fluxo nem à montante, nem à jusante do escoamento.

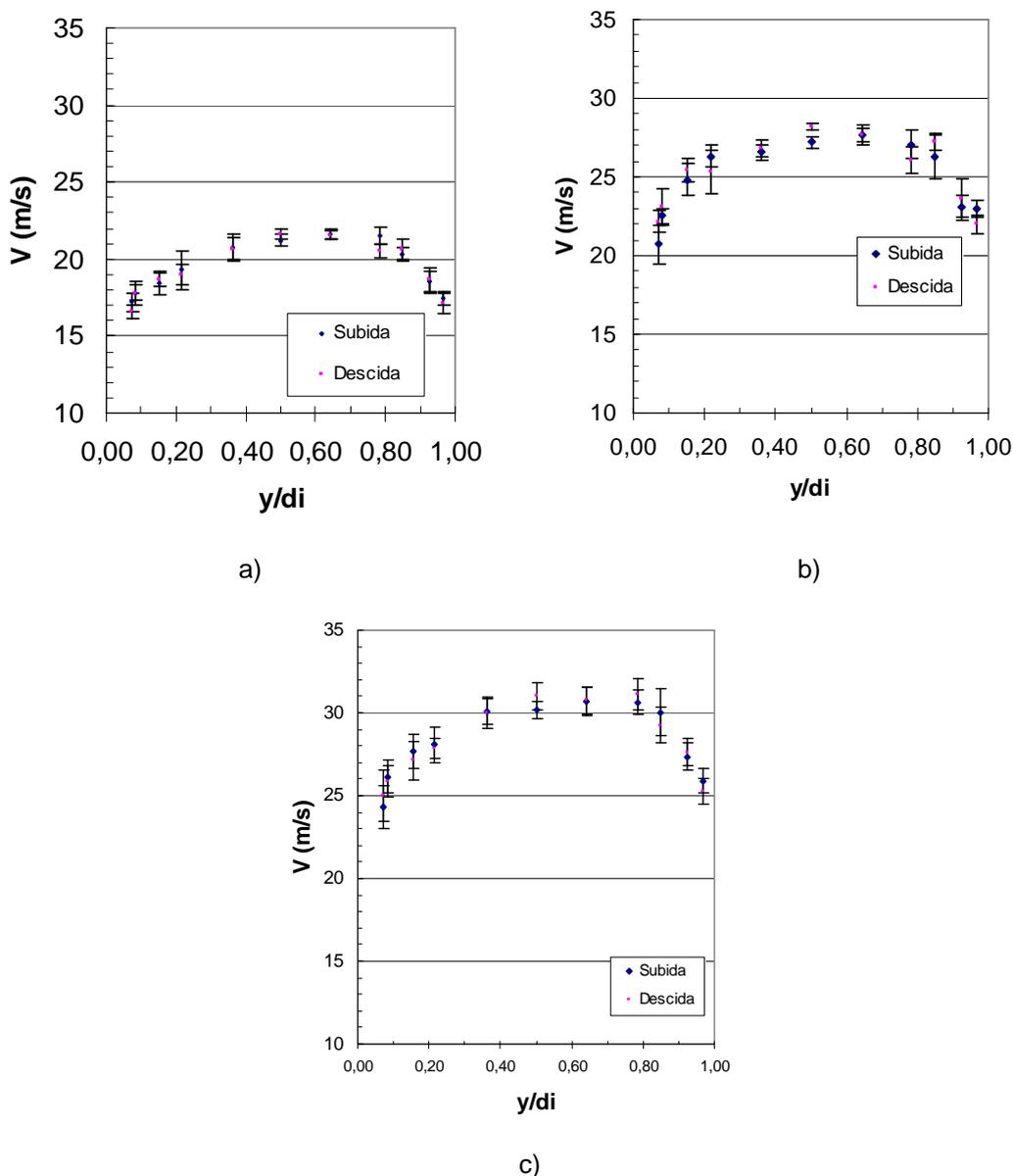


Figura 4.1: Perfis de Velocidade Obtidos com o Experimento 2 a) 700rpm, b) 950rpm, c) 1200rpm.

O maior desvio padrão médio obtido foi de 0,98 com  $Re_{max} = 3,29 \times 10^5$ . Percebe-se que os perfis de velocidades obtidos na configuração descrita acima, possuem boa simetria, porém com um leve desvio para à direita tanto na subida quanto na descida do tubo de Pitot no escoamento. Isto reforça a possibilidade deste efeito ser devido à intrusão de inserção do Pitot no escoamento, frente a possível efeito de histerese.

Nos gráficos supramencionados, percebe-se que existe ainda uma considerável janela de incertezas, De forma a reduzir essas incertezas, utilizou-se a instalação de retificadores de fluxo, cujos efeitos passam a ser descritos.

Nas Figuras 4.2-a, 4.2-b e 4.2-c a magnitude de assimetria está mostrada. Os valores máximos estão próximos a 10%, isto quando em alta vazão (1200rpm).

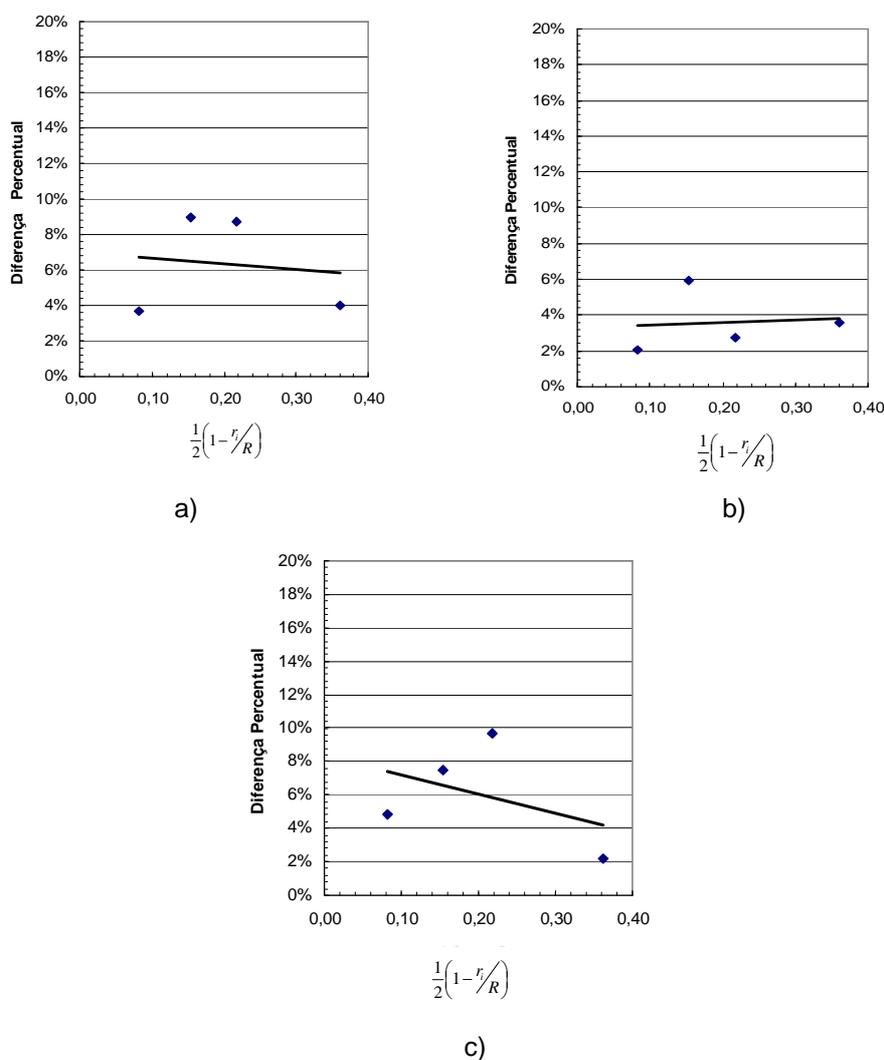


Figura 4.2: Diferenças percentuais de pontos simétricos no escoamento na montagem do Experimento Exp2 (sem retificadores) em: a)700rpm, b)950rpm, c) 1200rpm

Já para a configuração do Experimento 1 (Exp1), fez-se o uso de retificador de fluxo à Jusante do escoamento, obtendo-se os perfis de velocidade conforme vistos nas Figuras 4.3-a, 4.3-b e 4.3-c, a seguir.

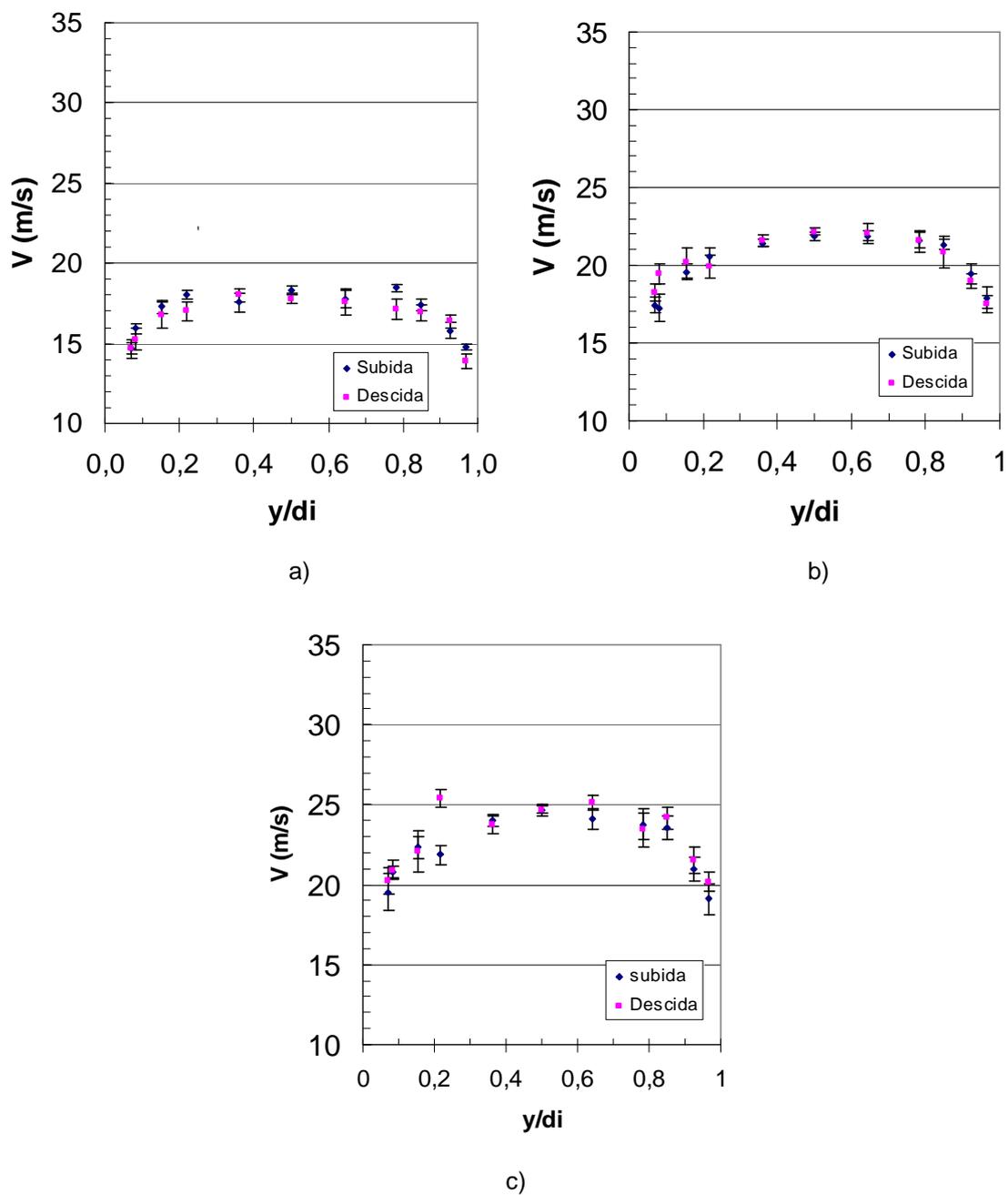


Figura 4.3: Perfis de Velocidade Obtidos com o Experimento Exp1 a: a)700rpm, b)950rpm, c) 1200rpm.

O maior desvio padrão médio obtido foi de 0,87 com  $Re_{Max}=2,63 \times 10^5$ .

Em comparação ao Experimento 2 (Exp2), onde não se utilizou de retificador de fluxo, percebeu-se uma redução da flutuação dos dados evidenciados pelos desvios-padrão obtidos. Houve leve ganho de simetria nos valores obtidos, porém com elevação da perda de carga - evidenciada no menor Número de Reynolds para o Experimento 1.

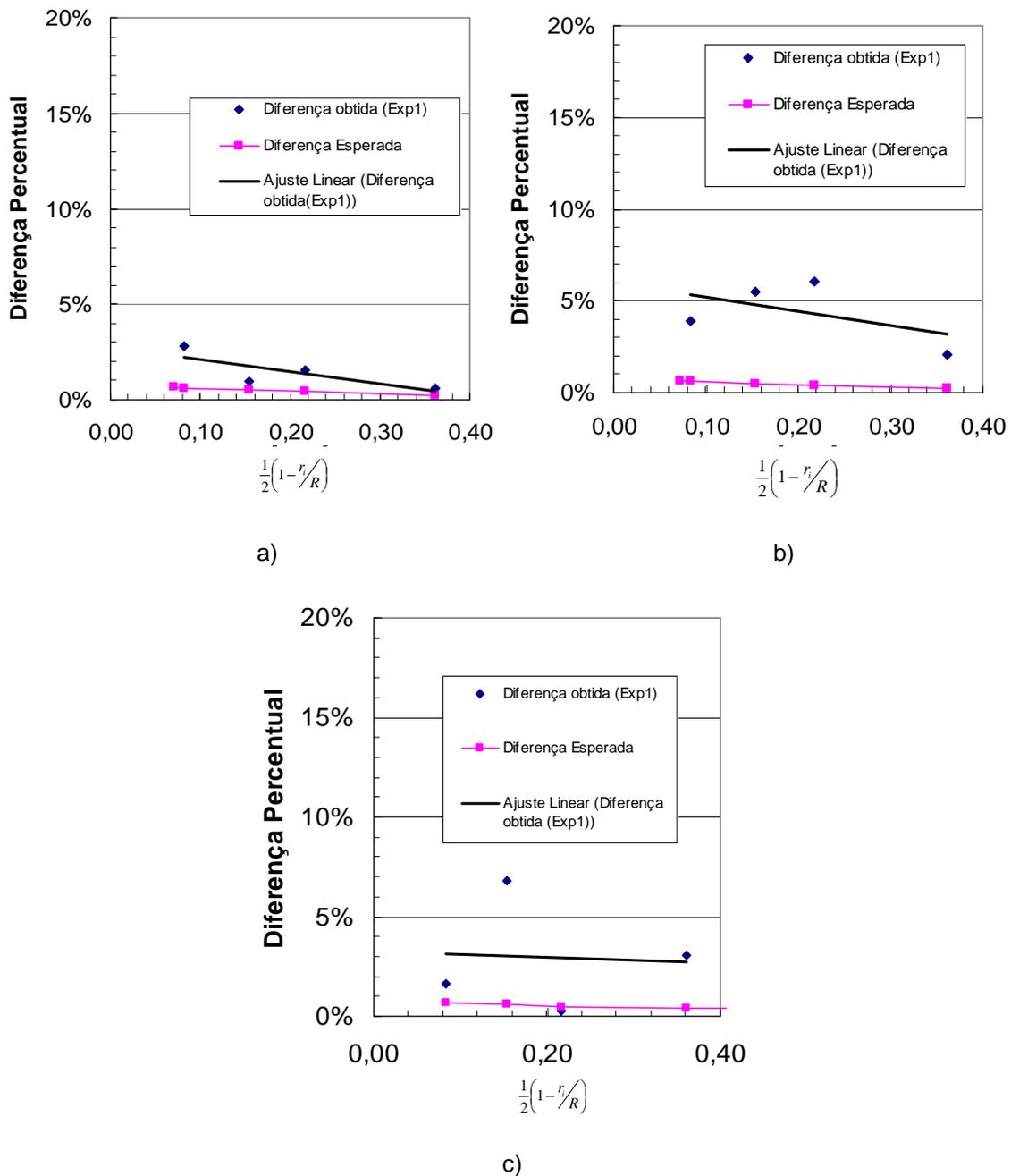


Figura 4.4: Diferenças percentuais de pontos simétricos no escoamento durante o Experimento 1 em: a) 700rpm, b) 950rpm, c) 1200rpm

Nas Figuras 4.4-a, 4.4-b e 4.4-c estão mostradas as magnitudes de assimetria nos perfis de velocidade obtidos com o Experimento 1 (Exp1). De forma geral, percebe-se que a simetria obtida durante este experimento foi melhor, com indicação de diferença máxima de aproximadamente 7%. Em relação à assimetria esperada proveniente do efeito intrusivo do Tubo de Pitot no escoamento, estimada com desconto da área projetada ortogonalmente pelo medidor no escoamento, a assimetria mais próxima foi obtida em baixa velocidade (700 rpm).

As Figuras 4.5-a, 4.5-b e 4.5-c mostram, para o Experimento 5 (Exp5), os perfis de velocidade obtidos quando os retificadores de fluxo estão montados à montante e à jusante do escoamento. A dispersão dos valores das velocidades locais caiu consideravelmente devido ao uso dos dois retificadores de fluxo. O maior desvio padrão médio dentre os três patamares de funcionamento do rotor foi 0,17 com aproximadamente  $Re_{Max}=2,40 \times 10^5$ . A instalação do retificador de fluxo à montante aumentou em cerca de 8,75% de perda de carga no escoamento distribuída de maneira uniforme. Neste experimento alcançou-se número de Reynolds de  $1,68 \times 10^5$  a  $2,40 \times 10^5$ . As velocidades locais mínima e máxima na menor rotação (700 rpm), foram de 12,48 e 15,91 m/s. Já na maior rotação (1200 rpm) as velocidades locais alcançadas foram de 17,64 a 23,11 m/s.

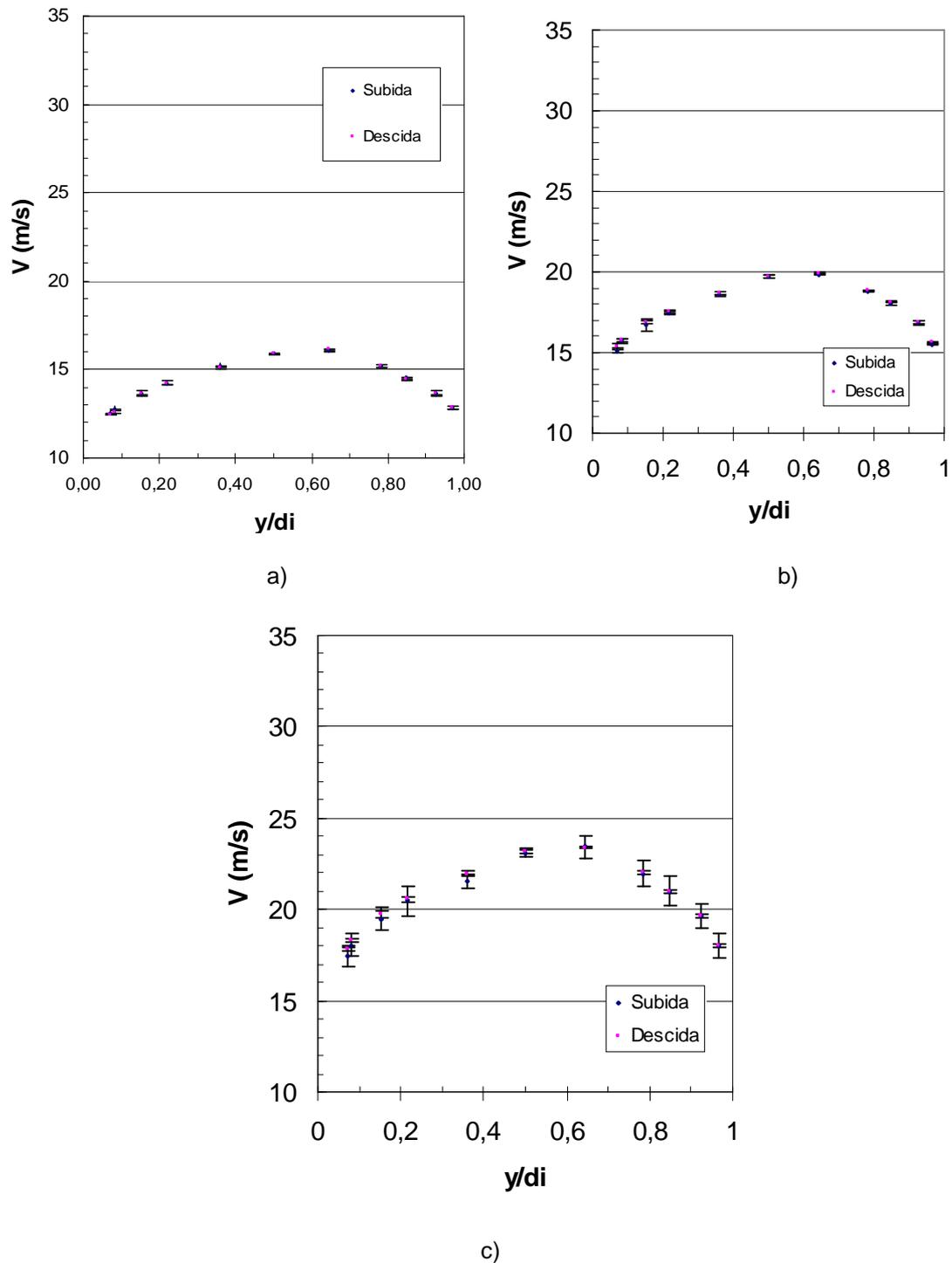


Figura 4.5: Perfis de Velocidade Obtidos com o Experimento 5 (retificadores à montante e jusante, sem damping) a) a)700rpm, b)950rpm, c) 1200rpm.

Conforme verificado nas Figuras 4.6-a, 4.6-b e 4.6-c, a simetria radial dos perfis permaneceu no mesmo patamar da configuração do Experimento 1. A assimetria dos perfis de velocidade se manteve nos mesmos patamares de

quando no uso de apenas um retificador de fluxo, em torno de 5% no melhor caso ( $Re = 1,68 \times 10^5$ ) e 7% no pior caso ( $Re = 2,40 \times 10^5$ ).

[R1] Comentou: relatou essas as tabelas? Acho que ser inserido aqui.

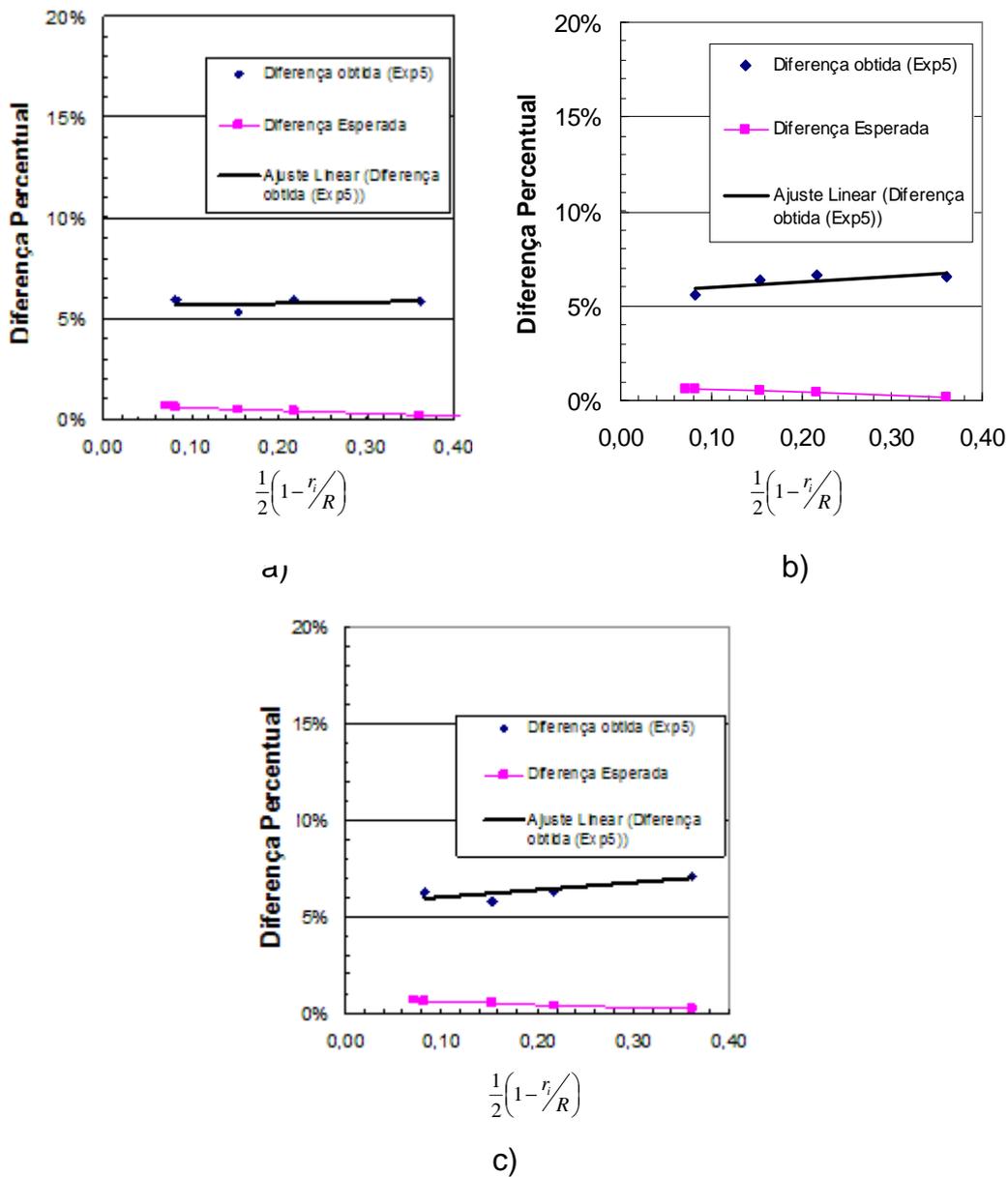


Figura 4.6: Diferenças percentuais de pontos simétricos no escoamento durante o Experimento 5 em: a) 700rpm, b) 950rpm, c) 1200rpm.

Nas figuras 4.7-a e 4.7-b estão mostrados os perfis de velocidades referentes ao Experimento 8 (Exp8), quando em montagem com retificador de fluxo apenas à montante do escoamento (Exp8). A perda de carga foi menor que na instalação de retificador de fluxo apenas à jusante (Exp1), porém o desvio-padrão médio não foi menor estando no patamar entre 0,0975 e 1,5714.

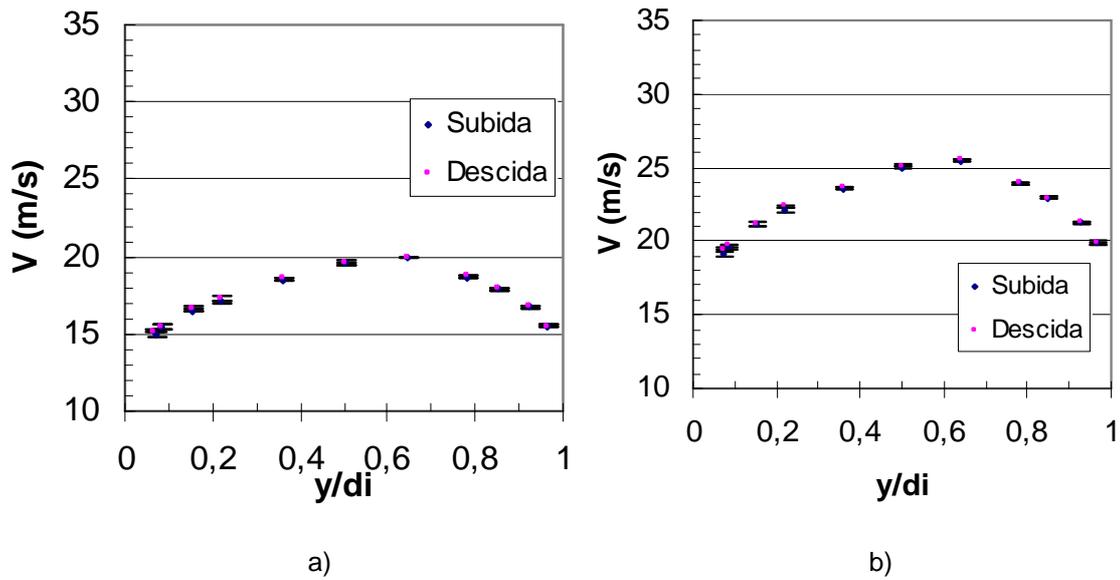


Figura 4.7: Perfis de Velocidade Obtidos com o Experimento 8 a: a)700rpm, b)950rpm.

Observando os gráficos 4.8-a e 4.8-b, o comportamento da assimetria se manteve melhor do que com relação ao caso de escoamento sem retificador de fluxo, com desvios-padrão máximos de 9% porém ligeiramente pior que quando no uso de retificador à Jusante (Exp1) e, pior ainda com relação ao uso dos retificadores à montante e à jusante no túnel de vento (Exp5), apresentando então desvios de 6 a 9%, respectivamente.

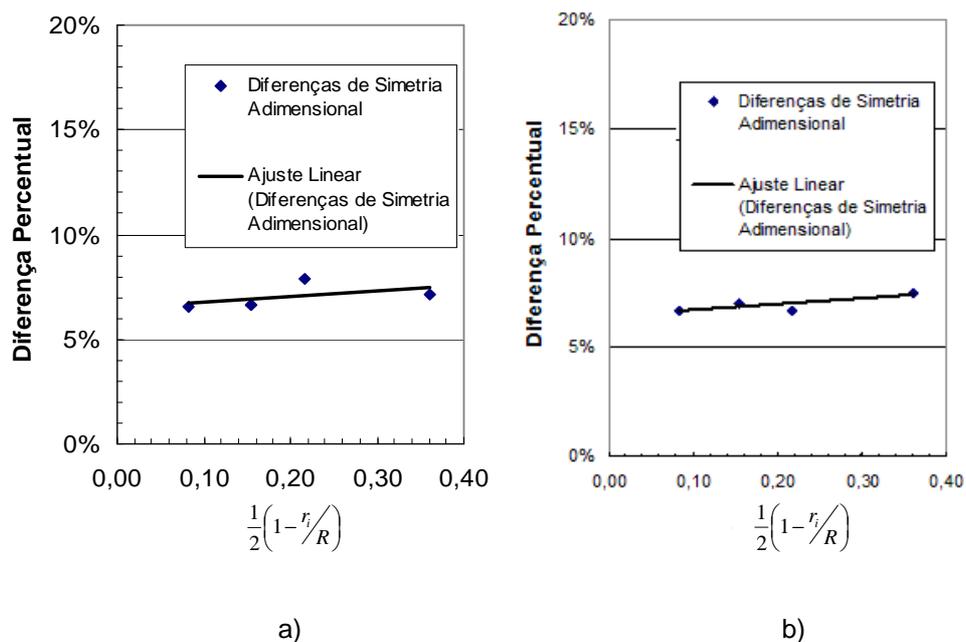


Figura 4.8: Diferenças percentuais de pontos simétricos no escoamento durante o Experimento 8 em: a)700rpm, b)950rpm.

A Tabela 4.3, mostra um quadro-resumo com os valores característicos nos escoamentos nas quatro configurações descritas, considerando os três patamares de velocidades utilizados para caracterização do escoamento.

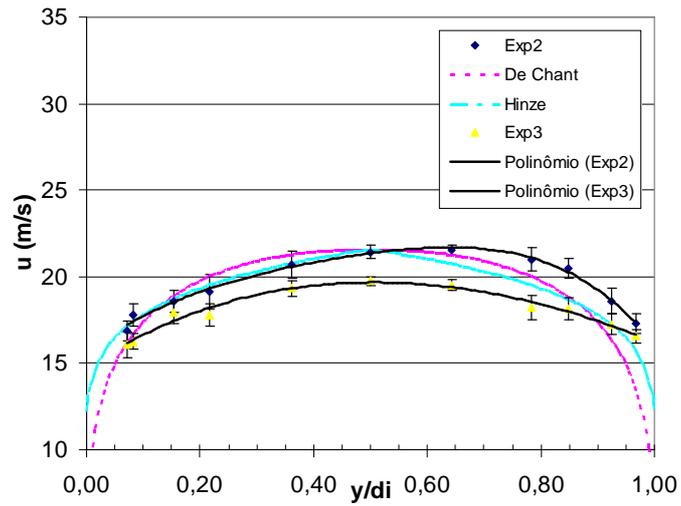
Tabela 4.3: Quadro-Resumo com os valores característicos para os Experimentos nas configurações sem *Damping*.

Rotação	EXP1		EXP2		EXP5		EXP8	
	Re	$\sigma (10^{-1})$						
700 rpm	$1,97 \times 10^5$	5,95	$2,26 \times 10^5$	6,30	$1,68 \times 10^5$	0,93	$2,03 \times 10^5$	0,98
950 rpm	$2,36 \times 10^5$	6,60	$2,92 \times 10^5$	8,95	$2,07 \times 10^5$	1,20	$2,61 \times 10^5$	1,22
1200 rpm	$2,63 \times 10^5$	8,74	$3,29 \times 10^5$	9,81	$2,40 \times 10^5$	1,71	$2,91 \times 10^5$	15,71

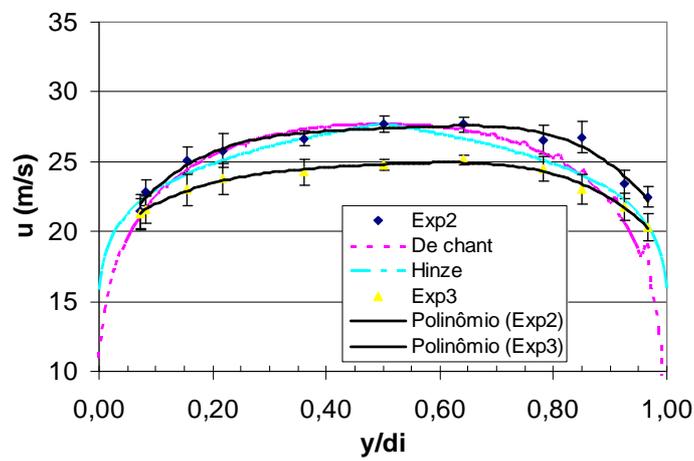
#### 4.1.3 Caracterização do Perfil de Velocidade Com Damping

As caracterizações descritas anteriormente foram realizadas sem a instalação de um tubo capilar nas tomadas do transdutor de pressão do Pitot, técnica conhecida como *damping* e preconizada na ISO 3966 , conforme descrito a seguir.

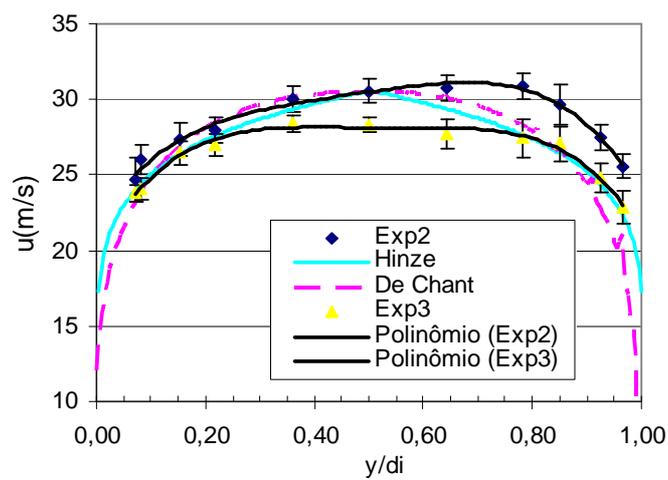
Na Figura 4.9-a, 4.9-b e 4.9-c estão mostrados os perfis de velocidades sem uso de retificadores de fluxo no túnel de vento, sem uso de *damping* (Exp2) e com o uso de *damping* (Exp3). Para o patamar de velocidades mais baixo (700 rpm), os perfis se mostraram bastante próximos e com o formato mais aproximado ao perfil teórico equivalente calculado a partir da modelagem de *Hinze* [40]. Já para os patamares médio e alto de velocidade, de 950 e 1200 rpm, respectivamente, o formato dos perfis Exp2 e Exp3 se assemelharam mais ao formato proposto por *De Chant* [41]. Observou-se uma melhora quanto a simetria no experimento 3, quando no uso de *damping*. Uma possível justificativa para essa melhora é que, com menor flutuação dos valores medidos, o resultado da média aparece filtrado, dentre as flutuações e o medidor fica menos susceptível ao efeito de histerese.



a)



b)



c)

Figura 4.9: Análise do Efeito de Instalação do *damping* sem retificadores de fluxo (Exp2) e (Exp3) a) a)700rpm, b)950rpm, c) 1200rpm.

Os valores obtidos e constantes nos gráficos acima estão listados nas Tabelas 4.4 e 4.5. Percebe-se que, de maneira geral, as maiores discrepâncias em relação aos perfis teóricos tendem a se localizar nas extremidades, onde, além dos demais efeitos possíveis de histerese e obstrução do medidor, tem-se os efeitos de “vizinhança” com a parede interna do duto de escoamento, onde efeitos de camada limite e rugosidade da parede interna do duto também estão presentes. Essas diferenças alcançam até 24,66% em relação ao perfil teórico de *De Chant* [41], e 13,29% em relação ao perfil teórico de *Hinze* [40].

Tabela 4.4 - Análise do Efeito de Instalação do *damping* sem retificadores de fluxo - Exp2 & Exp3 – Velocidades Locais(m/s)

Posição (y/di)	Sem Damping (Exp2)	Com Damping (Exp3)	Perfil Teórico (Hinze)[40]	Perfil Teórico (L.J. De Chant)[41]
<b>700 rpm</b>				
0,019	16,88	16,08	15,14	14,81
0,076	17,80	16,26	15,48	15,23
0,155	18,54	17,97	16,85	17,29
0,215	19,14	17,79	17,70	18,31
0,357	20,70	19,32	18,90	19,47
0,500	21,43	19,74	19,74	19,74
0,643	21,56	19,51	18,90	19,47
0,785	21,01	18,22	17,70	18,31
0,845	20,46	18,15	16,85	17,29
0,924	18,58	17,26	15,48	15,23
0,981	17,31	16,55	15,14	14,81
<b>950 rpm</b>				
0,019	21,43	21,25	19,35	18,86
0,076	22,82	21,57	19,78	19,84
0,155	25,13	22,99	21,51	22,02
0,215	25,80	23,77	22,57	21,95
0,357	26,68	24,26	24,08	24,82
0,500	27,68	24,75	25,13	25,13
0,643	27,68	25,13	24,08	24,82
0,785	26,56	24,49	22,57	21,95
0,845	26,76	23,04	21,51	22,02
0,924	23,38	21,75	19,78	19,84
0,981	22,48	20,32	19,35	18,86
<b>1200 rpm</b>				
0,019	24,66	23,79	21,48	21,30
0,076	26,01	24,05	22,02	22,41
0,155	27,37	26,45	24,12	24,87
0,215	27,96	26,98	25,36	24,79
0,357	30,05	28,39	27,11	28,03
0,500	30,56	28,37	28,31	28,39
0,643	30,71	27,70	27,11	28,03
0,785	30,90	27,42	25,36	24,79
0,845	29,65	27,06	24,12	24,87
0,924	27,49	24,84	22,02	22,41
0,981	25,57	22,86	21,48	21,30

Tabela 4.5 - Análise do Efeito de Instalação do Damping sem retificadores de fluxo -  
Exp2 & Exp3 - Percentuais da Velocidades Locais (m/s) - Exp2 & Exp3

Posição (y/di)	$\Delta\%$ (Exp2 - Hinze)/ Hinze	$\Delta\%$ (Exp3 - Hinze)/ Hinze	$\Delta\%$ (Exp2 -De Chant)/ De Chant	$\Delta\%$ (Exp3 -De Chant)/ De Chant
<b>700 rpm</b>				
0,019	11,51%	6,17%	14,01%	8,55%
0,076	14,97%	5,01%	16,85%	6,72%
0,155	9,98%	6,59%	7,21%	3,91%
0,215	8,18%	0,54%	4,57%	-2,82%
0,357	9,51%	2,20%	6,32%	-0,79%
0,500	8,59%	0,00%	8,59%	0,00%
0,643	14,07%	3,24%	10,74%	0,23%
0,785	18,70%	2,98%	14,73%	-0,46%
0,845	21,39%	7,69%	18,33%	4,98%
0,924	20,04%	11,48%	22,00%	13,29%
0,981	14,33%	9,32%	16,89%	11,77%
<b>950 rpm</b>				
0,019	10,75%	9,77%	13,66%	12,66%
0,076	15,38%	9,05%	15,04%	8,73%
0,155	16,80%	6,88%	14,12%	4,43%
0,215	14,30%	5,33%	17,53%	8,30%
0,357	10,78%	0,72%	7,50%	-2,26%
0,500	10,12%	-1,53%	10,12%	-1,53%
0,643	14,92%	4,37%	11,51%	1,28%
0,785	17,68%	8,49%	21,01%	11,56%
0,845	24,42%	7,12%	21,57%	4,67%
0,924	18,21%	9,93%	17,87%	9,61%
0,981	16,12%	5,00%	19,18%	7,76%
<b>1200 rpm</b>				
0,019	14,84%	10,78%	15,79%	11,70%
0,076	18,13%	9,24%	16,08%	7,33%
0,155	13,48%	9,67%	10,08%	6,38%
0,215	10,22%	6,37%	12,77%	8,83%
0,357	10,83%	4,71%	7,20%	1,28%
0,500	7,95%	0,19%	7,66%	-0,07%
0,643	13,27%	2,19%	9,56%	-1,16%
0,785	21,84%	8,09%	24,66%	10,59%
0,845	22,93%	12,19%	19,25%	8,83%
0,924	24,87%	12,84%	22,69%	10,87%
0,981	19,05%	6,44%	20,04%	7,32%

Os perfis de velocidade obtidos, quando na montagem com retificador de fluxo apenas à jusante do escoamento estão mostrados nas Figuras 4.10-a, 4.10-b e 4.10-c. Nestes casos, os perfis apresentaram maior semelhança

geométrica ao equacionamento proposto por *Hinze* [40], quando os valores medidos foram amortecidos com o uso do *damping*. Nos três pontos centrais, onde aquele perfil apresenta uma descontinuidade, o perfil proposto por *De Chant* [41], foi o que mostrou, nesse trecho, comportamento mais próximo aos obtidos nos Experimentos Exp4 e Exp1.

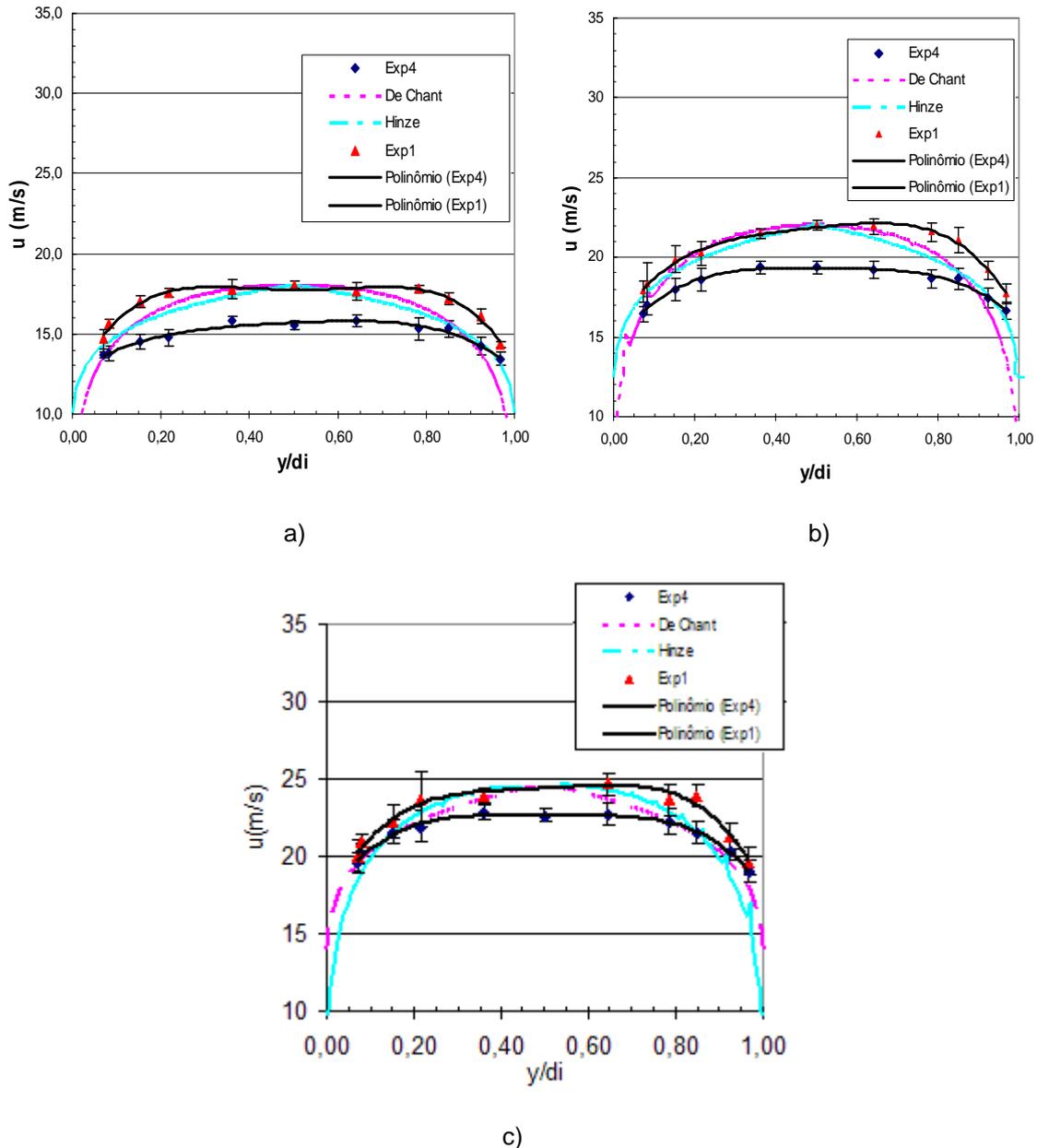


Figura 4.10: Análise do Efeito de Instalação do *damping* com retificador à jusante (Exp4) e (Exp1) a) a)700rpm, b)950rpm, c) 1200rpm.

Nas Tabelas 4.6 e 4.7, são apresentados os valores referentes aos gráficos discutidos acima para o Experimento 1 (Exp1) e o Experimento 4

(Exp4). Em média e alta velocidade do rotor, 950 e 1200rpm, respectivamente, notou-se uma assimetria de aumento dos valores medidos na extremidade inferior do duto, tendendo a curva nos gráficos 4.10-b e 4.10-c para a direita. As diferenças relativas ao Experimento (Exp 1) alcançam valores de até 12,2% em relação ao perfil teórico de *De Chant*,[41] e 11,87% em relação ao perfil teórico de *Hinze* [40]. Enquanto para o Experimento (Exp4) as diferenças alcançaram valores de até 12,11% em relação ao perfil teórico de *De Chant*,[41] e 14,05% em relação ao perfil teórico de *Hinze* [40]. Percebeu-se uma melhor aproximação geral dos valores medidos nos Experimentos (Exp1) e (Exp4) em relação aos (Exp2) e (Exp3).

Tabela 4.6 - Análise do Efeito de Instalação do *damping* com retificador à jusante - Exp1 & Exp4 - Velocidades Locais (m/s) - Exp1 & Exp4

Posição (y/di)	Sem Damping (Exp1)	Com Damping (Exp4)	Perfil Teórico ( <i>Hinze</i> )	Perfil Teórico (L.J. De Chant)
<b>700 rpm</b>				
0,019	14,69	13,67	14,11	13,54
0,076	15,61	13,77	14,40	13,93
0,155	17,00	14,48	15,59	15,81
0,215	17,53	14,76	16,31	16,74
0,357	17,77	15,78	17,34	17,80
0,500	18,05	15,51	18,05	18,05
0,643	17,67	15,83	17,34	17,80
0,785	17,81	15,31	16,31	16,74
0,845	17,17	15,31	15,59	15,81
0,924	16,11	14,27	14,40	13,93
0,981	14,35	13,44	14,11	13,54
<b>950 rpm</b>				
0,019	17,86	16,45	17,29	16,52
0,076	18,33	16,98	17,64	17,38
0,155	19,86	17,99	19,07	19,29
0,215	20,24	18,58	19,93	19,23
0,357	21,49	19,37	21,17	21,75
0,500	22,02	19,36	22,02	22,02
0,643	21,95	19,23	21,17	21,75
0,785	21,58	18,65	19,93	19,23
0,845	21,08	18,67	19,07	19,29
0,924	19,19	17,45	17,64	17,38
0,981	17,72	16,65	17,29	16,52
<b>1200 rpm</b>				
0,019	19,91	19,56	19,41	18,51
0,076	20,85	20,17	19,81	19,48
0,155	22,20	21,55	21,39	21,61
0,215	23,68	21,90	22,36	21,55
0,357	23,89	22,60	23,73	24,36
0,500	24,68	22,60	24,68	24,68
0,643	24,64	22,63	23,73	24,36
0,785	23,61	22,20	22,36	21,55
0,845	23,87	21,51	21,39	21,61
0,924	21,26	20,33	19,81	19,48
0,981	19,65	18,97	19,41	18,51

Tabela 4.7 – Análise do Efeito de Instalação do damping com retificador à jusante - Exp1 & Exp4 - Variação das Velocidades Locais (m/s) - Exp1 & Exp4

Posição (y/di)	$\Delta\%$ (Exp1 - Hinze)/ Hinze	$\Delta\%$ (Exp4 - Hinze)/ Hinze	$\Delta\%$ (Exp1 - De Chant)/ De Chant	$\Delta\%$ (Exp4 - De Chant)/ De Chant
<b>700 rpm</b>				
0,019	4,12%	-3,07%	8,47%	0,98%
0,076	8,37%	-4,36%	12,05%	-1,11%
0,155	9,06%	-7,07%	7,52%	-8,39%
0,215	7,48%	-9,50%	4,69%	-11,84%
0,357	2,53%	-9,00%	-0,16%	-11,38%
0,500	0,00%	-14,05%	0,00%	-14,05%
0,643	1,92%	-8,70%	-0,75%	-11,09%
0,785	9,20%	-6,14%	6,37%	-8,57%
0,845	10,14%	-1,79%	8,58%	-3,18%
0,924	11,87%	-0,91%	15,66%	2,45%
0,981	1,74%	-4,74%	5,99%	-0,76%
<b>950 rpm</b>				
0,019	3,31%	-4,84%	8,08%	-0,45%
0,076	3,92%	-3,75%	5,45%	-2,33%
0,155	4,19%	-5,62%	2,97%	-6,73%
0,215	1,54%	-6,78%	5,23%	-3,39%
0,357	1,52%	-8,48%	-1,18%	-10,92%
0,500	0,00%	-12,11%	0,00%	-12,11%
0,643	3,70%	-9,14%	0,94%	-11,55%
0,785	8,27%	-6,46%	12,21%	-3,06%
0,845	10,58%	-2,09%	9,29%	-3,24%
0,924	8,80%	-1,10%	10,40%	0,36%
0,981	2,50%	-3,69%	7,23%	0,76%
<b>1200 rpm</b>				
0,019	2,53%	0,77%	7,51%	5,67%
0,076	5,29%	1,85%	7,07%	3,58%
0,155	3,78%	0,72%	2,71%	-0,32%
0,215	5,95%	-2,05%	9,91%	1,61%
0,357	0,69%	-4,76%	-1,95%	-7,26%
0,500	0,00%	-8,39%	0,00%	-8,39%
0,643	3,84%	-4,61%	1,12%	-7,11%
0,785	5,63%	-0,71%	9,58%	3,01%
0,845	11,61%	0,57%	10,46%	-0,47%
0,924	7,36%	2,63%	9,18%	4,37%
0,981	1,22%	-2,31%	6,15%	2,45%

As Figuras 4.11-a, 4.11-b e 4.11-c mostram os perfis de velocidade no duto quando no uso de retificador de fluxo apenas à montante do escoamento. O perfil teórico que mais se assemelha aos dados experimentais, nestes dois casos (Exp7 e Exp8), foi novamente o perfil de *Hinze* [40] cujas diferenças se encontram entre 1,81 e 22,7%, enquanto que as diferenças em relação ao perfil

de *DeChant* [41] alcançam valores de até 22,27%. Para os patamares de baixa e média velocidades do rotor (700 e 950 rpm) as curvas obtidas experimentalmente ainda mostraram considerável assimetria, acima de 10%, fazendo-se necessário a análise do escoamento quando no uso de dois retificadores de fluxo.

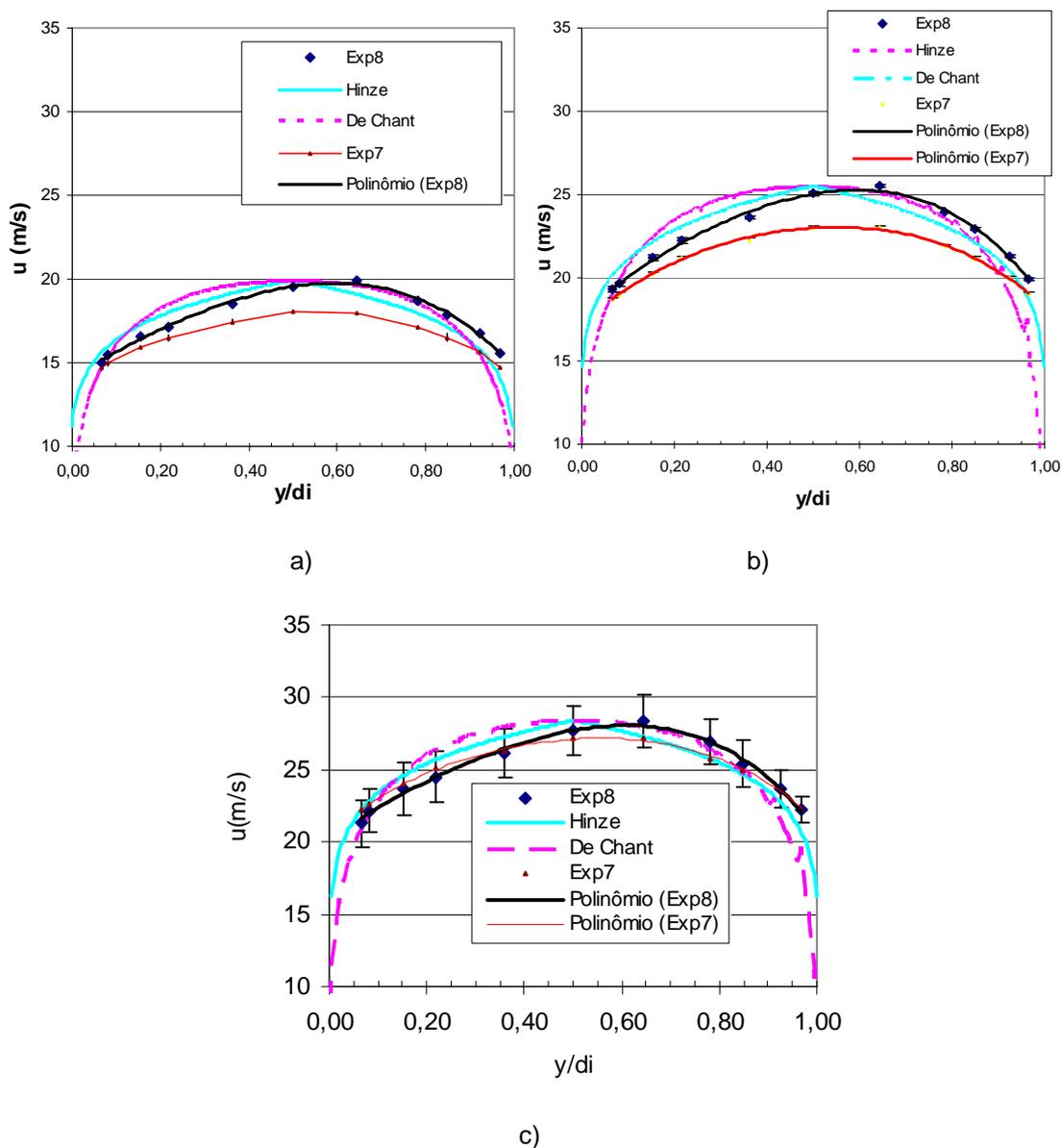


Figura 4.11: Análise do Efeito de Instalação do *damping* com retificador à montante (Exp7) e (Exp8) a) a)700rpm, b)950rpm, c) 1200rpm.

Nas Tabelas 4.8 até 4.9, percebe-se, de forma geral, melhores resultados nos experimentos com retificador de fluxo à montante, pois apesar da elevada perda de carga, nesta configuração de escoamento as velocidades

locais medidas ficaram mais próximas dos perfis teóricos de *Hinze* [40] em forma, inclusive os valores experimentais das velocidades locais, tanto para o Experimento 7 (Exp7), cuja diferença máxima foi de 18,51%, quanto para o Experimento 8 (Exp8), em alguns momentos cruzam tal perfil teórico relacionado a este e cuja diferença máxima foi de 20,4%. Para baixas e médias velocidades do rotor (700 e 950 rpm) os desvios percentuais em relação ao perfil teórico de *Hinze* [40] se mantiveram menores que 10%.

Tabela 4.8 - Análise do Efeito de Instalação do *damping* com retificador à montante –  
Exp7 & Exp8 - Velocidades Locais (m/s) – Exp7 & Exp8

Posição (y/di)	Sem Damping (Exp7)	Com Damping (Exp8)	Perfil Teórico (Hinze)	Perfil Teórico (L.J. De Chant)
<b>700 rpm</b>				
0,019	15,04	14,81	15,83	14,45
0,076	15,45	15,07	16,12	14,93
0,155	16,57	16,00	17,33	17,22
0,215	17,17	16,60	18,09	18,33
0,357	18,51	17,55	19,19	19,59
0,500	19,55	18,19	19,91	19,91
0,643	19,90	18,11	19,19	19,59
0,785	18,71	17,20	18,09	18,33
0,845	17,88	16,62	17,33	17,22
0,924	16,73	15,76	16,12	14,93
0,981	15,52	14,84	15,83	14,45
<b>950 rpm</b>				
0,019	19,31	18,73	20,38	18,50
0,076	19,62	19,00	20,75	19,12
0,155	21,18	20,28	22,26	22,33
0,215	22,26	21,25	23,22	22,39
0,357	23,61	22,27	24,59	25,14
0,500	25,07	23,03	25,52	25,52
0,643	25,49	23,00	24,59	25,14
0,785	23,93	21,87	23,22	22,39
0,845	22,93	21,16	22,26	22,33
0,924	21,29	20,00	20,75	19,12
0,981	19,89	19,03	20,38	18,50
<b>1200 rpm</b>				
0,019	17,65	18,65	22,39	20,61
0,076	18,17	19,11	22,84	21,30
0,155	19,62	20,35	24,65	24,86
0,215	20,51	21,31	25,74	24,94
0,357	21,76	22,49	27,31	27,99
0,500	23,11	23,13	28,39	28,39
0,643	23,40	23,00	27,31	27,99
0,785	21,98	21,87	25,74	24,94
0,845	20,96	21,05	24,65	24,86
0,924	19,61	20,06	22,84	21,30
0,981	18,02	18,89	22,39	20,61

Tabela 4.9 – Análise do Efeito de Instalação do *damping* com retificador à montante –  
Exp7 & Exp8 - Variação das Velocidades Locais (m/s) – Exp7 & Exp8

Posição (y/di)	$\Delta\%$ (Exp8- Hinze)/ Hinze	$\Delta\%$ (Exp7- Hinze)/ Hinze	$\Delta\%$ (Exp8- De Chant)/ De Chant	$\Delta\%$ (Exp7- De Chant)/ De Chant
<b>700 rpm</b>				
0,019	-4,99%	-6,45%	4,07%	2,47%
0,076	-4,15%	-6,48%	3,45%	0,94%
0,155	-4,35%	-7,66%	-3,76%	-7,08%
0,215	-5,08%	-8,21%	-6,32%	-9,41%
0,357	-3,54%	-8,53%	-5,52%	-10,41%
0,500	-1,81%	-8,67%	-1,81%	-8,67%
0,643	3,75%	-5,63%	1,62%	-7,57%
0,785	3,46%	-4,89%	2,10%	-6,14%
0,845	3,17%	-4,09%	3,81%	-3,50%
0,924	3,78%	-2,21%	12,01%	5,55%
0,981	-1,95%	-6,26%	7,41%	2,69%
<b>950 rpm</b>				
0,019	-5,26%	-8,13%	4,36%	1,20%
0,076	-5,45%	-8,41%	2,57%	-0,64%
0,155	-4,89%	-8,93%	-5,15%	-9,18%
0,215	-4,11%	-8,47%	-0,58%	-5,10%
0,357	-3,97%	-9,44%	-6,06%	-11,41%
0,500	-1,79%	-9,77%	-1,79%	-9,77%
0,643	3,66%	-6,48%	1,40%	-8,52%
0,785	3,09%	-5,81%	6,88%	-2,34%
0,845	2,98%	-4,97%	2,70%	-5,23%
0,924	2,62%	-3,62%	11,33%	4,56%
0,981	-2,41%	-6,64%	7,50%	2,84%
<b>1200 rpm</b>				
0,019	-21,20%	-16,69%	-14,38%	-9,48%
0,076	-20,43%	-16,33%	-14,67%	-10,28%
0,155	-20,39%	-17,43%	-21,09%	-18,16%
0,215	-20,32%	-17,21%	-17,74%	-14,53%
0,357	-20,31%	-17,64%	-22,27%	-19,67%
0,500	-18,57%	-18,51%	-18,57%	-18,51%
0,643	-14,30%	-15,77%	-16,41%	-17,84%
0,785	-14,63%	-15,06%	-11,87%	-12,30%
0,845	-14,94%	-14,61%	-15,69%	-15,36%
0,924	-14,14%	-12,16%	-7,93%	-5,81%
0,981	-19,53%	-15,63%	-12,57%	-8,32%

Os perfis de velocidades levantados, na configuração do duto com o uso dos retificadores de fluxo padronizados à montante e à jusante do escoamento (Experimentos Exp5 e Exp6), estão mostrados nas Figuras 4.12-a, 4.12-b e

4.12-c a seguir. Delas, percebe-se, mais uma vez, que a melhor configuração de escoamento se dá quando no uso dos dois retificadores de fluxo simultaneamente. Os perfis de velocidade obtidos experimentalmente se aproximaram bem mais dos perfis teóricos equivalentes por número de Reynolds, principalmente em relação aos Perfis de *Hinze* [40]. Parte da assimetria foi mitigada com o uso do *damping* (Exp6) onde menor dispersão dos dados foi obtida, para todos os três patamares de velocidades.

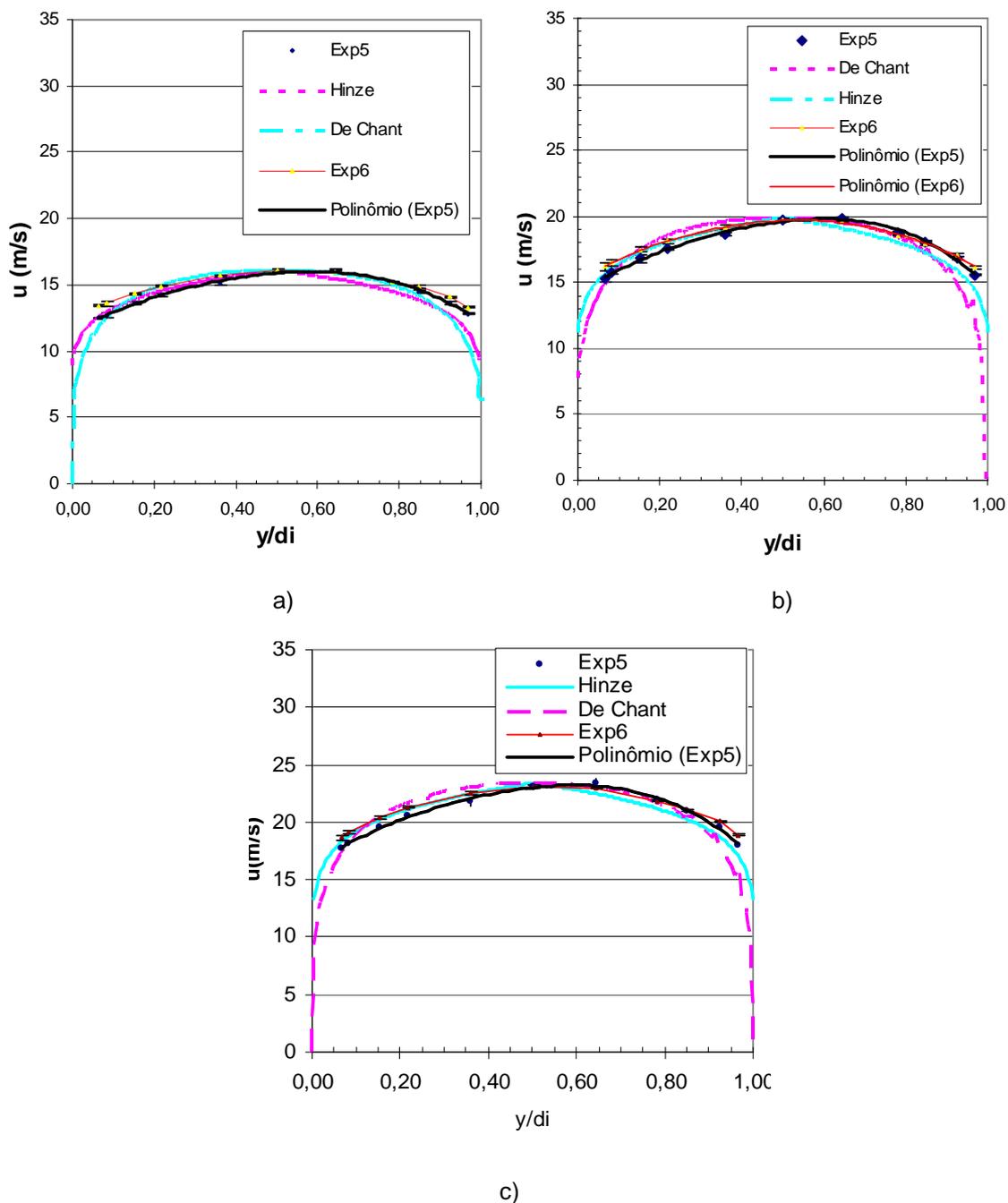


Figura 4.12: : Análise do Efeito de Instalação do *damping* com retificadores à montante e jusante (Exp5) e (Exp6) a) a)700rpm, b)950rpm, c) 1200rpm.

Nas Tabelas 4.10 e 4.11, ratifica-se as observações das figuras acima: Que os menores desvios nos valores obtidos de velocidades locais frente ao Perfil teórico de *Hinze* e frente ao efeito de assimetria foram encontrados na configuração do Experimento 6 (Exp6). Neste experimento também foram verificados as menores medidas de dispersão dentre os oito experimentos.

Tabela 4.10 - Análise do Efeito de Instalação do *damping* com retificadores à montante e jusante Exp5 & Exp6 - Velocidades Locais (m/s) – Exp5 & Exp6

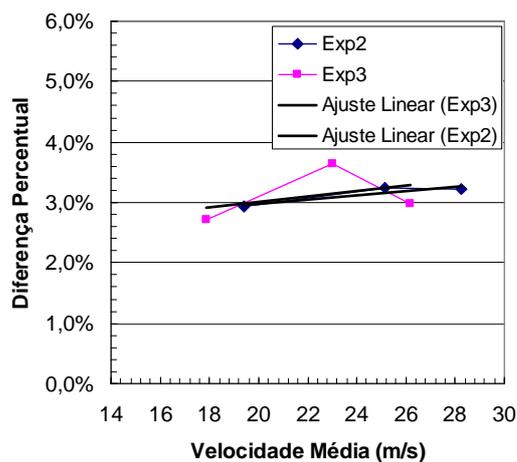
Posição (y/di)	Sem Damping	Com Damping	Perfil Teórico (Hinze)	Perfil Teórico (L.J. De Chant)
<b>700 rpm</b>				
0,019	12,48	13,43	12,75	11,69
0,076	12,71	13,57	12,99	12,08
0,155	13,66	14,33	13,98	13,93
0,215	14,25	14,91	14,60	14,82
0,357	15,16	15,68	15,51	15,84
0,500	15,91	16,09	16,11	16,11
0,643	16,10	16,00	15,51	15,84
0,785	15,19	15,25	14,60	14,82
0,845	14,50	14,84	13,98	13,93
0,924	13,65	14,10	12,99	12,08
0,981	12,83	13,32	12,75	11,69
<b>950 rpm</b>				
0,019	15,25	16,21	15,83	14,44
0,076	15,74	16,44	16,12	14,92
0,155	16,80	17,47	17,32	17,42
0,215	17,51	18,13	18,08	17,47
0,357	18,61	19,16	19,17	19,62
0,500	19,73	19,73	19,90	19,90
0,643	19,89	19,55	19,17	19,62
0,785	18,82	18,55	18,08	17,47
0,845	18,06	17,94	17,32	17,42
0,924	16,85	17,09	16,12	14,92
0,981	15,57	16,12	15,83	14,44
<b>1200 rpm</b>				
0,019	17,65	18,65	18,38	16,99
0,076	18,17	19,11	18,76	17,56
0,155	19,62	20,35	20,27	20,50
0,215	20,51	21,31	21,19	20,56
0,357	21,76	22,49	22,50	23,08
0,500	23,11	23,13	23,40	23,40
0,643	23,40	23,00	22,50	23,08
0,785	21,98	21,87	21,19	20,56
0,845	20,96	21,05	20,27	20,50
0,924	19,61	20,06	18,76	17,56
0,981	18,02	18,89	18,38	16,99

Tabela 4.11 – Análise do Efeito de Instalação do *damping* com retificadores à montante e jusante Exp5 & Exp6 - Variação das Velocidades Locais (m/s) – Exp5 & Exp6

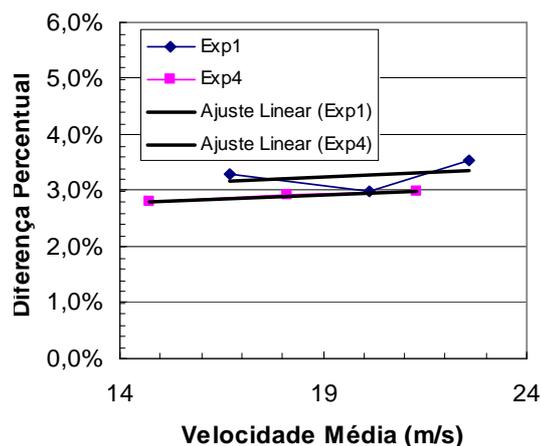
Posição (y/di)	$\Delta\%$ (Exp5- Hinze)/ Hinze	$\Delta\%$ (Exp6- Hinze)/ Hinze	$\Delta\%$ (Exp5- De Chant)/ De Chant	$\Delta\%$ (Exp6- De Chant)/ De Chant
<b>700 rpm</b>				
0,019	-2,10%	5,37%	6,79%	14,93%
0,076	-2,15%	4,51%	5,20%	12,36%
0,155	-2,28%	2,49%	-1,92%	2,86%
0,215	-2,45%	2,06%	-3,90%	0,55%
0,357	-2,23%	1,10%	-4,30%	-1,04%
0,500	-1,19%	-0,12%	-1,19%	-0,12%
0,643	3,82%	3,19%	1,62%	1,00%
0,785	4,01%	4,42%	2,47%	2,87%
0,845	3,75%	6,11%	4,13%	6,50%
0,924	5,12%	8,57%	13,01%	16,72%
0,981	0,64%	4,49%	9,77%	13,98%
<b>950 rpm</b>				
0,019	-3,65%	2,42%	5,61%	12,26%
0,076	-2,34%	1,99%	5,46%	10,14%
0,155	-3,04%	0,87%	-3,59%	0,29%
0,215	-3,15%	0,28%	0,21%	3,76%
0,357	-2,96%	-0,06%	-5,15%	-2,31%
0,500	-0,87%	-0,85%	-0,87%	-0,85%
0,643	3,74%	1,98%	1,40%	-0,32%
0,785	4,10%	2,62%	7,71%	6,18%
0,845	4,26%	3,56%	3,66%	2,97%
0,924	4,53%	6,06%	12,88%	14,53%
0,981	-1,66%	1,84%	7,79%	11,63%
<b>1200 rpm</b>				
0,019	-4,00%	1,48%	3,86%	9,80%
0,076	-3,11%	1,89%	3,50%	8,83%
0,155	-3,19%	0,41%	-4,28%	-0,73%
0,215	-3,18%	0,60%	-0,22%	3,68%
0,357	-3,27%	-0,03%	-5,71%	-2,56%
0,500	-1,23%	-1,15%	-1,23%	-1,15%
0,643	4,03%	2,25%	1,40%	-0,34%
0,785	3,73%	3,22%	6,90%	6,37%
0,845	3,44%	3,84%	2,27%	2,67%
0,924	4,56%	6,96%	11,68%	14,25%
0,981	-1,98%	2,78%	6,05%	11,20%

Os resultados do experimento Experimento 6 (Exp6) foram melhores, também, relativamente aos valores obtidos de desvio padrão, no qual obteve-se a linha de tendência com valores mais baixos dentre as apresentadas nas Figuras 4.13-a a 4.13-d. Percebe-se, também, que a pior configuração que

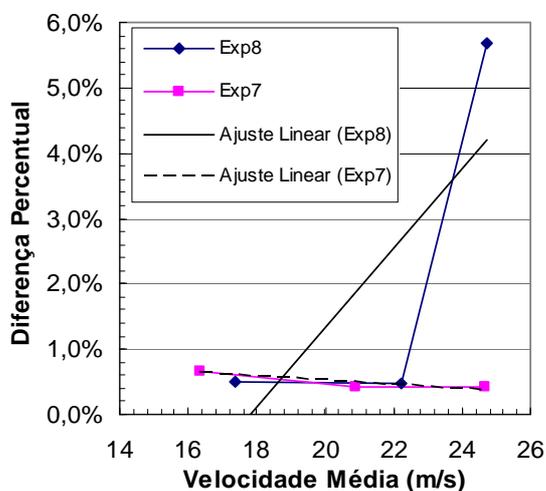
apresenta as maiores dispersões dos valores dentre as apresentadas, ocorre quando não se faz uso nenhum de retificador de fluxo no escoamento (Exp2 e Exp3). Já a configuração neste critério é quando se utiliza dos retificadores de fluxo tanto a montante quanto a jusante (Exp5 e Exp6). Com exceção do gráfico da Figura 4.13-c onde ocorreu uma anomalia à 1200rpm, observou-se que em dois dos 3 gráficos o uso do *damping* reduziu o ruído de leitura dos dados.



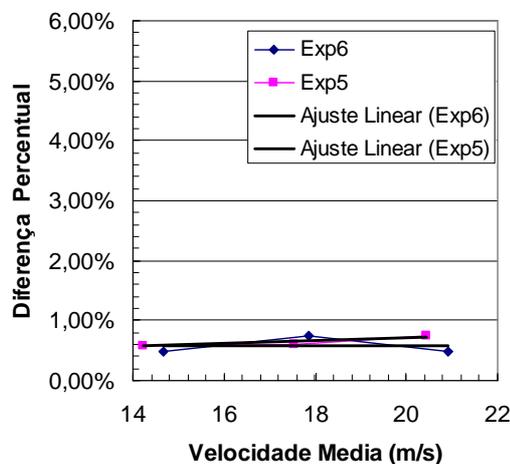
a)



b)



c)



d)

Figura 4.13: Desvio padrão médio em três níveis de velocidades para as configurações referentes aos: a) Exp2 e Exp3, b) Exp1 e Exp4, c) Exp7 e Exp8, d) Exp5 e Exp6.

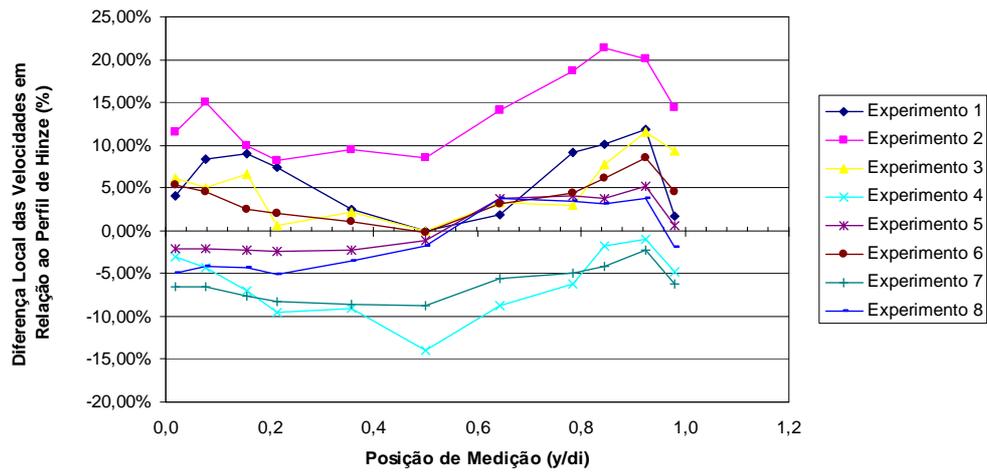
Os dados característicos dos escoamentos descritos acima, com o uso do *damping*, estão descritos na Tabela 4.12 a seguir. Desta forma, ratifica-se a

configuração relativa ao experimento 6 como a de menor dispersão e vemos a magnitude da perda de carga devido aos retificadores de fluxo.

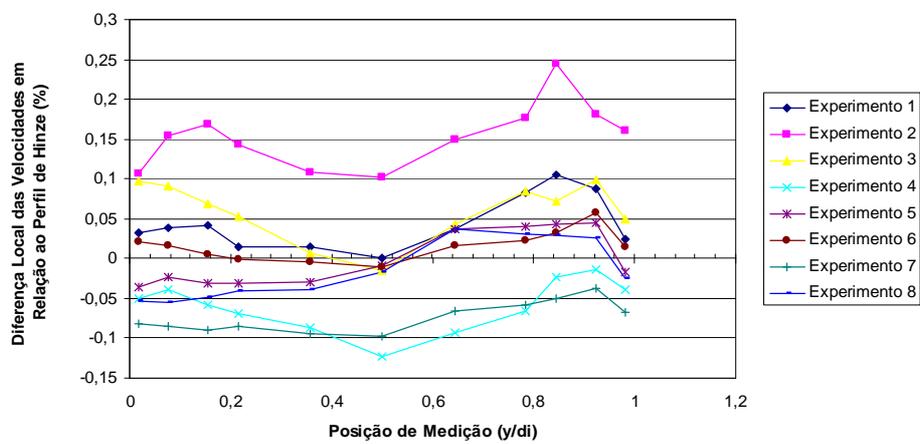
Tabela 4.12 - Quadro-Resumo com número de Reynolds e desvio-padrão nos experimentos

	EXP3		EXP4		EXP6		EXP7	
	Re	$\sigma(10^{-1})$	Re	$\sigma(10^{-1})$	Re	$\sigma(10^{-1})$	Re	$\sigma(10^{-1})$
700 rpm	$2,15 \times 10^5$	5,358	$1,70 \times 10^5$	4,336	$1,69 \times 10^5$	0,770	$1,96 \times 10^5$	1,185
950 rpm	$2,74 \times 10^5$	9,014	$2,10 \times 10^5$	5,670	$2,05 \times 10^5$	1,480	$2,45 \times 10^5$	0,960
1200 rpm	$3,10 \times 10^5$	8,431	$2,42 \times 10^5$	6,731	$2,40 \times 10^5$	1,115	$2,89 \times 10^5$	1,140

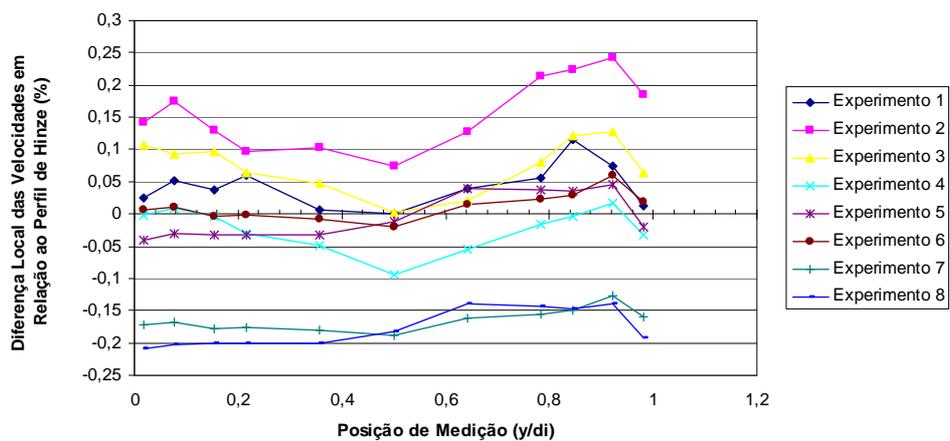
Estão mostradas nas Figuras 4.14-a a 4.14-c a seguir, as divergências das velocidades locais em relação ao perfil de *Hinze* [40], ao longo das posições em que foram medidas as velocidades locais. Percebe-se que as curvas, para os três patamares de velocidades, de maneira geral, não sofreram grandes variações de formato e valores absolutos em função do acréscimo da rotação do rotor, o que ratifica em grande parte a adimensionalidade da aderência dos perfis de velocidades obtidos experimentalmente nos perfis teóricos de *Hinze* [40] equivalentes. Outra observação é que, conforme esperado, em termos de aderência com o perfil teórico, a condição menos favorável é a que não faz uso de retificador de fluxo nem a montante, nem à jusante do escoamento. Interessante ressaltar, também o efeito dos retificadores de fluxo vislumbrados nestes gráficos de forma que os formatos das divergências permanecem muito parecidos para uma mesma configuração de uso de retificador de fluxo no escoamento. Ressalta-se, também, que à medida que foram adicionados retificadores de fluxo ao escoamento, tais divergências obtidas diminuíram, em módulo, ao longo dos experimentos, de forma que a configuração de escoamento referente ao Experimento Exp6 foi considerada como a melhor empregada para caracterização do perfil de velocidades, com relação aos critérios de minimização de dispersão de dados, simetria e aproximação ao perfil teórico esperado.



a)



b)



c)

Figura 4.14: Verificação das configurações de Experimentos com relação ao Perfil teórico de Hinze [40] esperado a: a)700rpm, b)950rpm, c) 1200rpm.

Outra característica que se manteve durante a configuração dos Experimentos Exp5 e Exp6 foi uma menor aproximação ao perfil teórico quando próximo às paredes do duto. A esse comportamento foi atribuído os possíveis efeitos de “vizinhança” com a parede interna do duto de escoamento, onde efeitos de camada limite e rugosidade da parede interna do duto podem também ser preponderantes. Tal diferença influenciou no resultado final das vazões medidas descritas na Tabela 4.13. Mesmo assim, para a melhor configuração de escoamento (Exp 6), duas dentre as três discrepâncias na medição de vazão, ficaram abaixo dos padrões nacionais adotados atualmente para medidores fiscais de produção de gás natural, conforme Portaria N.º1/2000 ANP/INMETRO [3], quando tomando-se por base o perfil modelado por *Hinze*. [40]

Tabela 4.13 – Vazão obtida (Exp6) e vazão teórica esperada para o mesmo experimento.

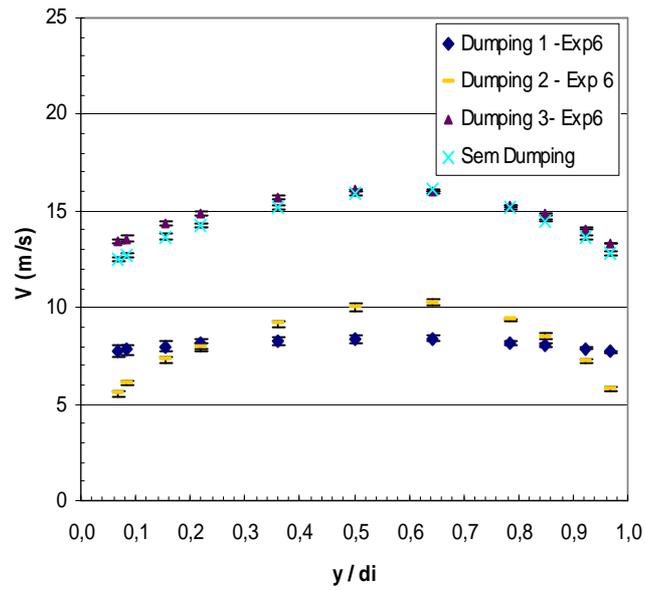
rpm	Q / ρ [m3/s]			Δ% (experimental x teórico)	
	Experimental (Exp6)	(Hinze)	(L.J. De Chant)	(Hinze)	(L.J. De Chant)
700	0,382	0,368	0,361	3,692%	5,677%
950	0,465	0,456	0,444	1,794%	4,663%
1200	0,544	0,533	0,522	1,925%	4,143%

#### 4.1.4 Escolha e Verificação do Melhor Perfil de Velocidades obtido para o escoamento no Túnel Considerando os 3 patamares de velocidades do rotor.

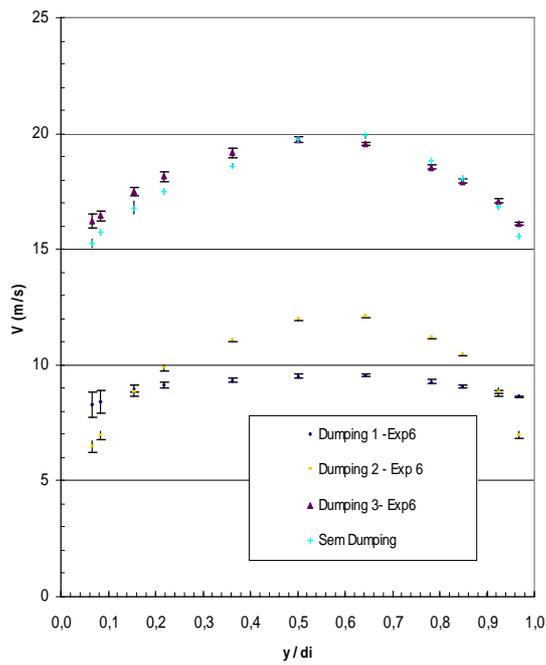
Antes de obter os perfis mencionados nos itens anteriores, efetuou-se a busca pelo comprimento de tubulação capilar ideal para compor o *damping*, cujos resultados derivados desta, estão mostradas nas figuras 4.15-a, 4.15-b e 4.15-c a seguir. O *damping* nas medições com as tubulações capilares de comprimento 303,4 cm, 192,36 cm e 43,4 cm denominados nas figuras abaixo como “*damping1*”, “*damping2*” e “*damping3*”, respectivamente, induziram a alcançar resultados bem distintos entre si. Nos três patamares de velocidades do rotor, as medições com o uso do “*damping1*” mostraram-se com elevada

perda de carga em relação às leituras sem nenhum capilar, ocasionando diferenças no formato do perfil do nível de velocidades obtidas das leituras do escoamento. Na metodologia de medição denominada “*damping2*” a perda de carga esteve presente de maneira abrandada, com menor prejuízo no formato do perfil de velocidades mas ainda com elevada perda de carga nos valores obtidos. Já para o caso denominado “*damping 3*”, quando a tubulação capilar utilizada para o *damping* foi drasticamente reduzida, não houve prejuízo ao formato do perfil de velocidades encontrado, de forma que o perfil obtido com a montagem denominada “*damping3*” se aproximou até mais do perfil teórico equivalente de *Hinze* [12] do que o perfil sem metodologia de *damping* referente.

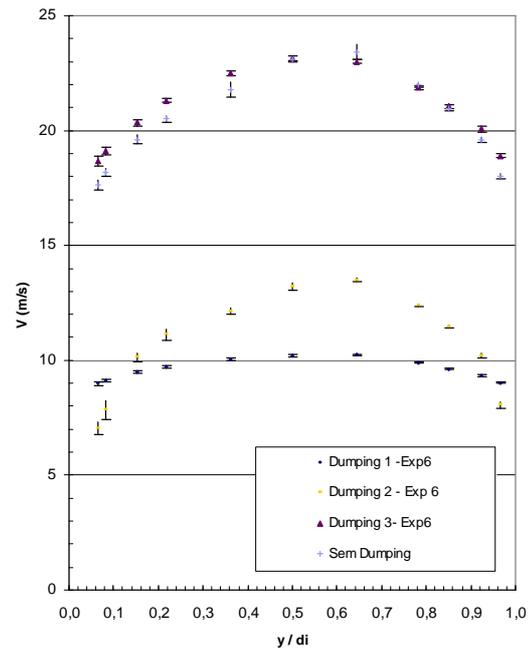
Também, como visto nos resultados anteriores, nesta metodologia “*damping3*”, obteve-se uma redução da flutuação, assim como do desvio-padrão das leituras, conforme discutido no capítulo anterior. Sendo assim o “*damping3*” foi adotado para fins de medição do perfil de referência para comparação dos dados do medidor de vazão por dispersão a Laser (L2F).



a)



b)



c)

Figura 4.15: Perfis de Velocidades obtidos nas diferentes configurações de damping para:  
a)700rpm, b)950rpm, c) 1200rpm.

Pelo gráfico da Figura 4.16, tem-se as velocidades médias e os respectivos desvios-padrões mostrados de forma a evidenciar a precisão dos dados discutidos anteriormente. Ambas as 3 metodologias de damping minimizaram a flutuação dos valores, mas o determinante na escolha da melhor metodologia foi realmente o critério de menor perda de carga e prejuízo ao formato do escoamento.

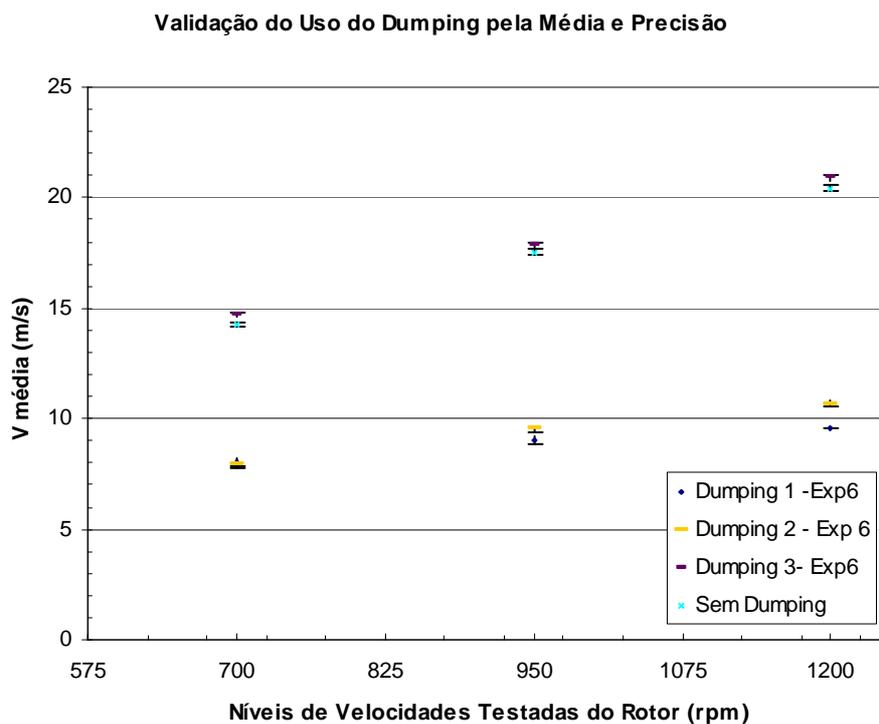


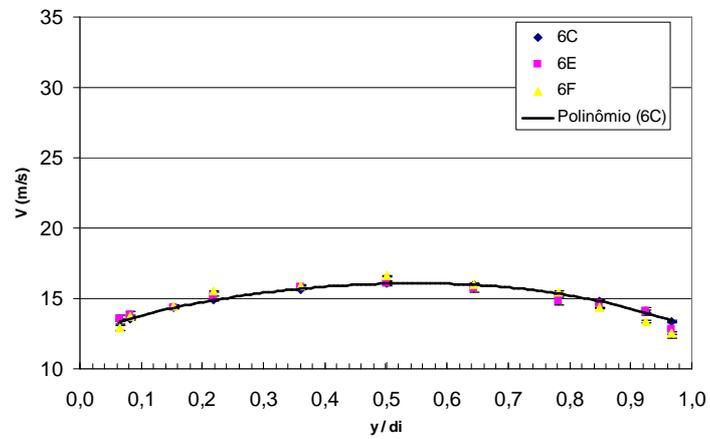
Figura 4.16: Verificação do uso de Damping pela média e pela precisão.

A montagem do “*damping3*” foi utilizada no Experimento Exp6, denominado apenas por 6C nos gráficos das figuras 4.17-a, 4.17-b e 4.17-c a seguir. Nestes gráficos estão mostrados os resultados referentes aos levantamentos de perfis de velocidade, utilizando a mesma metodologia, porém repetindo o experimento:

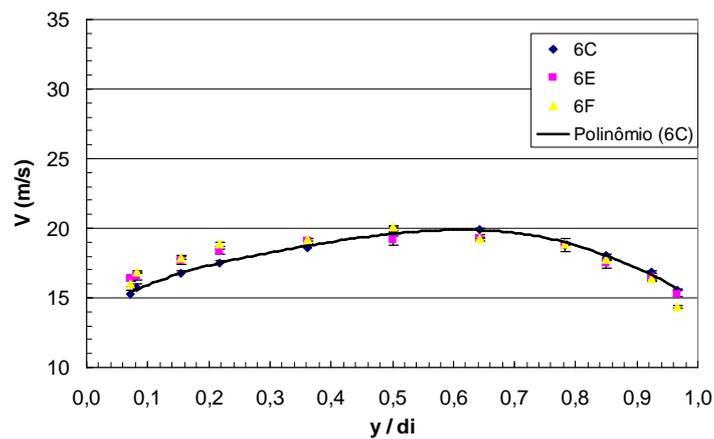
1. Na mesma secção transversal instalada o Pitot (Perfil 6E);
2. Na secção transversal que seria instalado o LF2 (Perfil 6F).

Percebe-se boa repetibilidade entre as leituras do escoamento, ao se comparar os perfis 6C e 6E, o que ratifica os resultados encontrados. Grande aderência

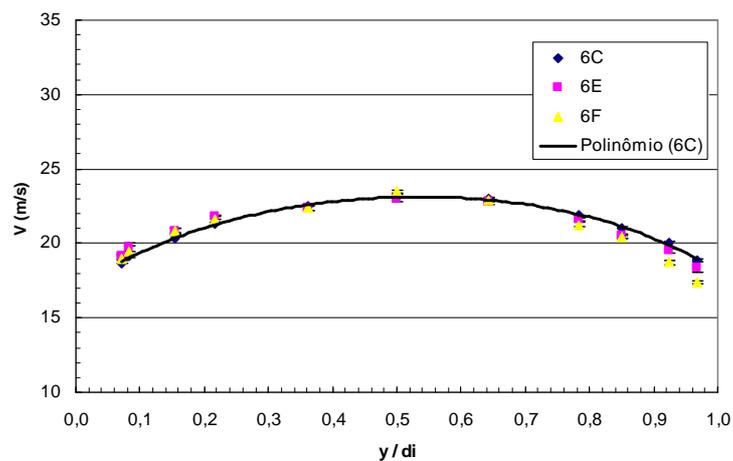
também foi encontrada entre o perfil 6F e os 6C/6E, dado que a premissa de escoamento turbulento completamente desenvolvido entre esse trecho seja satisfeita.



a)



b)



c)

Figura 4.17: Perfis de Velocidades obtidos nos experimentos 6C, 6E e 6F, para: a)700rpm, b)950rpm, c) 1200rpm.

Parte da assimetria do perfil 6C também diminui durante o 6F, indicando que possíveis descontinuidades e/ou imperfeições geométricas entre as duas secções transversais podem ter sido um dos motivos para a existência da leve assimetria no perfil medido na secção transversal de instalação do Pitot. Tais resultados podem ser verificados nos gráficos das Figuras 4.18-a, 4.18-b e 4.18-c, onde se comparam estas assimetrias com a assimetria esperada devido a inserção do tubo de Pitot no escoamento.

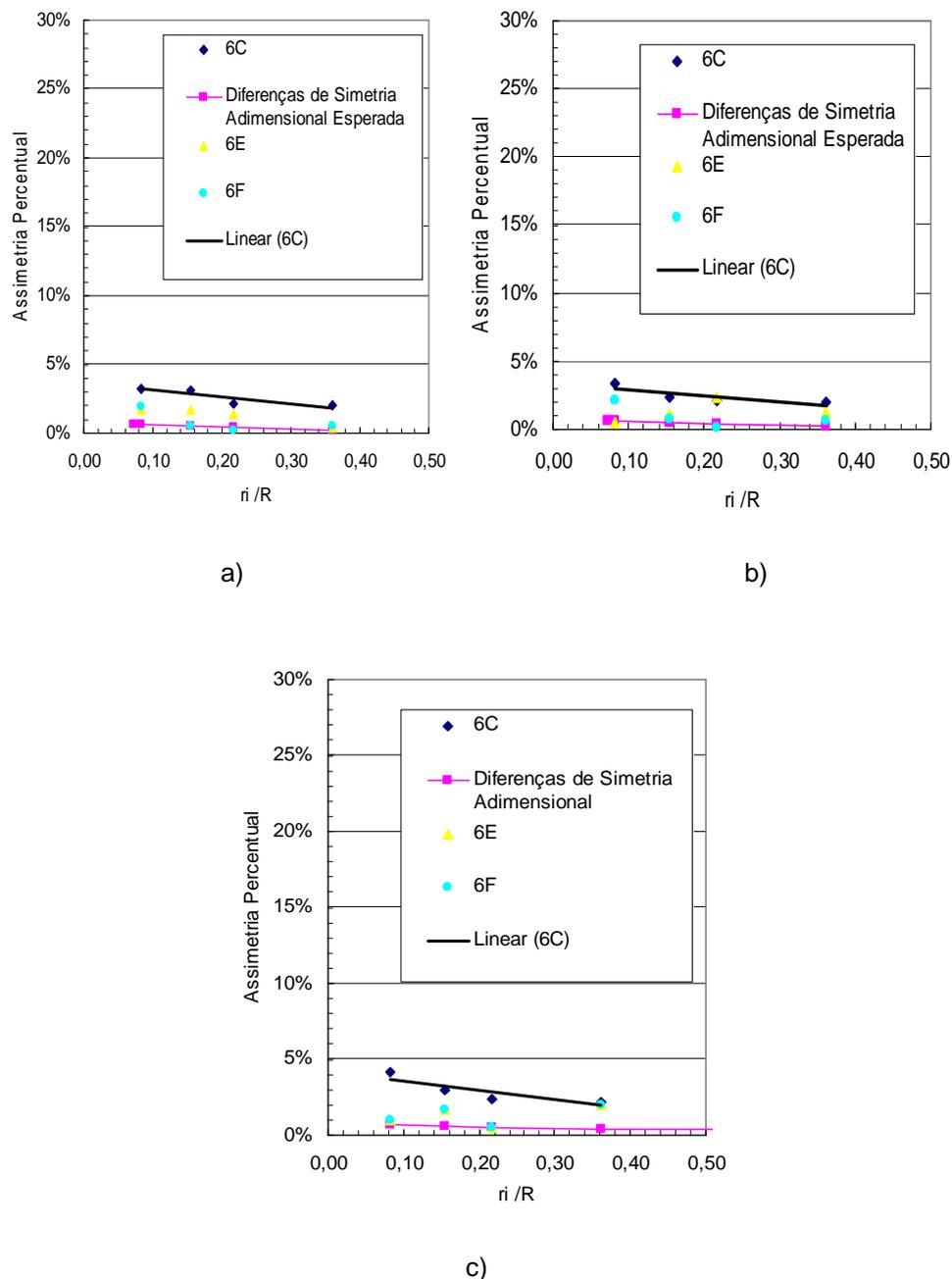


Figura 4.18: Assimetrias Percentuais obtidas nos experimentos 6C, 6E e 6F, para: a)700rpm, b)950rpm, c) 1200rpm.

#### **4.1.5 Verificação da premissa de Escoamento Completamente desenvolvido**

Para verificação da premissa de escoamento completamente desenvolvido na secção transversal do duto obtido com o perfil 6C, procedeu-se com o levantamento do perfil 6E, com vista a analisar a repetibilidade dos resultados obtidos. Após isso, levantou-se o perfil de velocidades locais, utilizando o mesmo procedimento já usado anteriormente, porém como o tubo de Pitot montado agora na secção transversal do duto onde seria montado o Medidor de Vazão por dispersão a Laser.

As Figura 4.19-a, 4.19-b e 4.19-c a seguir, mostram os valores das velocidades locais para os perfis levantados 6C, 6E e 6F, nas posições preconizadas, para fins de comparação, nos três patamares de velocidades de escoamento: baixa, média e alta.

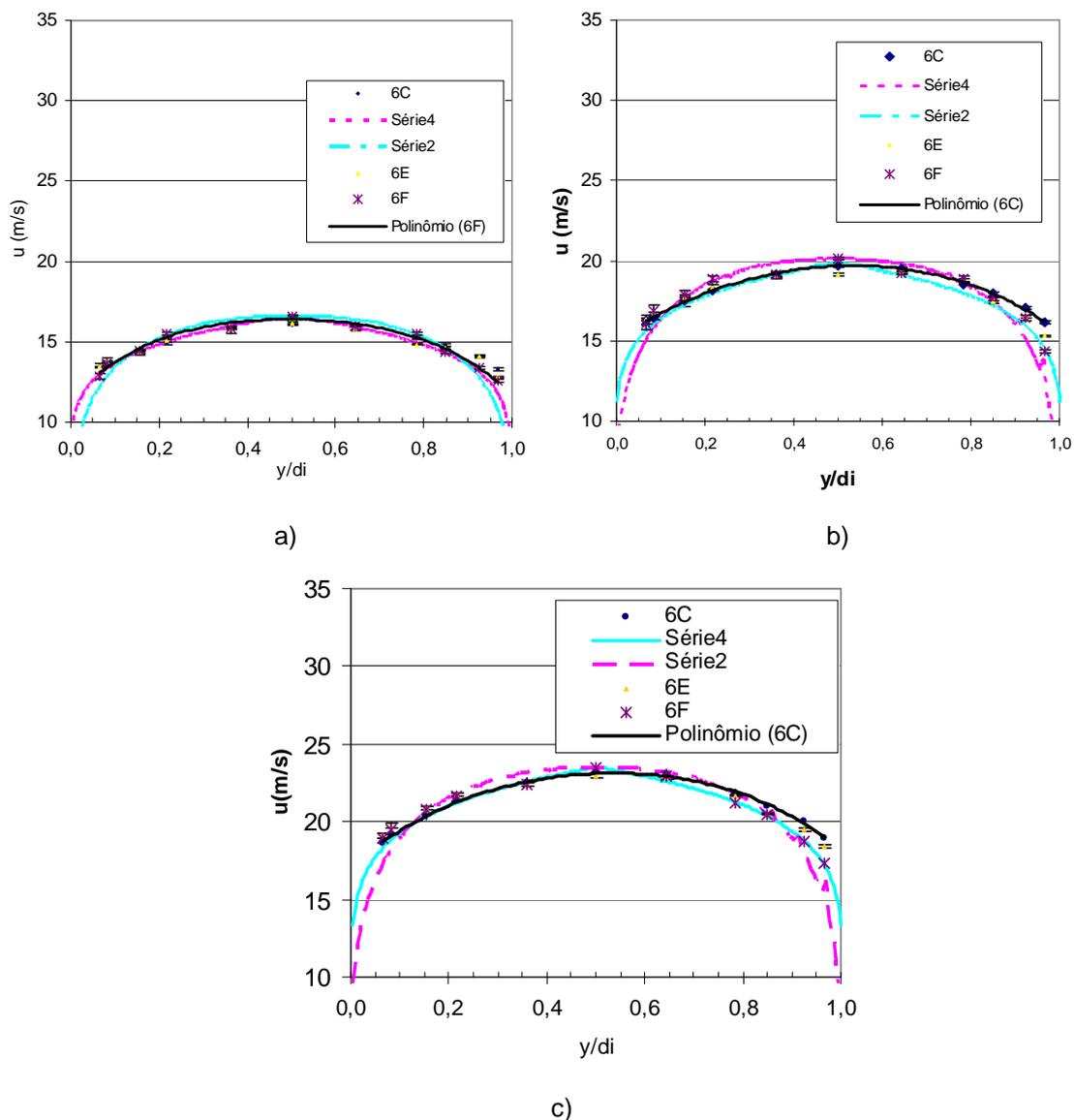


Figura 4.19: Comparação dos Perfis de Velocidades obtidos nos experimentos 6C, 6E e 6F com os perfis teóricos, para: a)700rpm, b)950rpm, c) 1200rpm.

Observa-se nas figuras que, para as três velocidades de escoamento do túnel de vento, os três perfis de velocidades locais, 6C, 6E e 6F, estão muito próximos entre si, e próximos ao perfil teórico logarítmico de *Hinze*[12], em grande parte das leituras, desde o início da inserção do tubo de Pitot no escoamento, até quase ao final das leituras ao longo do diâmetro do duto, especialmente até a posição  $y/di=0,845$ .

Os valores das velocidades locais, quando o rotor do túnel de vento estava operando em baixa velocidade, ilustrados na Figura 4.19-a, estão

listados na Tabela 4.14 e, as respectivas variações percentuais entre os perfis comparados para cada velocidade local estão listados na Tabela 4.15

Tabela 4.14 – Velocidades locais para a configuração 6 (Exp6)

Posição (y/di)	Velocidades Locais (m/s)				Perfil Teórico (L.J. De Chant)
	6C	6E	6F	Perfil Teórico (Hinze)	
<b>700 rpm</b>					
0,019	13,43	13,50	13,69	13,17	12,07
0,019	13,43	13,50	13,69	13,17	12,07
0,076	13,57	13,84	13,69	13,41	12,47
0,155	14,33	14,38	14,43	14,44	14,38
0,215	14,91	15,06	15,52	15,08	15,31
0,357	15,68	15,82	15,90	16,01	16,36
0,500	16,09	16,12	16,62	16,11	16,11
0,643	16,00	15,76	16,00	16,01	16,36
0,785	15,25	14,83	15,49	15,08	15,31
0,845	14,84	14,65	14,35	14,44	14,38
0,924	14,10	14,11	13,37	13,41	12,47
0,981	13,32	12,83	12,57	13,17	12,07
<b>950 rpm</b>					
0,019	16,21	16,34	16,06	16,02	14,61
0,076	16,44	16,58	16,85	16,31	15,10
0,155	17,47	17,67	17,91	17,53	17,63
0,215	18,13	18,35	18,86	18,30	17,68
0,357	19,16	19,05	19,15	19,40	19,85
0,500	19,73	19,15	20,13	19,90	19,90
0,643	19,55	19,29	19,27	19,40	19,85
0,785	18,55	18,81	18,88	18,30	17,68
0,845	17,94	17,46	17,77	17,53	17,63
0,924	17,09	16,49	16,42	16,31	15,10
0,981	16,12	15,31	14,35	16,02	14,61
<b>1200 rpm</b>					
0,019	18,65	19,11	18,96	18,47	17,07
0,076	19,11	19,74	19,46	18,85	17,64
0,155	20,35	20,87	20,82	20,37	20,60
0,215	21,31	21,77	21,66	21,29	20,66
0,357	22,49	22,36	22,43	22,60	23,19
0,500	23,13	22,98	23,51	23,51	23,51
0,643	23,00	22,81	22,88	22,60	15,86
0,785	21,87	21,66	21,26	21,29	15,82
0,845	21,05	20,49	20,41	20,37	15,78
0,924	20,06	19,51	18,73	18,85	15,73
0,981	18,89	18,41	17,37	18,47	15,69

Tabela 4.15 – Comparação das velocidades locais para a configuração 6 (Exp6)

Posição (y/di)	Diferença Percentual Perfil 6E em Relação ao Perfil 6C	Diferença Percentual Perfil 6F em Relação ao Perfil 6C	Diferença Percentual Perfil 6E em Relação ao Perfil de Hinze	Diferença Percentual Perfil 6F em Relação ao Perfil de Hinze
<b>700 rpm</b>				
0,019	0,53%	1,87%	2,55%	3,92%
0,076	1,95%	0,83%	3,16%	2,02%
0,155	0,32%	0,73%	-0,44%	-0,04%
0,215	1,06%	4,12%	-0,11%	2,91%
0,357	0,90%	1,44%	-1,19%	-0,67%
0,500	0,24%	3,34%	0,12%	3,21%
0,643	-1,54%	-0,01%	-1,60%	-0,06%
0,785	-2,74%	1,57%	-1,64%	2,72%
0,845	-1,21%	-3,30%	1,50%	-0,64%
0,924	0,09%	-5,16%	5,21%	-0,31%
0,981	-3,71%	-5,69%	-2,59%	-4,59%
<b>950 rpm</b>				
0,019	0,53%	1,87%	2,55%	3,92%
0,076	0,87%	0,78%	1,65%	3,33%
0,155	1,10%	-0,33%	0,78%	2,16%
0,215	1,21%	-0,90%	0,30%	3,09%
0,357	-0,59%	-1,23%	-1,82%	-1,32%
0,500	-2,94%	-0,85%	-3,77%	1,13%
0,643	-1,32%	0,78%	-0,55%	-0,65%
0,785	1,38%	1,41%	2,81%	3,18%
0,845	-2,67%	2,34%	-0,40%	1,34%
0,924	-3,51%	4,80%	1,12%	0,66%
0,981	-5,03%	0,63%	-4,43%	-10,44%
<b>1200 rpm</b>				
0,019	2,43%	1,62%	3,44%	2,61%
0,076	3,32%	1,84%	4,75%	3,25%
0,155	2,58%	2,31%	2,50%	2,22%
0,215	2,13%	1,61%	2,25%	1,73%
0,357	-0,56%	-0,27%	-1,07%	-0,78%
0,500	-0,64%	1,64%	-2,25%	0,00%
0,643	-0,81%	-0,52%	0,94%	1,23%
0,785	-0,97%	-2,80%	1,73%	-0,15%
0,845	-2,63%	-3,00%	0,61%	0,24%
0,924	-2,75%	-6,65%	3,50%	-0,65%
0,981	-2,53%	-8,09%	-0,32%	-6,00%

Estas diferenças percentuais medidas a partir da comparação entre as velocidades locais demonstram a proximidade nos perfis medidos, para baixa velocidade. Nas velocidades locais comparadas entre o perfil 6E e o perfil 6C,

percebeu-se uma diferença máxima da ordem de 3,71%, em uma única dentre as posições medidas.

Já na comparação do perfil 6E com o teórico de *Hinze* [12], a diferença máxima foi da ordem de 5,21%, o que é ainda considerado bom resultado, quando proveniente de apenas uma dentre as 11 posições e, comparando um perfil teórico com experimental.

De maneira análoga, na comparação entre o perfil 6F e 6C, as diferenças percentuais locais nas velocidades foram da mesma ordem de magnitudes e, estas diferenças apresentaram de maneira geral uma tendência aleatória e assimétrica, de maneira que, na média, não houvesse variação perceptível do perfil de velocidades.

No entanto, notou-se que, para ambos os perfis 6E e 6F, as maiores magnitudes de diferenças percentuais de velocidade local quando comparadas à mesma posição equivalente do perfil 6C, se encontraram na extremidade inferior do perfil de velocidades, ou seja, na(s) posição(ões)  $y/d_i=0,924$  e/ou  $y/d_i=0,981$ .

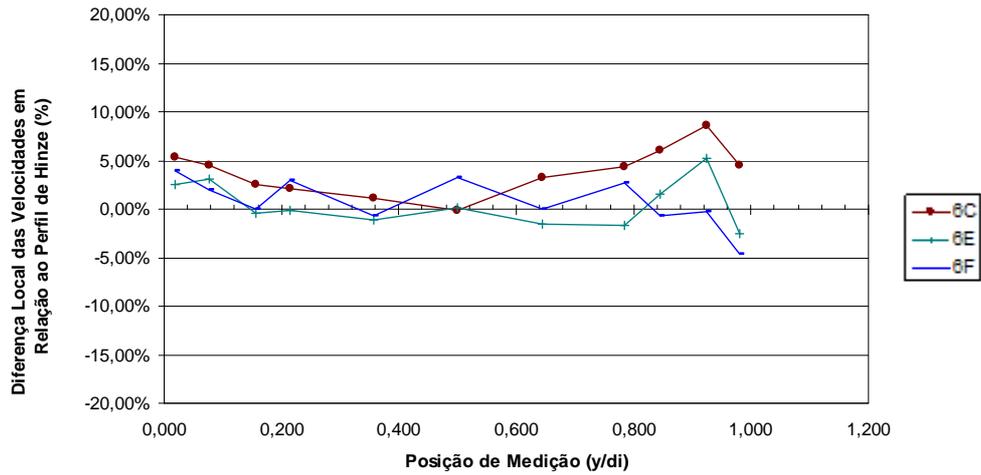
Atribuímos parte desse efeito a uma leve histerese no medidor Pitot, possíveis efeitos de vizinhança com a parede do duto e a influência da inserção da haste do Pitot no escoamento à medida que se aproximam da parede inferior do duto.

De maneira análoga, nas rotações média e alta, ou seja, em 950 e 1200 rpm, têm-se os valores das velocidades locais e as respectivas variações percentuais entre os perfis comparados para cada velocidade local, quando o rotor do túnel de vento estava operando em média e alta velocidades. Os mesmos comportamentos foram observados quando em baixa velocidade.

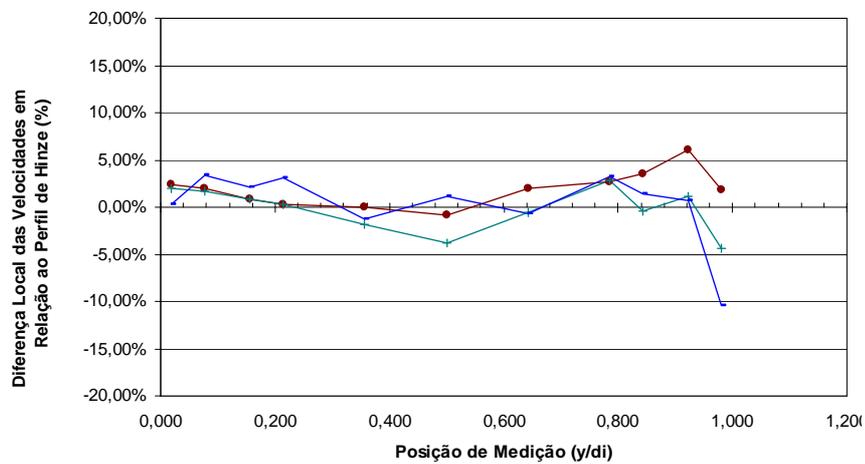
Nas três velocidades de funcionamento do rotor, o perfil 6E se assemelhou ao perfil 6C em formato e precisão, ratificando a repetibilidade do experimento de medição do perfil de velocidades na mesma secção transversal. Além disso, o perfil de velocidades levantado na secção transversal à 21D montante dos perfis 6C e 6E, enquadrou-se nos mesmos critérios segundo os dados presentes nas tabelas supramencionadas. Desta forma, ratificou-se não só a repetibilidade do experimento, mas enquadrou o

trecho de medição entre os perfis 6F e 6E como trecho cujo escoamento mostrou comportamento de escoamento completamente desenvolvido com perfil de velocidades tipicamente turbulento.

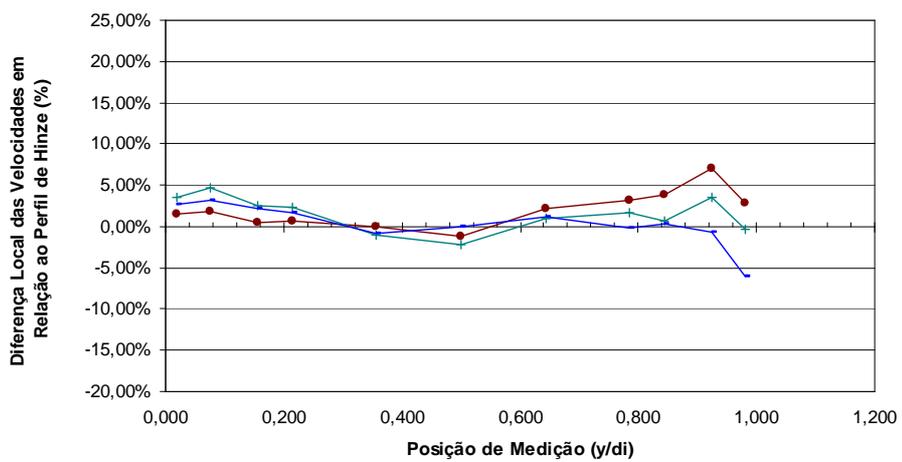
As Figuras 4.20-a, 4.20-b e 4.21-c abaixo evidenciam as diferenças percentuais das velocidades locais nos perfis já comentados. Nestes gráficos, consegue-se perceber visualmente o comentado anteriormente: Nas extremidades inferior e superior do duto, os perfis experimentais se distanciam mais do perfil teórico visto os efeitos de vizinhança do duto de baixo diâmetro, ou seja, de 8". Percebe-se também, de maneira geral, para os três perfis, desde baixas até altas velocidades do rotor do túnel de vento, que as velocidades locais medidas na extremidade inferior do duto são as que possuem maior módulo na diferença com o perfil teórico de *Hinze* [12], indicando possíveis efeitos de histerese e de obstrução do escoamento por parte da haste do Tubo de Pitot inserido no duto.



a)



b)



c)

Figura 4.20: Diferenças Percentuais das velocidades Locais para os perfis 6C, 6E e 6F em relação ao perfil teórico de *Hinze* [12] em: a) 700rpm, b) 950rpm, c) 1200rpm.

A Tabela 4.16 apresenta a comparação nas vazões volumétricas nos três perfis 6C, 6E e 6F comparados no texto anterior e as vazões obtidas a partir de aproximação numérica para os perfis teóricos equivalentes por número de Reynolds, pela metodologia de *Hinze* [12] e a metodologia de *De Chant* [35]. Mostra também as comparações em diferenças percentuais dos três perfis mencionados em relação aos dois perfis teóricos equivalentes.

Com base nesta, observa-se que os valores da vazão volumétrica para ambos os três perfis obtidos de procedimento experimental, divergiram em no máximo 1,43% em relação ao perfil de *Hinze* [12] e até em 14,08% em relação ao perfil baseado no raciocínio de *De Chant* [35]. Toda essa discrepância se deve ao fato de que o perfil proveniente do raciocínio de *Hinze* [12] é mais abrangente, já que usa fórmula baseada no valor do Número de Reynolds, envolvendo, assim, não só as propriedades geométricas do duto, mas a cinemática do escoamento também.

Tabela 4.16 – Vazão Volumétrica Teórica X Vazão Volumétrica Medida (6C, 6E e 6F).

rpm	Q / ρ [m <sup>3</sup> /s]					(Q <sub>e</sub> -Q <sub>t</sub> )/Q <sub>t</sub> [%]					
				(De		6C		6E		6F	
	6C	6E	6F	(Hinze)	Chant)	(Hinze)	Chant)	(Hinze)	Chant)	(Hinze)	Chant)
700	0,3820	0,3806	0,3823	0,379	0,372	0,739%	2,699%	0,361%	2,313%	0,806%	2,767%
950	0,4645	0,4600	0,4627	0,461	0,449	0,713%	3,568%	-0,261%	2,566%	0,319%	3,163%
1200	0,5438	0,5433	0,5380	0,536	0,477	1,431%	14,079%	1,347%	13,985%	0,355%	12,869%

## 4.2 – RESULTADOS DA MEDIÇÃO DA VAZÃO COM O MEDIDOR DE DISPERSÃO A LASER

As medições simultâneas da Velocidade Média no túnel de vento, com o medidor Pitot e o medidor OFM estão mostrados na Figura 4.21 abaixo. Tem-se nos três patamares de velocidades distintos, de baixa a alta velocidade, proximidade dos valores medidos e baixa flutuação destes. O maior desvio padrão médio (média dos desvio-padrões das velocidades locais nas posições medidas do perfil de velocidades) alcançado para as medições nos três patamares com o Pitot foi 0,148. Valor este, bastante satisfatório quando

considerado o intervalo de valores absolutos da velocidade médias nos três patamares.

A flutuação dos dados medidos com o Tubo de Pitot se mostrou menor que em relação aos dados medidos com o Medidor de Vazão por dispersão a Laser. Isto não anula o mérito dos valores obtidos com o OFM, uma vez que as leituras a partir deste obteve, dentre todos os patamares de velocidades, o maior desvio padrão de 0,408. O que significa, no máximo 2,83% em relação ao valor absoluto da Velocidade Média.

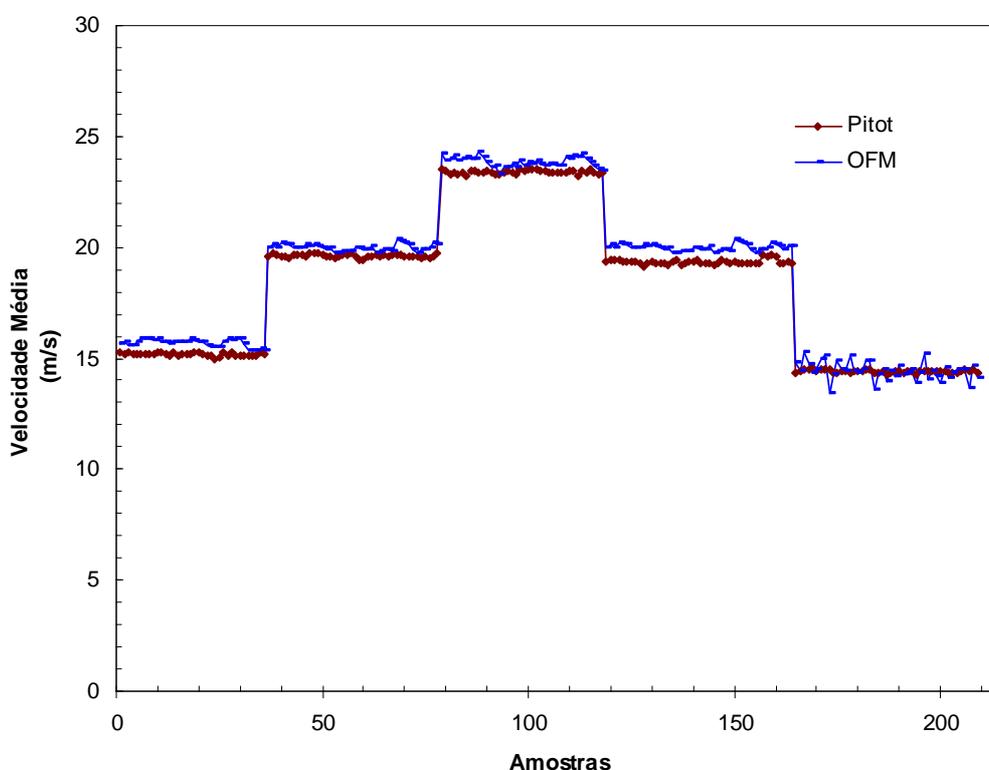


Figura 4.21: Rampas das leituras de medições de velocidades simultâneas com os diferentes medidores.

Na Tabela 4.17 estão todas as médias e desvio-padrão para os cinco patamares de velocidades obtidos. Pode-se observar baixa flutuação nos valores medidos com ambos os medidores de vazão, que se compravam com as medidas de dispersão obtidas. Percebe-se, também, que para as leituras de velocidade com o Pitot, o efeito de histerese é existente, porém sua ordem de grandeza não foi considerada significativa nos resultados finais, neste caso.

Tabela 4.17: Velocidades médias de escoamento nos cinco patamares

Pitot		OFM	
$\mu$	$\sigma$	$\mu$	$\sigma$
15,18	0,07	15,69	0,17
19,62	0,07	19,99	0,14
23,39	0,08	23,84	0,22
19,34	0,11	19,99	0,14
14,42	0,06	14,42	0,41

Na Figura 4.22 abaixo, as vazões para os cinco patamares de velocidade acima discutidos estão mostrados. Assim como as leituras das velocidades médias, ambos os resultados do Pitot e do OFM foram próximos. Observou-se, com base nos valores médios ( $\mu$ ), uma tendência visível em quatro dos patamares de que as medições com o Pitot estivessem abaixo dos valores medidos com o OFM.

Vários motivos podem estar associados a esse efeito: calibração utilizada, efeito de perda de carga na secção transversal onde está instalado o Pitot devido à influência geométrica do OFM no escoamento, perda de carga nas leituras com o Pitot devido ao *damping* e/ou efeito obstrutivo dos medidores no escoamento. O efeito de perda de carga, devido ao *damping* utilizado é desprezível, conforme demonstrado na seção. 4.1.4.

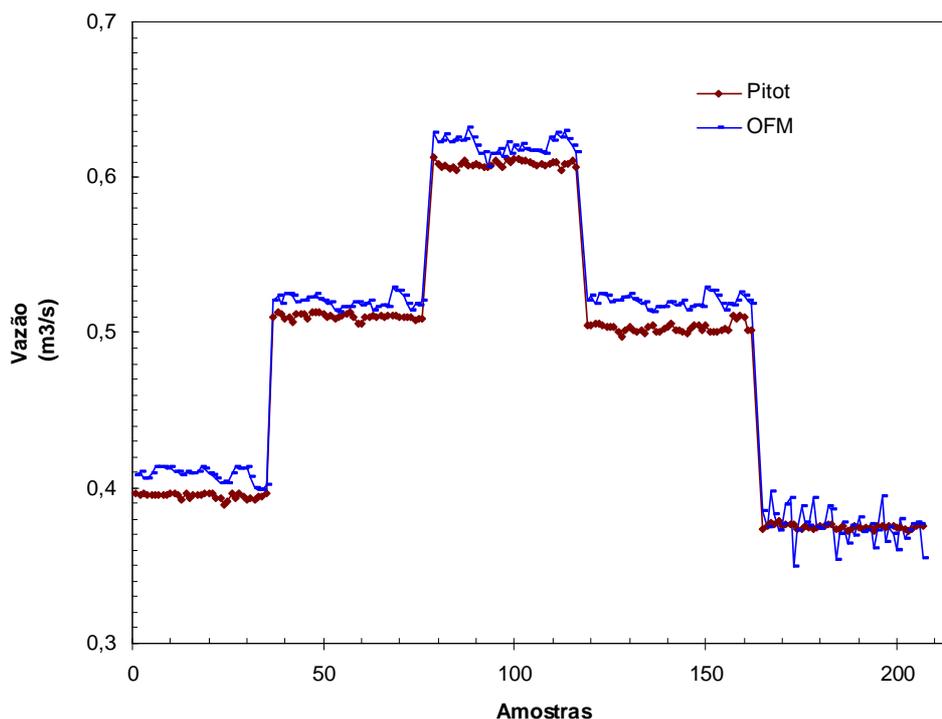


Figura 4.22: Rampas das leituras de medições de vazão simultâneas com os diferentes medidores.

O efeito da perda de carga, assim como no perfil de velocidades, na leitura do Pitot instalado à 21D da secção onde o OFM está instalado será discutido na secção 4.3. Já os efeitos intrusivos dos medidores em cada uma de suas áreas de secção transversal onde estão instalados, respectivamente, podem ser aproximados. Uma alternativa seria considerar, hipoteticamente, que cada medidor, OFM e Pitot, estejam inseridos no escoamento em separado e que as obstruções destes no escoamento possam ser aproximadas por um desconto numérico na área de secção transversal do escoamento referente à projeção plana da inserção das hastes dos medidores na secção transversal do escoamento.

A Figura 4.23 mostra as medições de vazão a partir do Pitot e do OFM com e sem o desconto das áreas interferentes, como mencionado acima. A influência da área inserção do OFM no escoamento, neste critério, é visivelmente maior, visto que o diâmetro da haste do OFM é cerca de 3,2 vezes maior que o do Pitot.

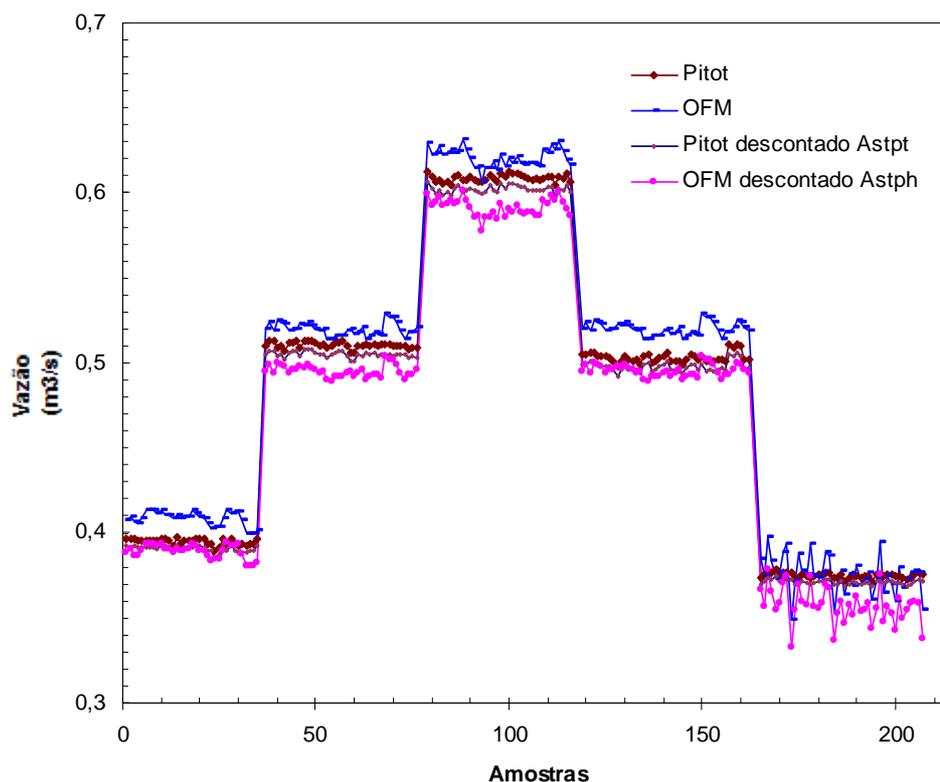


Figura 4.23: Rampas das leituras de medições de vazão simultâneas com os diferentes medidores considerando as duas metodologias.

O resultado das vazões medidas, para ambos os medidores, com e sem a metodologia de desconto na área de secção transversal na vazão encontram-se na Tabela 4.18. A metodologia descrita acima levou aos mais próximos resultados, quando observado o desvio médio. De qualquer forma, os valores medidos da vazão medidos com o OFM atenderam ao critério de aproximação com os valores de referência obtidos a partir do Tubo de Pitot.

Tabela 4.18 – Comparação das vazões medidas com os diferentes medidores considerando ou não o desconto na área transversal.

Patamar	Vazão Média sem desconto (m <sup>3</sup> /s)			Vazão Média com desconto (m <sup>3</sup> /s)		
	Pitot	OFM	\Delta%	Pitot	OFM	\Delta%
1	0,394936	0,408377	3,403%	0,390781	0,389041	0,445%
2	0,510307	0,519404	1,783%	0,504938	0,494811	2,006%
3	0,608433	0,620262	1,944%	0,602032	0,590894	1,850%
4	0,502926	0,519552	3,306%	0,497634	0,494953	0,539%
5	0,374646	0,373320	0,354%	0,370704	0,355644	4,063%
	<b>\Delta% Médio =</b>		<b>2,158%</b>	<b>\Delta% Médio =</b>		<b>1,780%</b>

#### 4.2.1 - Influência da inserção do Medidor

Nas Figuras 4.24, 4.25 e 4.26 estão ilustradas as leituras das velocidades médias do escoamento, com o OFM na posição correta para tubulação ASME de 8" e em outras posições. Assim como esperado, para inserção 10mm maior do OFM no escoamento, ocasiona um erro na leitura para mais no valor absoluto e, para uma inserção 10mm menor que a recomendada para o medidor há, para os três patamares de velocidade de escoamento, leituras absolutas menores que o esperado.

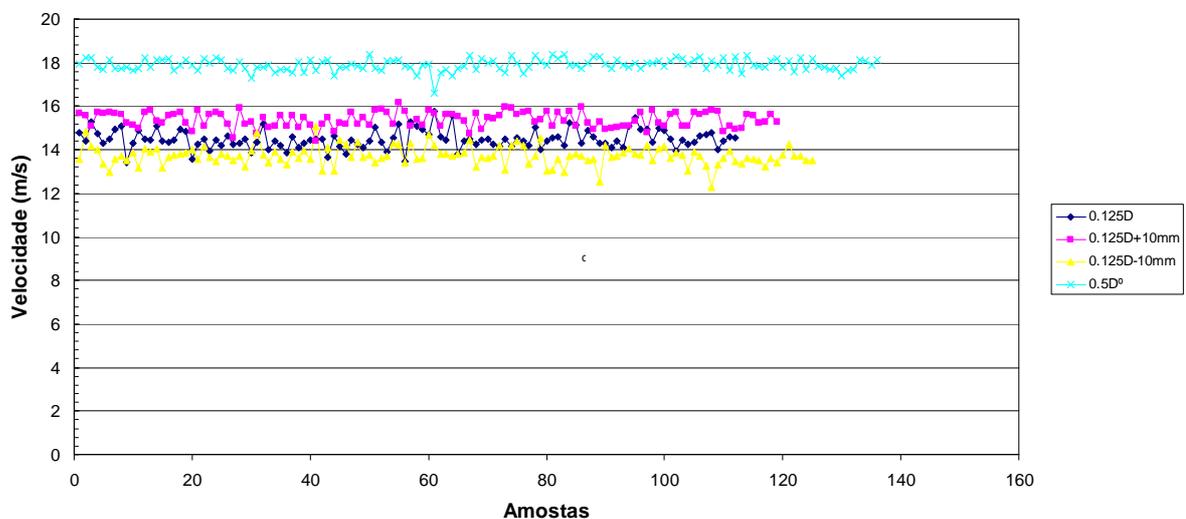


Figura 4.24: Leitura da velocidade média com o sensor óptico em 4 diferentes posições de inserção do sensor, em baixo nível de velocidade (700 rpm).

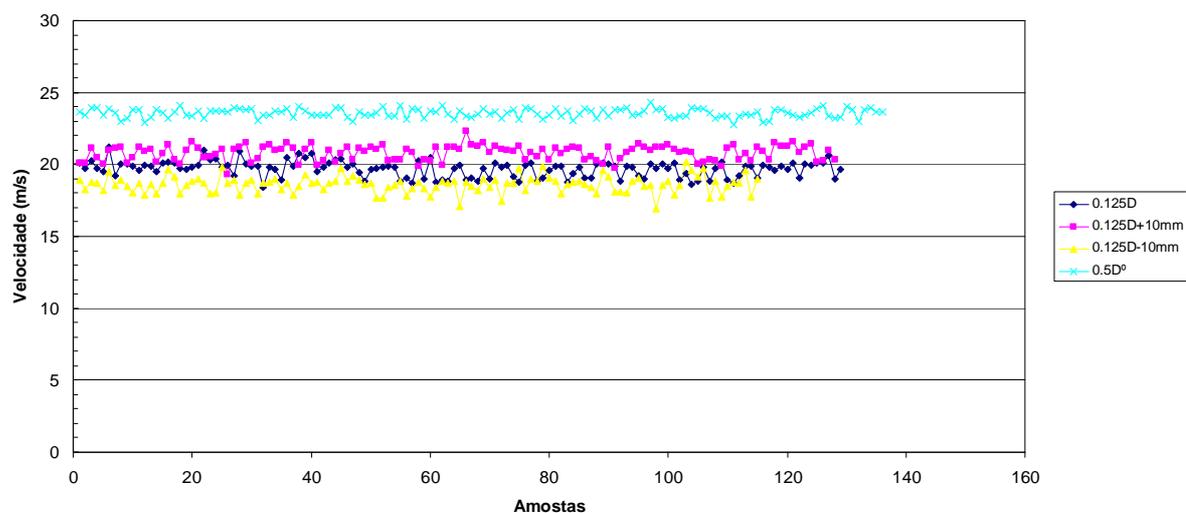


Figura 4.25: Leitura da velocidade média com o sensor óptico em 4 diferentes posições de inserção do sensor, em médio nível de velocidade (950 rpm).

O quantitativo de partículas capturadas pelo medidor OFM foi suficiente e, em função disto, as flutuações foram baixas em todas as leituras. Para cada conjunto de até 153 amostras, desprezou-se apenas 1 amostra no máximo, por disparidade discrepante à média.

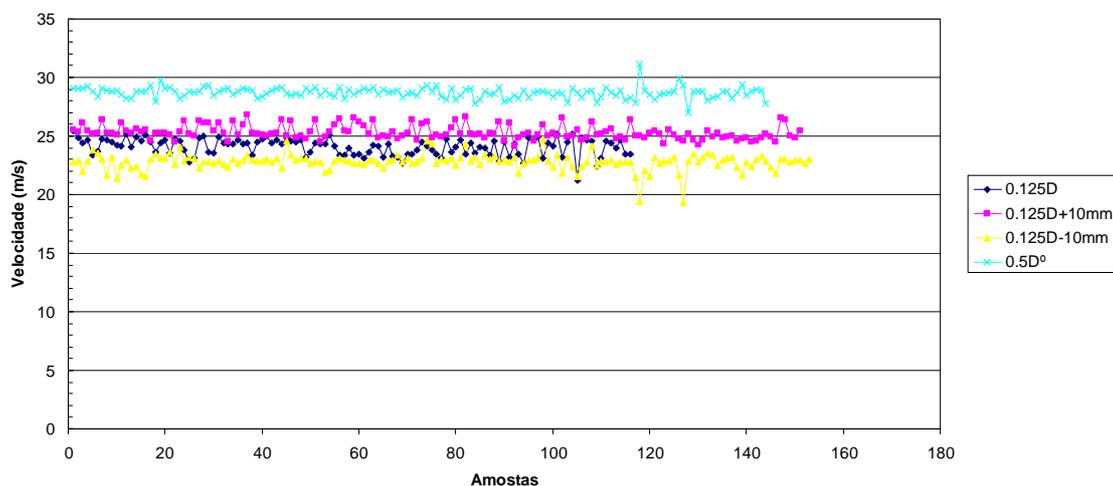


Figura 4.26: Leitura da velocidade média com o sensor óptico em 4 diferentes posições de inserção do sensor, em alto nível de velocidade (1200 rpm).

Assim, na tubulação de 8" onde foi instalado o OFM, erros de  $\pm 10\text{mm}$  na inserção de instalação do medidor podem ocasionar até 6,23% de erro em relação ao valor obtido com o OFM e até 7,56% em relação a referência (Tubo de Pitot), conforme descrito nas Tabelas 4.19.

Tabela 4.19 – Medições com erro de instalação do OFM				
	$\mu$ (m/s)	$\sigma$	$\Delta\%$ ao OFM	$\Delta\%$ ao Pitot
<b>700 rpm</b>				
0.125D	14,492	0,433	0,00%	0,53%
0.125D+10	15,395	0,348	6,23%	6,80%
0.125D-10	13,728	0,432	-5,27%	-4,76%
0.5D	17,900	0,272	23,52%	24,18%
<b>950 rpm</b>				
0.125D	19,676	0,555	0,00%	1,74%
0.125D+10	20,802	0,512	5,72%	7,56%
0.125D-10	18,609	0,581	-5,42%	-3,78%
0.5D	23,559	0,306	19,73%	21,82%
<b>1200 rpm</b>				
0.125D	24,070	0,720	0,00%	2,19%
0.125D+10	25,308	0,591	5,14%	7,45%
0.125D-10	22,791	0,695	-5,31%	-3,24%
0.5D	28,694	0,459	19,21%	21,82%

A magnitude do maior erro de medição encontrado na profundidade de inserção do medidor foi da ordem de 24% para os três patamares de velocidades de escoamento do túnel de vento, indicando o erro de medição máximo para  $Re < 2,40 \times 10^5$ .

#### 4.2.2 Influência do Ângulo de Medição

Nas Figuras 4.27, 4.28 e 4.29 abaixo, tem-se as leituras com o OFM, onde podem ser visualizados os efeitos devido a instalação.

Nos três patamares de velocidades, de baixa a alta velocidade, com desalinhamento de  $-5^\circ$  a  $5^\circ$ , a quantidade de partículas detectadas pelo OFM foi suficiente, sendo desprezadas no máximo 3 amostras, de um total de 125 amostras.

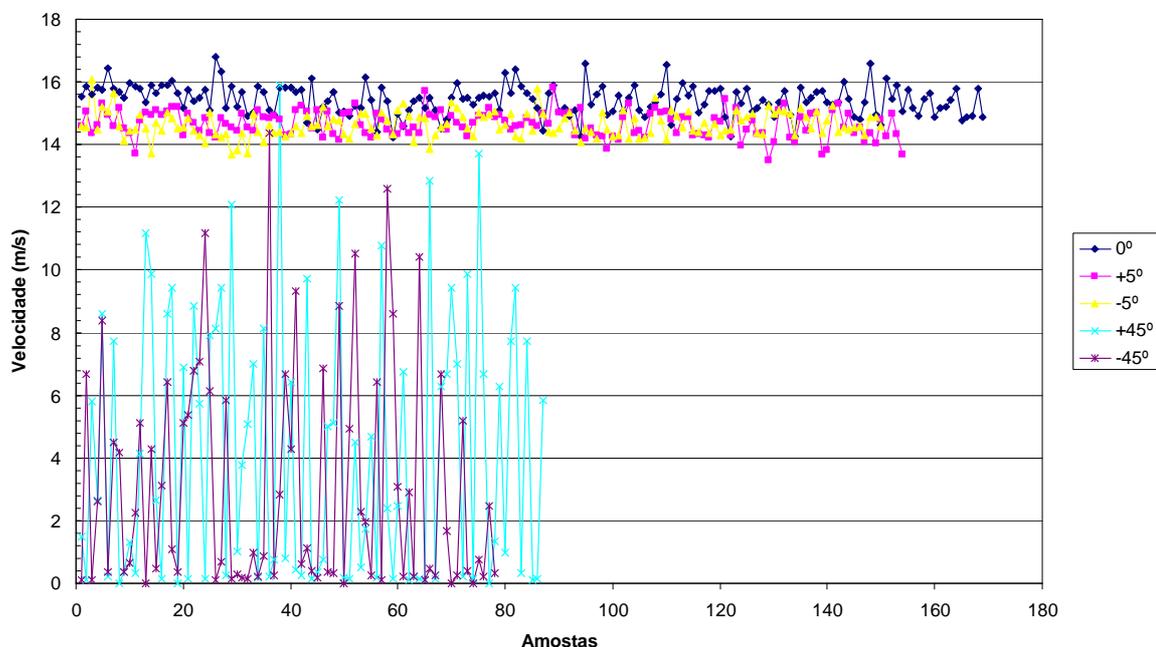


Figura 4.27: Leitura da velocidade média e partículas com o sensor óptico considerando 5 diferentes angulações do sensor, em baixo nível de velocidade (700 rpm).

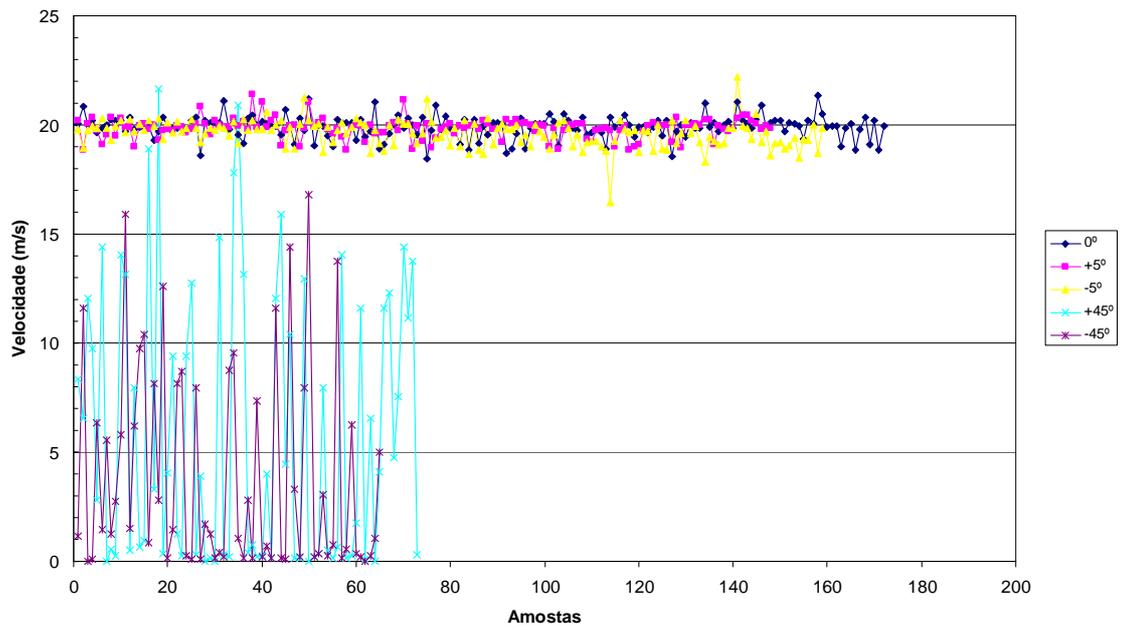


Figura 4.28: Leitura da velocidade média e partículas com o sensor óptico considerando 5 diferentes angulações do sensor, em médio nível de velocidade (950 rpm).

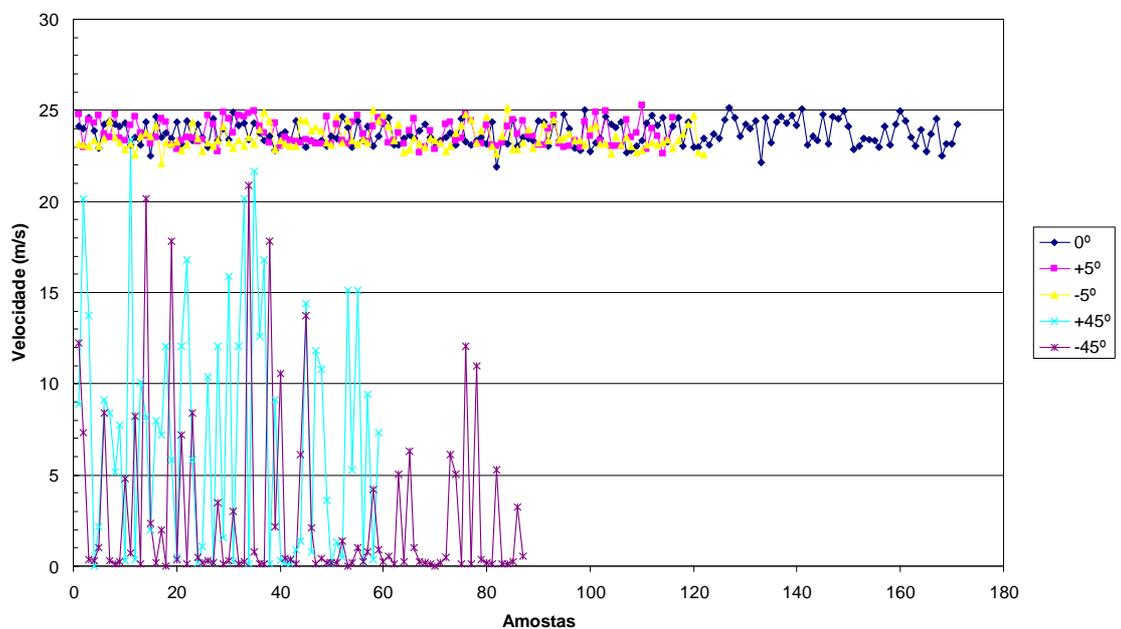


Figura 4.29: Leitura da velocidade média e partículas com o sensor óptico considerando 5 diferentes angulações do sensor, em alto nível de velocidade (1200 rpm).

Como pode ser visto na Tabela 4.20, os resultados obtidos em nossos testes em média e alta velocidades ( $2,05 \times 10^5 < Re < 2,40 \times 10^5$ ), mostraram que a desvio percentual das medições de velocidade médias com o medidor OFM desalinhado  $\pm 5^\circ$  foram de no máximo 1,43%, estando ainda abaixo do máximo estabelecido pela Portaria Conjunta ANP/INMETRO N.º1/2000 [3], para sistemas de medição fiscal de gás natural, quando tomando-se por base a referência da medição proveniente do Tubo de Pitot.

Embora no manual de instalação do fabricante do OFM [43], garanta os resultados do medidor quando num desalinhamento de até  $2^\circ$ , na realidade estes resultados para média e alta velocidade do rotor levaram a crer que o medidor OFM, nestes casos, pode fornecer leitura aferida da vazão mesmo estando num desalinhamento do até  $\pm 5^\circ$ , considerando rotações média e alta do rotor.

Tabela 4.20 – Medições OFM				
	$\mu$ (m/s)	$\sigma$	$\Delta\%$ ao OFM	$\Delta\%$ ao Pitot
<b>700 rpm</b>				
$0^\circ$	15,420	0,483	0,00%	1,57%
$+5^\circ$	14,670	0,410	-4,86%	-3,37%
$-5^\circ$	14,641	0,397	-5,05%	-3,56%
$+45^\circ$	4,202	4,239	-72,75%	-72,32%
$-45^\circ$	3,103	3,567	-79,88%	-79,56%
<b>950 rpm</b>				
$0^\circ$	19,909	0,510	0,00%	1,47%
$+5^\circ$	19,848	0,447	-0,31%	1,16%
$-5^\circ$	19,624	0,613	-1,43%	0,02%
$+45^\circ$	5,902	6,318	-70,36%	-69,92%
$-45^\circ$	3,883	4,690	-80,50%	-80,21%
<b>1200 rpm</b>				
$0^\circ$	23,736	0,661	0,00%	1,49%
$+5^\circ$	23,757	0,660	0,08%	1,58%
$-5^\circ$	23,757	0,660	0,08%	1,58%
$+45^\circ$	7,137	6,635	-69,93%	-69,49%
$-45^\circ$	2,938	4,883	-87,62%	-87,44%

Com relação ao desvio-padrão obtido com as medições do OFM nos três patamares de velocidades, o valor percentual destes em relação ao valor médio obtido nas leituras está claro na Figura 4.30. Na condição operacional descrita pelo fabricante, com o medidor devidamente alinhado a  $0^\circ$ , o desvio máximo foi de 2,78%, pouco acima do limite de  $\pm 2,5\%$  obtido no trabalho científico realizado no renomado laboratório Ceesi [30], estando dois dentre os

três desvios-padrões medidos a  $0^\circ$  contidos no canal de variabilidade de  $\pm 2,5\%$  mencionado. Para as instalações do sensor óptico desalinhado a  $\pm 5^\circ$ , os desvios-padrão não ficaram muito acima deste canal de variabilidade, alcançando o valor máximo de 2,79% com o sensor a  $5^\circ$  e 3,12% com o sensor a  $-5^\circ$ .

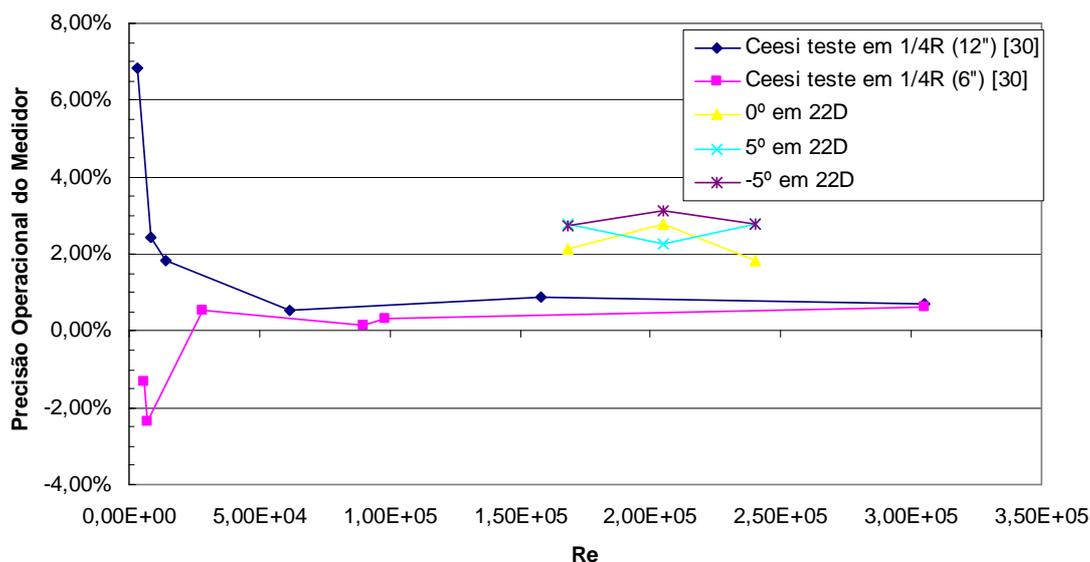


Figura 4.30: Verificação da precisão do OFM e comparação com trabalho científico [30].

O efeito de Instalação no erro observado nas medições com o OFM para desalinhamento de  $45^\circ$  pode ser visto na Figura 4.31. Quando comparado, com o resultado de outro trabalho científico [30], os valores dos erros obtidos estão em outros patamares. Devido ao ângulo de  $45^\circ$ , as linhas de corrente afetaram consideravelmente as leituras de velocidade das partículas. Os efeitos de inércia, neste caso, são consideráveis. Inclusive para o posicionamento a  $\pm 45^\circ$  os números de amostras, ou seja, número de partículas analisadas pelo OFM foi menor.

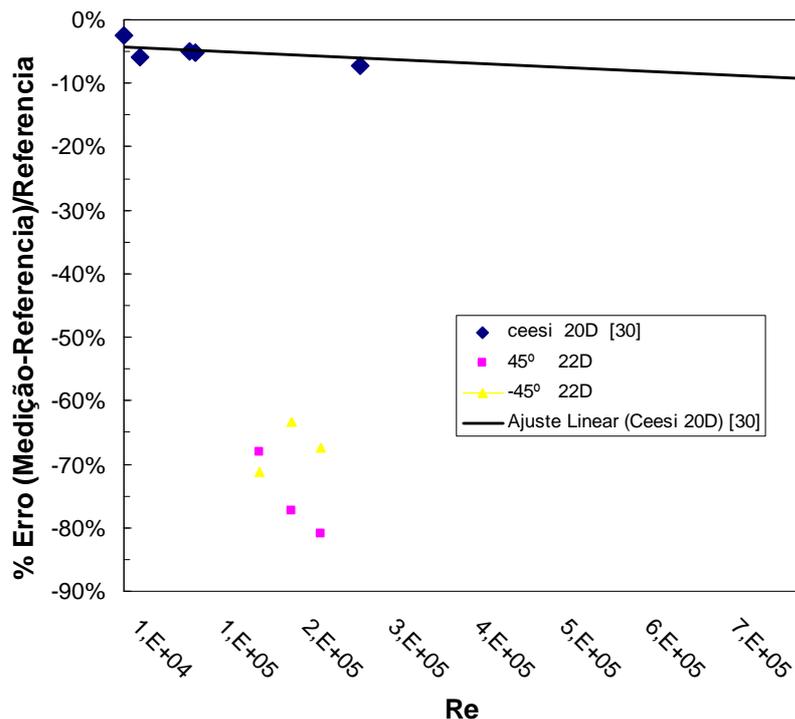


Figura 4.31: Efeitos de Instalação na medição de vazão por dispersão a Laser.

Estes efeitos de inércia podem ter sido fortemente influenciados pela metodologia de leitura com o OFM utilizada. No presente trabalho, procedeu-se com a metodologia de instalação do ponto de medição a  $0,125D$  na área de secção transversal, enquanto no trabalho científico comparado a metodologia foi de medição com o OFM instalado na posição  $0,5D$  na área de secção transversal, ou seja, na linha de centro da tubulação do túnel de vento.

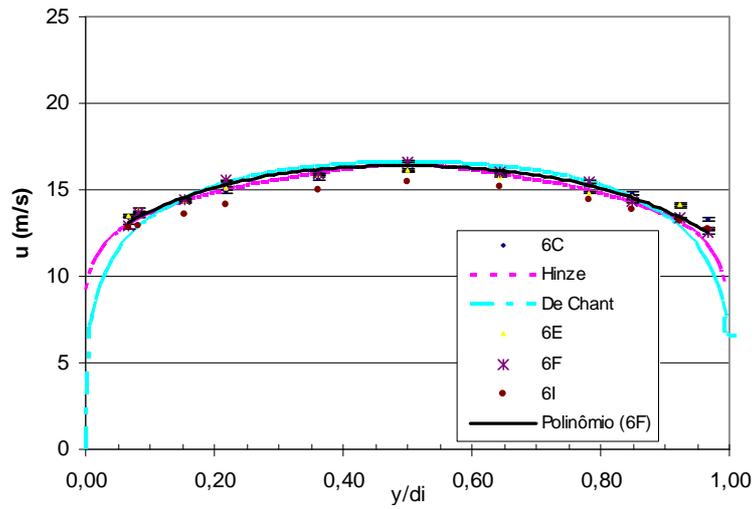
Segundo o fabricante [43], ambas as metodologias são válidas, mas observou-se que os efeitos de inércia são maiores numa posição onde os gradientes de velocidades transversais são maiores, o que pode ter contribuído para um maior desvio das linhas de corrente e possivelmente efeito de recirculação local ou “swirl” que contribuiu para tamanha discrepância de resultados. A magnitude dos valores observados está mostrada na Tabela 4.21 .

Tabela 4.21 – Valores Observados na Figura 4.31.				
Vazão Pitot [ $m^3/s$ ]	Vazão OFM [ $m^3/s$ ]		Diferenças %	
	-45°	45°		
0,395	0,1070	0,1132	-71,1%	-68,2%
0,510	0,1822	0,1127	-63,4%	-77,2%
0,608	0,1959	0,1122	-67,5%	-81,0%

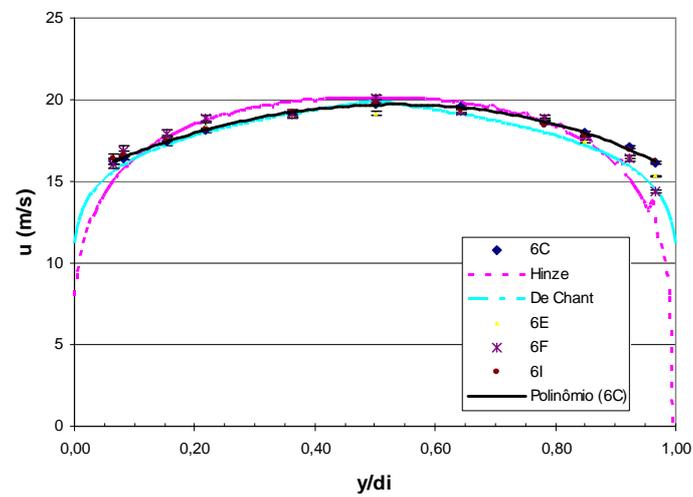
### **4.3 Influência da Inserção do Medidor De Vazão Ótico no Perfil Levantado pelo Tubo de Pitot à 21D à Jusante do Medidor L2f.**

Os perfis de velocidades obtidos com o tubo de Pitot na secção B, sob interferência do sensor óptico no escoamento, estão à mostra nas Figuras 4.32-a, 4.32-b e 4.32-c a seguir. É possível notar, para a configuração do experimento Exp6, que os perfis de velocidade mantiveram-se com patamares próximos de simetria e cujo formato se assemelha aos perfis teóricos modelados. No entanto, percebe-se que a influência da inserção do sensor óptico é expressiva em baixo nível de velocidade, ou seja, para  $Re \cong 1,70 \times 10^5$ .

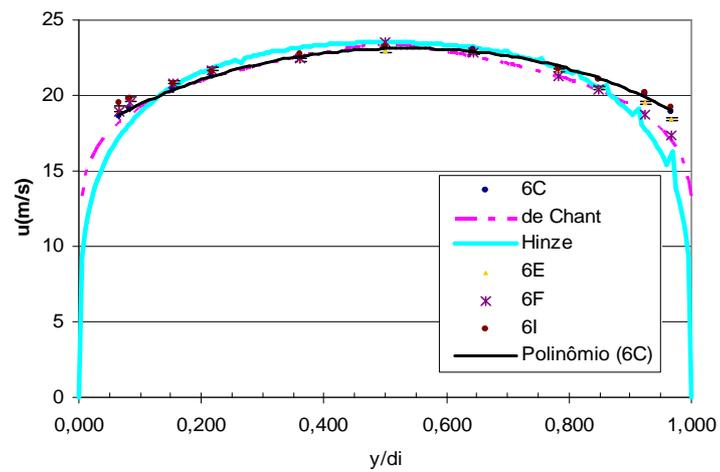
Percebe-se, também, que para nível médio e alto de velocidades de escoamento ( $Re \cong 2,05 \times 10^5$  e  $2,4 \times 10^5$ ), o efeito intrusivo foi suprimido por outros efeitos.



a)



b)



c)

Figura 4.32 - Comparação completa dos perfis de velocidade relativos aos experimentos seguindo a configuração 6 a: a) 700rpm, b)950 rpm, c)1200 rpm.

Na Tabela 4.22, 4.23 e 4.24 mostram-se as magnitudes do desvio percentual devido ao efeito obstrutivo no escoamento. Em baixa velocidade, ou seja, com o rotor a 700rpm, percebe-se o efeito no desvio percentual das velocidades locais distribuído de forma similar ao longo dos pontos da secção transversal. Isto se deve, ao fato do sensor óptico estar instalado à montante do sensor pitométrico em plano ortogonal ao plano de varredura efetuada com o sensor do Pitot. Já nos patamares médios e altos de velocidades do rotor (950 e 1200rpm), não se observou tendência com relação a efeito obstrutivo ao longo das velocidades locais medidas, pois, acredita-se que os efeitos de inércia e arrasto das linhas de corrente em volta do sensor óptico de  $\frac{3}{4}$ " em um duto de 8", com Número de Reynolds a partir de  $2,05 \times 10^5$ , se tornam inexpressivos.

Tabela 4.22 - Comparativo das Velocidades Locais a 700 rpm entre os perfis 6C e 6I

Posição (y/di)	6C	6I	$\Delta\%$ (perfis6I/6C)
0,019	13,43	12,86	-4,30%
0,076	13,57	12,97	-4,47%
0,155	14,33	13,59	-5,18%
0,215	14,91	14,13	-5,17%
0,357	15,68	15,02	-4,23%
0,500	16,09	15,51	-3,61%
0,643	16,00	15,23	-4,85%
0,785	15,25	14,42	-5,46%
0,845	14,84	13,89	-6,39%
0,924	14,10	13,23	-6,19%
0,981	13,32	12,76	-4,19%
Vmedia=	14,68	13,96	-4,91%

Tabela 4.23 - Comparativo das Velocidades Locais a 950rpm entre os perfis 6C e 6I

Posição (y/di)	6C	6I	$\Delta\%$ (perfis6I/6C)
0,019	16,21	16,42	1,28%
0,076	16,44	16,58	0,85%
0,155	17,47	17,43	-0,27%
0,215	18,13	18,14	0,06%
0,357	19,16	19,21	0,25%
0,500	19,73	19,71	-0,09%
0,643	19,55	19,41	-0,72%
0,785	18,55	18,45	-0,53%
0,845	17,94	17,79	-0,82%
0,924	17,09	16,93	-0,96%
0,981	16,12	16,19	0,41%
Vmedia=	17,86	17,84	-0,05%

Tabela 4.24 –Comparativo das Velocidades Locais a 1200 rpm entre os perfis 6C e 6I

Posição (y/di)	6C	6I	$\Delta\%$ (perfis6I/6C)
0,019	18,65	19,46	4,32%
0,076	19,11	19,76	3,40%
0,155	20,35	20,75	1,98%
0,215	21,31	21,53	1,03%
0,357	22,49	22,72	1,01%
0,500	23,13	23,28	0,64%
0,643	23,00	22,98	-0,07%
0,785	21,87	21,78	-0,40%
0,845	21,05	21,09	0,20%
0,924	20,06	20,15	0,46%
0,981	18,89	19,24	1,84%
Vmedia=	20,90	21,16	1,31%

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E PROPOSIÇÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Considerações com relação aos Objetivos propostos:

- A metodologia utilizada para amortecimento das flutuações rápidas (ruídos) nas leituras das pressões diferenciais mostraram-se satisfatórias enquanto utilizando o menor comprimento de tubulação capilar utilizada dentre todas. Alcançou-se o objetivo de diminuir a dispersão dos dados medidos sem influenciar sistematicamente nas médias dos valores. Conforme esperado, quando uma súbita mudança de pressão foi aplicada, o indicador de pressão registrou 99% da mudança ocorrida em menos que 60 s. O amortecimento devido ao “*damping*” não escondeu flutuações regulares da pressão medidas;
- Durante a caracterização do escoamento, na configuração de montagem do Experimento 6 (melhor condição de montagem), os erros encontrados se mantiveram próximos aos descritos na norma ISO3966/2008 visto que os valores da velocidade média poderiam alcançar, para esta configuração de instalação de Pitot até 4%, sendo que até 2% de erro poderia ser apenas pelo efeito do nível de turbulência [39];
- Foram baixos os erros encontrados nas medições com o tubo de Pitot, conforme os critérios da norma ISO3966/2008, sendo que o erro na medição da pressão diferencial e o erro devido às flutuações lentas de velocidade foram mitigados ao melhorar os procedimentos e aparatos de montagem do conjunto tubo de Pitot. Os erros aleatórios na estimativa da velocidade local que foram considerados foram: Erro da massa específica e erro no cálculo do fator de compressibilidade, ambos os quais estiveram sobre controle e dentro dos limites da norma. Os erros sistemáticos considerados foram: Erro na calibração do tubo de Pitot, erro devido à turbulência, erro devido ao gradiente de velocidade

transversal, erro devido ao bloqueio do duto e o erro entre tomadas de pressão total e estática. Levando-se em conta todos estes erros sistemáticos e aleatórios considerados, o resultado global destes erros mencionados mantiveram-se em patamares esperados conforme prescritos pela norma. Apenas alcançou-se um resultado global para estes erros devido à dificuldade em se analisar e medir isoladamente a influência dos efeitos mecânicos e vibratórios dos demais efeitos sobre a medição.

- Apesar da maior perda de carga ao longo do túnel de vento, a proposta de uso de retificadores de fluxo à montante e à jusante no escoamento foi a de mais sucesso, visto que alcançou o melhor perfil de velocidades turbulento e completamente desenvolvido, tanto na secção transversal A quanto na secção transversal B, com relação aos critérios de simetria, dispersão de dados, flutuação devido à turbulência, e aproximação aos perfis teóricos empíricos. Desta forma ratificando o Memorial de Cálculo dos Retificadores de Fluxo no Apêndice A, a ser utilizado em trabalhos científicos futuros.
- Apesar do não enquadramento por completo do tubo de Pitot utilizado às condicionantes da norma ISO3966/2008 [39] utilizada, este foi utilizado com sucesso na caracterização do escoamento nas secções transversais A e B, servindo como base para comparações com os resultados oriundos da tecnologia L2F de medição de vazão Óptica. Inclusive a metodologia de cálculo do fabricante do sensor tubo de Pitot levou a valores de velocidades locais bastante e suficientemente próximos aos valores calculados a partir das premissas e modelagens descritas na norma;
- Foi possível observar certa repetibilidade quanto aos experimentos com o tubo de Pitot e defender fortemente a premissa de que o escoamento nas secções de medição eram turbulentos e completamente desenvolvidos;
- Foi possível observar e defender que a utilização simultânea das metodologias de medição óptica por tempo de trânsito ao mesmo tempo

em que se faz varreduras com tubo de Pitot numa secção transversal ortogonal ao sensor óptico, distante em  $21D$ , e nas configurações descritas deste experimento, quando  $Re > 2,05 \times 10^5$ , é uma metodologia válida, por não indicar interferência nas leituras entre os medidores.

- Foi possível comparar o comportamento das medições com o sensor óptico frente ao de referência adotado. Foi possível também valorar a magnitude com sucesso dos efeitos devido aos possíveis erros de instalação nos resultados com o medidor de vazão por dispersão a laser.

Considerações com relação à proposições de trabalhos futuros:

- Utilizar modelagem fluidodinâmica computacional para simular o perfil de velocidades na entrada do túnel de vento, assim como na secção transversal do duto imediatamente antes à influência física dos medidores de vazão utilizados para comparação dos valores encontrados, a fim de fortalecer os resultados dos experimentos realizados e/ou identificarem possíveis motivos de discrepâncias.
- Na norma ISO3966 é citado que deve-se levantar o perfil de velocidades em duas direções ortogonais ao longo da secção transversal, ao menos. Como, devido a condições construtivas do túnel de vento, só efetuou-se tais medições ao longo de uma direção, propõe-se que a comparação entre os resultados com o tubo de Pitot e o sistema L2F sejam feitos nestas duas direções em trabalhos futuros.
- Propõe-se, também que sejam feitas tais comparações de resultados destes testes, levando em conta instalações com diferentes diâmetros, com o intuito de verificar a adimensionalidade dos dados obtidos, para confirmar se os valores encontrados com o uso dos medidores ainda são satisfatórios.
- Outra sugestão é que sejam feitas tais comparações de resultados destes testes, levando em conta instalações com “acidentes de linha”, para medir a sensibilidade do sensor e tecnologia L2F em medições de

vazão influenciadas por curvas ortogonais de planos diferentes, visto que nos segmentos industriais, mais especificamente em plantas de processamento, tais acidentes de linhas são comuns.

- Realizar testes de medições com vários comprimentos de tubo capilar de *damping* com o objetivo de comparar a precisão de medição com relação ao comprimento de capilar usado para *damping*.
- Realizar novamente tais testes levando em conta a possibilidade de se escolher dentre as várias opções de calibragem do OFM pré-instaladas em seu software, de maneira que seja possível minimizar os erros na medição de vazão volumétrica entre os valores medidos pelo OFM e por outro medidor, ao ajustar a calibragem mais adequada para o fluido e perfil geométrico do duto utilizado no escoamento.
- Realizar testes com o L2F em plataformas de processamento de petróleo de diferentes bacias-reservatórios, para calibrá-lo “in situ” com a composição exata do gás, inclusive considerando gás de flare proveniente de reserva de pré-sal, e analisar o dispositivo medidor frente aos efeitos de deposição de umidade e sujeira na janela emissora/receptora do sinal laser em diferentes patamares de velocidades.

## 6 REFERÊNCIAS

- [1] LEI N 2.004, de 3 de outubro de 1953. [Acessado em: 11 de maio de 2012.] [www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/L2004.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L2004.htm)
- [2] Lei nº 9.478 de 1997. [Acessado em: 11 de maio de 2012.] [www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/L9478.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9478.htm)
- [3] ANP/INMETRO. Portaria Conjunta Nº 1, de 19.06.2000 - DOU 20.6.2000. [Acessado em: 21 de out. de 2011.] <http://www.anp.gov.br/>; pp. 1, 11-12.
- [4] *Wikipedia*. [Acessado em: 20 de fev. de 2011.] <http://pt.wikipedia.org/>
- [5]. *Tn Petroleo*. [Acessado em: 20 de fev. de 2011.] <http://www.tnpetroleo.com.br/>
- [6] *O Globo*. . [Acessado em: 21 de fev. de 2011.] <http://oglobo.globo.com/>
- [7] RAMON SILVA MARTINS, Installation Effects Of Upstream Elbows On The Correction Factor Of Single-Path Transit-Time Ultrasonic Flow Meters, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – 2012.
- [8] FOX, Robert W.; MCDONALD, *Alan T. Introdução à mecânica dos fluidos*. 5. ed. - Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, c2001. xii, 504 p. ISBN 8521612613 (broch.)
- [9].SALGADO, A.; RAMOS, R. COB09 - 1510 - *Perfect gas approach validation aiming estimation of thermophysical properties in flare flows considering operational data*. Proceedings of the 20th International Congress of Mechanical Engineering. Gramado, RS : s.n., 2009.
- [10] REPORT AGA Nº 10, 2003, "*Speed of Sound in Natural Gas and Other Related Hydrocarbon Gases*", Ed. American Gas Association, Washington, DC
- [11] DELMÉE, G. J. *Manual de Medição de Vazão*. 2ª Edição, Editora

Edgard Blücher, 1995 , pp7-12, 263

[12] CUSTOM HVAC. <http://customhvaconline.com/>

[13] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO

5167-1: *Medição de vazão de fluido por meio de dispositivo de pressão diferencial - Parte 1: Placas de orifício, bocais e tubos Venturi inseridos em conduites com seção transversal circular totalmente cheio.*1991.

[14] K.G. RANGA RAJU, P.D. POREY, G.L. ASAWA, *Displacement effect in Pitot tube measurements in shear flows*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1997.

[15] A.J. PESARINI ., R. BIGOT, V.J. NADAL MORA, C.A. DI BERNARDI, P.J. RINGEGNI. *Theoretical analysis related to aspects of the pitot probe methodology in flow rate determination for blowers performance tests.* - Departamento de Aeronautica, Facultad de Ingeniera, Universidad Nacional de La Plata, La Plata, Buenos Aires, 2002.

[16].PROYECTO 1 IRAM 19004, Ventiladores. Ensayos. Metodos de laboratorio, IRAM, Argentina; 1995.

[17] REX KLOPFENSTEIN JR., “*Air velocity and flow measurement using a Pitot tube*”. King Industries Inc., 500 Lehman Avenue, Bowling Green, OH 43402, USA.

[18] QUEIROZ, Marcos de Castro, “*Análise do escoamento de uma estação de calibração de tubo de pitot usando as técnicas de pitometria e anemometria térmica*” – Núcleo universitário Coração Eucarístico. IPUC– Instituto Politécnico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica -2006

[19] SALGADO, Alex Luz – “*Análise da variabilidade induzida por acidentes de linha na medição de vazão ultrassônica por tempo de trânsito*”, PPGEM - UFES – 2009.

[20] SOARES, Cleide B.- “*Estudo experimental do comportamento*

*fluidodinâmico na seção de testes de um túnel de vento para baixas velocidades*". IPUC - Instituto Politécnico- Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – 2008

- [21] 25th international north sea flow measurement Workshop. October 16-19, 2007, Oslo, Norway. "*Flare Metering with Optics From Blue-Sky Technology to the Real World*". Jody Parker, Gordon Stobie, ConocoPhillips Company. Ivan Melnyk, Photon Control Chip Letton, Letton-Hall Group
- [22] IVAN MELNYK, DEREK MONTGOMERY, DARYL JAMES. "*Optical gas flow meters – a novel gas flow Measurement technique*". Photon Control Inc., Canada Chip Letton. Letton-Hall Group, Houston, TX.
- [23] THOMPSON, D.H. (1968). "*A tracer-particle fluid velocity meter incorporating a laser*". J. Sci. Intsr. S.2, v.1 pp.929-932
- [24] eFundu. [Acessado em: 24 de fev. de 2011.] <http://www.efunda.com/>
- [25] SMART, A.E. and ABBISS, J.B, (1988). "*Discrimination techniques for a highly accurate laser-sheet anemometer*", 7th Int. Conf. Photon Correlation Techniques and Applications Abbiss and Smart (eds) v. 1. OSA, pp.109-116.
- [26] SCHODL, R.. "On the extension of the range of applicability of LDA by means of the laserdual- focus (L2F) technique." *The Accuracy of Flow Measurement by Laser Doppler Methods*, 1976. pp.480-489.
- [27] AZZAZY, M. "*Development of an optical volumetric Flowmeter.*" Spectron Development Labs., Inc., Costa Mesa, CA. Final Report..1990.
- [28] "*Characterization of a supersonic flowfield using different laser based techniques by Uwe Brummund and Frithjof Scheel*". German Aerospace Center, DLR Lampoldshausen D-74239 Hardthausen a.K., Germany.
- [29] F. KOST, C. KAPTEIJN. "7th International Conference on "LASER

- ANEMOMETRY - ADVANCES AND APPLICATIONS”, University of Karlsruhe, Germany, September 8-11, 1997. “*Application of Laser-Two-Focus Velocimetry to Transonic Turbine Flows.*” Institut für Strömungsmechanik, DLR, D-37073 Göttingen.
- [30] Summary of Testing - FOCUS™ probe optical gas flow meter. CEESI Test Results -Prepared for Photon Control - March 6, 2006.
- [31] RAMOS, Rogério. Desenvolvimento de medidor de vazão de gás por ultra-som: Modelagem, protótipo e testes. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória : s.n., 2006. Dissertação de Mestrado.
- [32] GGFR (*Global Gas Flaring Reduction: A public Private Partnership*), Qatar Workshop Doha, 8-9 May 2011, pp. 3-21, 33, 79-80, 87, 90, 94 <http://www.hse-reg-dg.com/>
- [33] Focus Probe FAQ – Photon Control – [www.photon-control.com](http://www.photon-control.com) (2011)
- [34] MARTINS, Ramon Silva. *Simulações numéricas em seções de medição de vazão de escoamentos a baixa pressão*. Vitória – 2009
- [35] *Tmco*. [Acessado em: 22 de fev. de 2011.] <http://tmco-usa.com>
- [36] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 5167-1: *Medição de vazão de fluido por meio de dispositivo de pressão diferencial - Parte 1: Placas de orifício, bocais e tubos Venturi inseridos em conduites com seção transversal circular totalmente cheio*.1991.
- [37] FRANK M. WHITE, Fluid Mechanics, 4th edition, University of Rhode Island, 1998, Appendix A , ISBN-10: 0072281928.
- [38] FRATTOLILLO, A. and MASSAROTTI, N. “*Flow conditioners efficiency a comparison based on numerical approach*”. Flow Measurement and Instrumentation. 2002, Vol. 13, pp. 1-11.
- [39] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION.

- ISO/FDIS 3966: *Measurement of fluid flow in closed conduits – Velocity area method using Pitot static tubes*. 2008. pp. 13, 14, 28, 35, 41, 44
- [40] *Measurement of Gas by Multipath Ultrasonic Meters – Transmission Measurement Committee Report No. 9*. American Gas Association. Arlington, Virginia : s.n., 1998.
- [41] LAWRENCE J. DE CHANT, “*The venerable 1/7th power law turbulent velocity profile: a classical nonlinear boundary value problem solution and its relationship to stochastic processes,*” Analytic Entrainment LLC, 1541 Summit Hills Dr. NE, Albuquerque, NM 87112, USA.
- [42] Technical datasheet – KIMOR Instruments - [www.kimo.fr](http://www.kimo.fr)
- [43] Focus<sup>tm</sup> probe installation and maintenance manual - revision 2 - Photon Control – [www.photon-control.com](http://www.photon-control.com) (2011)

## APÊNDICE A – Memorial de Cálculo dos Retificadores de Fluxo

### **1. INTRODUÇÃO**

### **2. REQUISITOS DO SISTEMA**

### **3. ADEQUAÇÃO DO PROJETO ÀS PREMISSAS E A NORMATIZAÇÃO**

### **4. PROJETO TEÓRICO E ADAPTAÇÕES FINAIS A NORMA**

## 1. INTRODUÇÃO

Esta memória destina-se a reunir as informações e cálculos que foram utilizados no dimensionamento dos retificadores de fluxo a serem instalados à montante e/ou jusante do escoamento do túnel de vento do Laboratório de Maquinas de Fluxo (LabMaqFlu) da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) com o Objetivo principal de conseguir um perfil turbulento completamente desenvolvido de melhor qualidade, numa menor distância possível do último acidente de linha da tubulação e o objetivo secundário de refinar a incerteza nas medições dos testes experimentais.

## 2. REQUISITOS DO SISTEMA

Os Retificadores a serem construídos deverão ser projetados e construídos visto as seguintes necessidades/critérios:

- I. Deverão ter uma configuração geométrica que minimize, dentro do possível, as perdas de cargas;
- II. Deverão ter configuração de fácil fabricação desde que não acarrete perda de funcionalidade;
- III. Serão construídos conforme normatização específica para sua aplicação em escoamentos onde estejam instalados medidores de vazão, conforme ISO5167-1991; [13]
- IV. Serão os mais semelhantes possível, visto que sua intercambiabilidade não afete os resultados obtidos quando instalados à montante e à jusante do escoamento.

### 3. ADEQUAÇÃO DO PROJETO ÀS PREMISSAS E A NORMATIZAÇÃO

Informações sobre as características nas quais os retificadores serão instalados:

- a. Os retificadores serão instalados num túnel de vento, cuja tubulação estará sob efeito de vibração, devido ao rotor de sucção de ar, concomitantemente com o escoamento cuja pressão diferencial atinge até 50mm/H<sub>2</sub>O. Pressão diferencial, que em condições normais (25°C e 1 atm), pode significar um escoamento local axial de até 30 m/s.
- b. Os condutes que irão compor cada retificador terão comprimentos mais próximos possível, considerando o processo de fabricação e ferramental necessário, com objetivo de cada unidade tubular oferecer igual perda de carga e não afetar o perfil de velocidades retificado, nem causar o efeito de recirculação ou “swirl”.
- c. As Superfícies das extremidades dos condutes que compõem o retificador serão lixados perpendicularmente, juntos, após colados entre si em suas respectivas posições para garantir máxima perpendicularidade em relação ao eixo axial do túnel de vento, quando montado internamente neste;
- d. Os retificadores terão suas extremidades limadas, lixadas em 120 até 600 mesh progressivamente, com finalidade de minimizar influências geométricas na formação do perfil de velocidades final;
- e. Conforme Critérios da Norma ISO ISO5167-1991: [13]

- i. Não se aplicar a *“tamanhos de tubulação menores que 50 mm ou maiores que 1200 mm ou para números de Reynolds de tubulação menores que 3 150.”*
- ii. O Retificador de Fluxo, *“quando instalado como descrito em 7.3.1., o uso de um condicionador de vazão não introduz qualquer incerteza adicional no coeficiente de descarga”*.
- iii. Para Retificadores de Fluxo Instalados à montante do Medidor de Pressão Diferencial: *“...o comprimento reto entre o condicionador e o elemento primário será igual a, no mínimo, 22D.”*
- iv. *“Condicionadores são totalmente efetivos somente se sua instalação é tal que sejam deixados os menores espaçamentos em torno dos elementos resistivos do elemento, deste modo não permitindo vazão de by-pass que iriam evitar sua operação correta.”*
- v. *“Quando corretamente construídos, os condicionadores são usados com as combinações de comprimento de tubulação descritas acima, eles podem ser usados em conjunto com qualquer perfil de velocidade de entrada.”*
- vi. *“A escolha de um condicionador depende da natureza da distribuição de velocidade que deve ser corrigida e da perda de pressão que pode ser tolerada.”*

Obedecendo aos critérios acima descritos, procedeu-se a escolha dentre os tipos de retificadores (ou condicionadores) de fluxo, qual tipo seria construído. Os tipos são os descritos na Tabela A.1:

TABELA A.1 - TIPOS DE RETIFICADORES DE FLUXO APRESENTADOS			
TIPO	NOME	PERDA DE PRESSÃO APROXIMADA	CARACTERÍSTICA GEOMÉTRICA PRINCIPAL
TIPO A	Zanker	$5\rho_1 U_1^2 / 2$	Placa perfurada com furos de tamanhos determinados
TIPO B	Sprenkle	$11\rho_1 U_1^2 / 2$ até $14\rho_1 U_1^2 / 2$	Três placas perfuradas em série com um comprimento igual a um diâmetro da tubulação entre placas sucessivas.
TIPO C	feixe de tubos	$5\rho_1 U_1^2 / 2$	Um conjunto de tubos paralelos e tangenciais juntos e mantidos rigidamente na tubulação
TIPO D	retificador AMCA	$0,25\rho_1 U_1^2 / 2$	Colmeia com células quadradas
TIPO E	retificador Étoile	$0,25\rho_1 U_1^2 / 2$	Palhetas radiais em igual espaçamento angular

#### 4. PROJETO TEÓRICO E ADAPTAÇÕES FINAIS A NORMA

Escolheu-se o Tipo C, com certas adaptações posteriormente comentadas, visto que dentre os medidores de menor perda de pressão esperada, é o de mais fácil fabricação.

Este tipo possui os seguintes critérios geométricos que serão obedecidos:

- 1) N<sup>o</sup> de tubos mínimos por retificador de fluxo: 19 Tubos;
- 2) Seu comprimento deve ser maior ou igual a 10d;
- 3) O diâmetro dos Tubos não deve ser maior que 0,2D; ou seja  $d_t \leq 0,2D$ ;

Ao se aplicar as três características geométricas acima descritas no Túnel de Vento cujo Diâmetro interno (D) é de 182 mm e, considerando os diâmetros possíveis de Tubos comerciais de material Cloreto de Polivinila (PVC) existentes no mercado, chegou-se a conclusão que, para obedecer aos três critérios geométricos mencionados com certa folga, seria possível a construção do Retificador com Conjuntos iguais de Tubos nos seguintes diâmetros nominais: 20 mm, 25 mm e 32 mm;

Desconsiderou-se a utilização dos tubos de 20 mm, visto que seria de difícil montagem de maneira que garantisse o descrito no Capítulo3 -Letra a. - Item *iv*.

Assim procedeu-se, pois menores e mais numerosos seriam os espaçamentos dentre as tubulações que comporão o retificador de Fluxo.

Para escolher dentre os tubos de 25mm e de 32mm fez-se a seguinte simulação geométrica canônica aproximada, por meio de desenho em Software paramétrico tipo CAD, tendo em vista a necessidade de se reproduzir antes da montagem, com uso de escala, a configuração esperada:

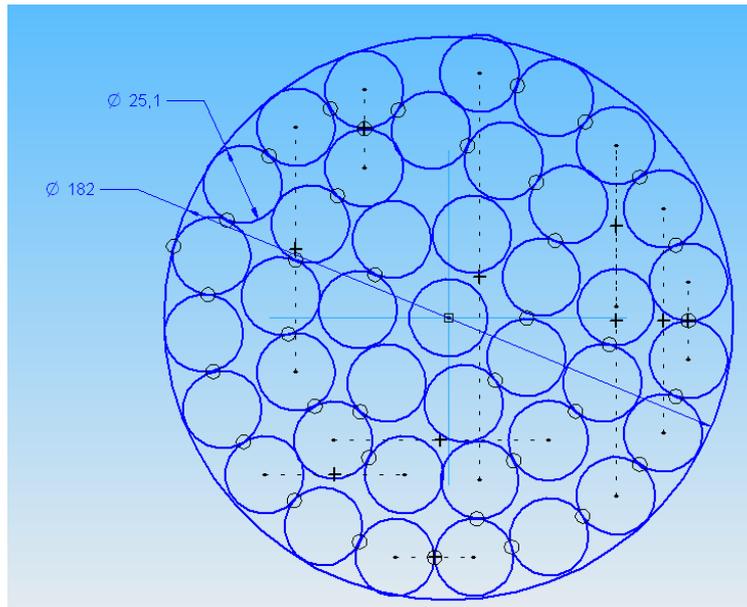


Fig. A.1 – Simulação de Arranjo de Tubulações visando o máximo de preenchimento da secção transversal para tubos de 25mm

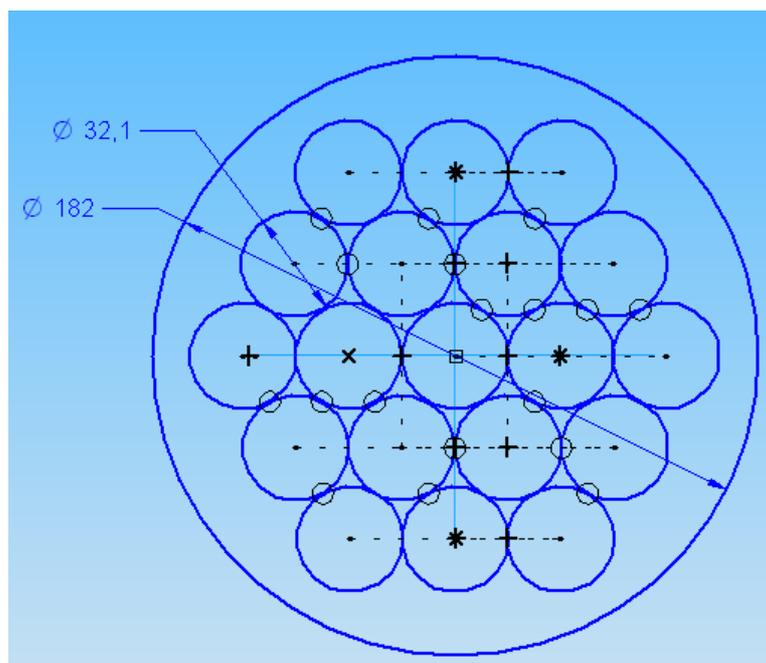


Fig. A.2 – Simulação de Arranjo de Tubulações visando o máximo de preenchimento da secção transversal para tubos de 32mm

Observa-se que para as configurações simuladas nas figura A.1 e A.2, que os três critérios geométricos são atendidos. No entanto, na Figura A.2, percebe-se que o critério 1 é alcançado sem uma margem de segurança, de forma que,

para se adicionar mais tubos, seria necessário transladar o conjunto mostrado na Fig. A.2 para a parede interna do Túnel de Vento de forma a sofrer perdas de simetria no conjunto.

Escolheu-se, assim projetar e montar o retificador de fluxo com tubos de 25 mm considerando:

- Possibilidade de se construir arranjo mais simétrico,
- Arranjos com menor comprimento longitudinal;
- Possibilidade de modificações de arranjos que atendam aos três critérios geométricos;
- Configuração que permita diminuir os efeitos “*By-pass*” descritos na norma.

Diante da possibilidade de aprimorar o projeto de retificadores tipo C, atendendo aos critérios normatizados, a simetria, visando menor perda de pressão, desenvolveu-se o projeto de retificador de fluxo descrito a seguir na Figura A.3, com tubulações montadas tal como ‘colméias’.

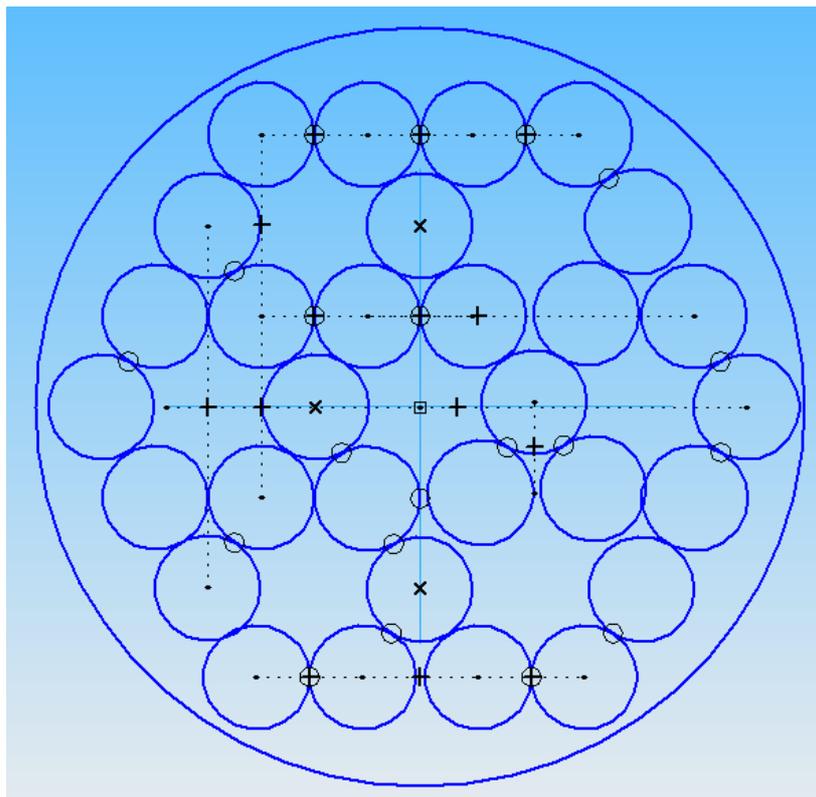


Fig. A.3 – Projeto de Arranjo de Tubulações para construção de Retificador de Fluxo Tipo C adaptado para arranjo colméia.

As dimensões finais do retificador:

- Comprimento (L): 25,5 cm;
- Diâmetro dos tubos (d): 25,1 mm;
- Número de Tubos: 30 tubos;

Os retificadores, para seu devido encaixe no túnel de vento, foram fixados a tubos menores comerciais denominados tubos CPVC, conforme as fotos nas Fig. A4a e Fig. A4b.



Fig A4a- Foto Superior "As Built" do Projeto construído.



Fig A4b - Foto Lateral "As Built" do Projeto construído.

## APÊNDICE B – Projeto do Suporte do Medidor tubo de Pitot

### **1. INTRODUÇÃO**

### **2. REQUISITOS DO SISTEMA**

### **3. ADEQUAÇÃO DO PROJETO ÀS PREMISSAS E ADAPTAÇÕES FINAIS**

## 1. INTRODUÇÃO

Esta memória destina-se a reunir as informações e cálculos que foram utilizados no dimensionamento do conjunto suporte a ser instalado para o uso do tubo de Pitot no escoamento do túnel de vento do Laboratório de Máquinas de Fluxo (LabMaqFlu) da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES). Com o objetivo principal de se conseguir mitigar efeitos vibratórios, facilidade na movimentação do tubo de Pitot ao longo da secção transversal, melhor alinhamento longitudinal da cabeça do sensor, minimização dos efeitos provenientes dos erros de cilindridade do túnel de vento na medição com o sensor e o objetivo secundário de refinar a incerteza nas medições dos testes experimentais.

## 2. REQUISITOS DO SISTEMA

O suporte do sensor deverá ser projetado e construído observando as seguintes necessidades/critérios:

- I. Deverá compor junto ao duto ao qual será montado e junto ao sensor do Pitot um conjunto firme, que vibre e absorva as vibrações em conjunto;
- II. O sensor deverá ser acomodado de forma a manter a necessária vedação do duto e ao mesmo tempo facilitar a movimentação do sensor quando for necessário;
- III. O conjunto fixador do sensor deverá mantê-lo alinhado, por todo o tempo ao longo da secção transversal, independentemente de possível desalinhamento local do trecho de tubulação do túnel de vento;
- IV. O conjunto fixador deverá manter sistema de elevação do sensor que permita rápida e correta medição da posição vertical do sensor no escoamento e permita movimentação suave, utilizando de contra-peso no dispositivo elevado.

### 3. ADEQUAÇÃO DO PROJETO ÀS PREMISSAS E ADAPTAÇÕES FINAIS

Para atender o requisito de sistema I mencionado anteriormente fez-se necessário o projeto do dispositivo de maneira a ser montado diretamente sobre o trecho de tubulação onde está a secção transversal de estudo.

Uma metodologia que corrige possíveis erros de cilindridade do duto e que mantém o alinhamento horizontal da cabeça de medição do sensor é a metodologia de montagem do conjunto elevatório do sensor sobre um perfil metálico em formato U. Segue na Figura B.1 um esquema de montagem de tal perfil.

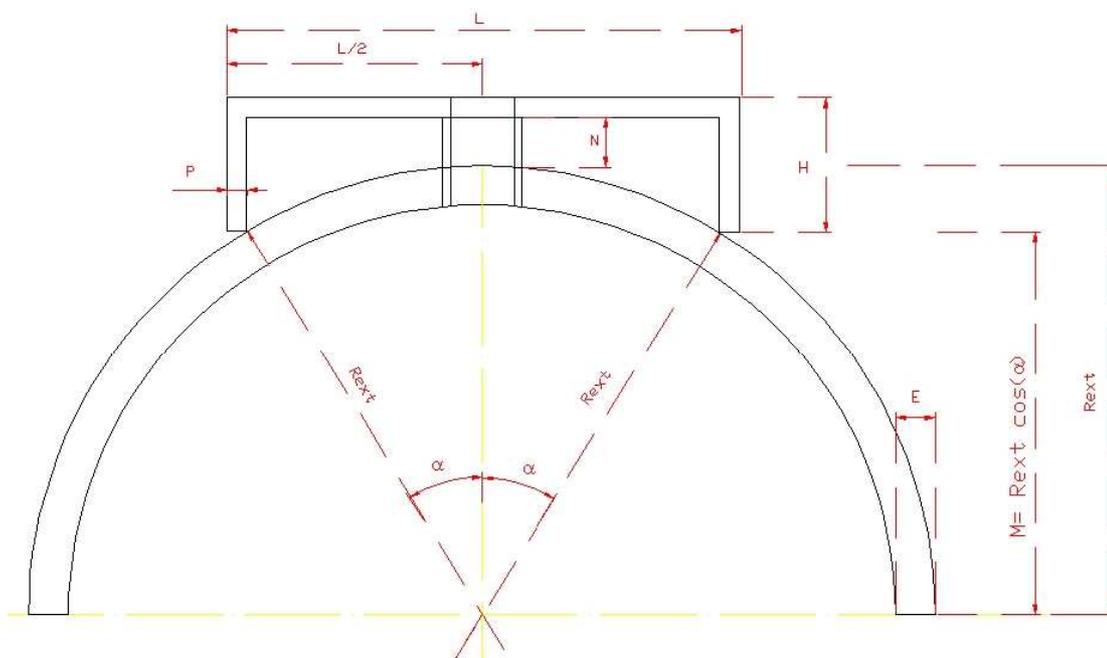


Fig. B.1 – Esquema geométrico bidimensional do suporte sobre a secção de medição.

Da Figura B.1, temos evidenciadas as seguintes relações:

$$\sin(\alpha) = \frac{\left(\frac{L}{2} - p\right)}{R_{ext}} \quad (\text{B.1})$$

$$M = R_{ext} \cos(\alpha) \quad (\text{B.2})$$

$$M = H - P - (R_{ext} - M) \quad (\text{B.3})$$

Relações estas, A.1, A.2 e A.3 acima descritas importantes para simularmos a restrição geométrica de altura da base do perfil U, conforme relação A.4 a seguir:

$$E + N + p < C \quad (\text{B.4})$$

A relação acima, levando-se em conta as demais restrições geométricas descritas, e as dimensões comerciais encontradas no mercado para o perfil U em alumínio (material leve e resistente) e as dimensões comerciais encontradas para o tubo roscado (*nipple*) onde passará a haste do sensor do pitot, ao final determinam a configuração de montagem possível desta base.

Sobre a base, é medida a angulação da haste por onde o sensor do pitot se fixará para efeitos de movimentar-se em consonância com o conjunto elevatório, com objetivo de garantir o ajuste fino do alinhamento horizontal da cabeça do sensor do tubo de Pitot, vide Figura B.2.

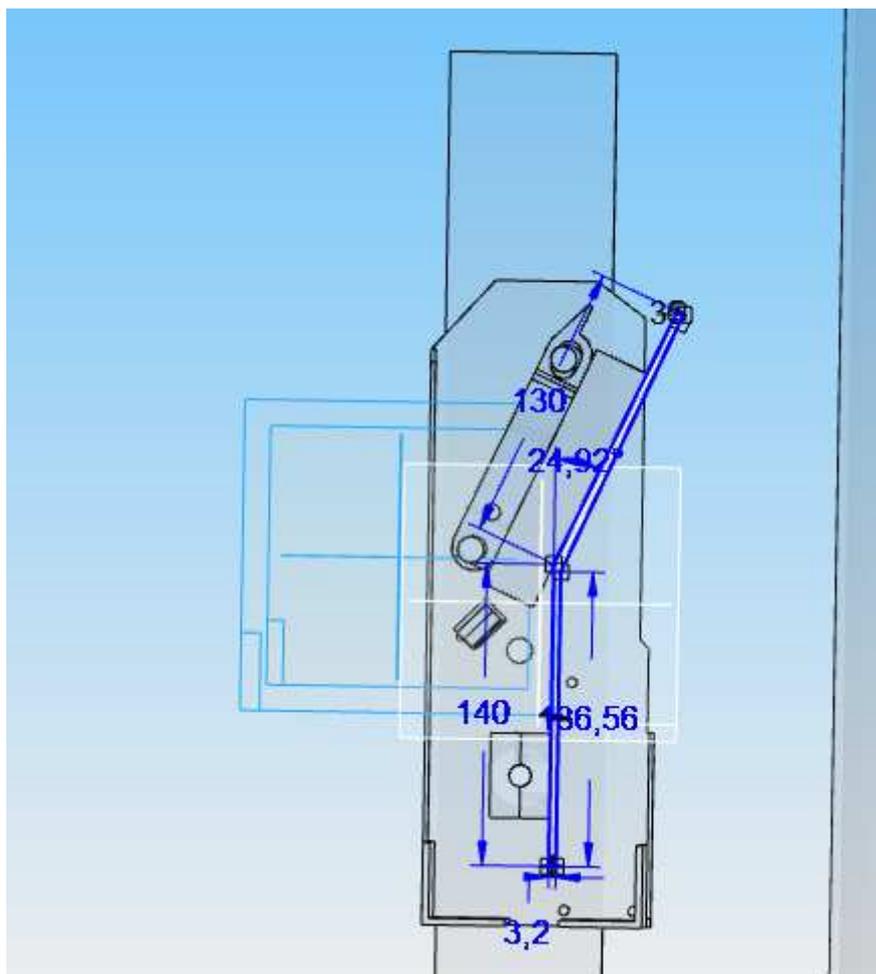


Fig. B.2 – Croqui da vista superior do braço de fixação da haste do sensor, montado no conjunto elevatório.

Dois cilindros verticais presos à base e ao topo do conjunto fixador mantêm o alinhamento vertical do braço de alinhamento no qual está montada a peça de *Nylon* bipartida onde a haste do sensor se fixa, conforme a Figura B.2. Todo o conjunto suspenso deve ser pesado e nas roldanas de aço do conjunto de polias elevatórias deve ser fixada contra-peso com a mesma massa do conjunto elevado. Para isso, forjou-se e fixou-se nas polias um contra-peso de chumbo. Uma vista lateral do conjunto elevatório pode ser visualizado na Figura B.3.

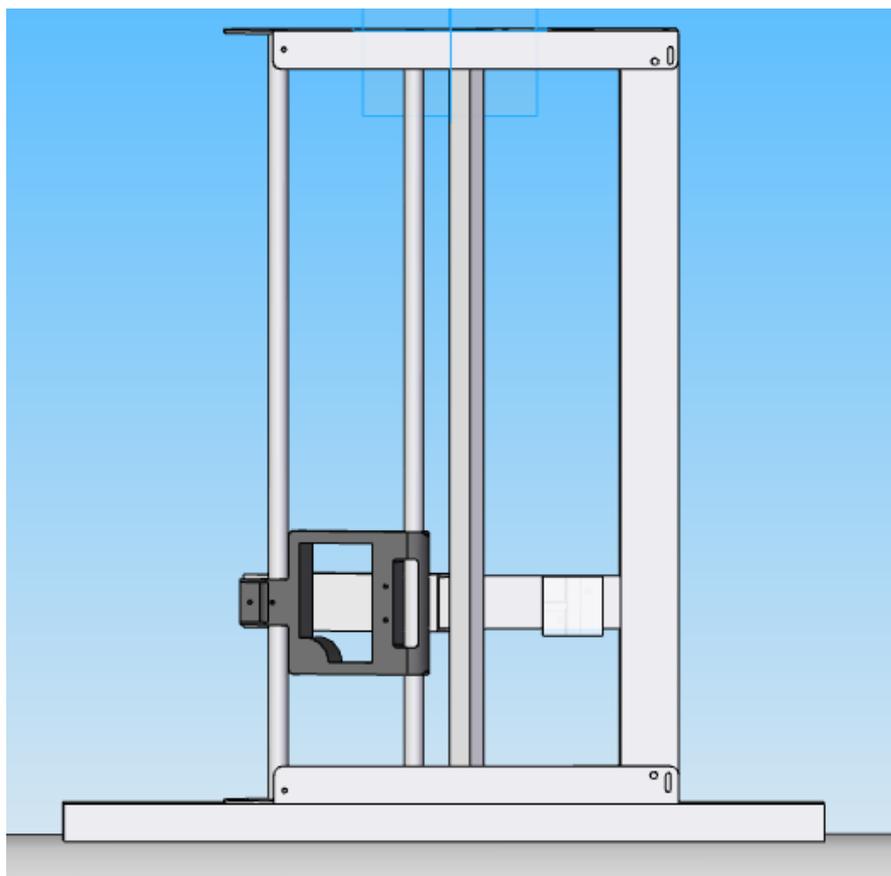


Fig. B.3 – Croqui da vista lateral dos componentes elevatórios da haste do sensor.

Percebe-se na Figura B.3, destacado em preto, necessidade de um suporte à trena *Laser* necessária a ser instalada para a medir exatamente a posição do tubo de Pitot ao longo da secção transversal.

Uma vista completa do projeto e de seu resultado final estão apresentados nas Figuras B.4 e B.5.

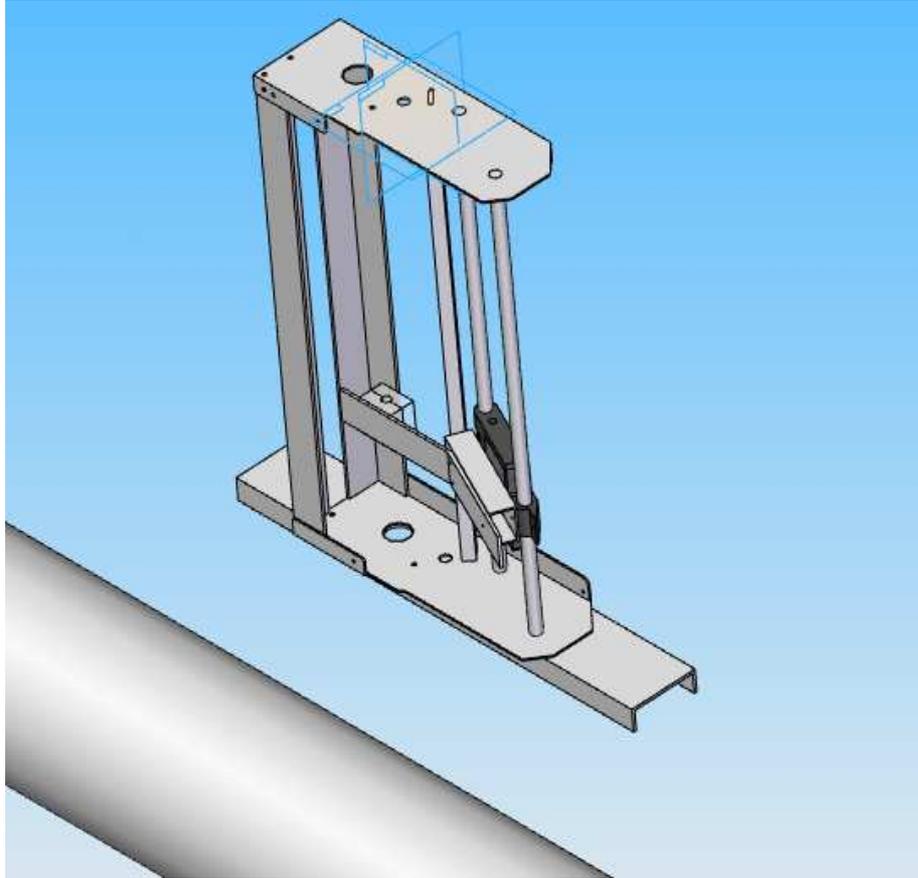


Fig. B.4 – Croqui da vista isométrica do conjunto fixador e elevatório da haste do sensor prestes a ser montado.



Figura B.5 – Vista “as built” do Projeto do conjunto fixador do Tubo de Pitot.