

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

**ERIC SIMÃO MARTINS LIMA**

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DA SENSIBILIDADE DA TECNOLOGIA  
ULTRASSÔNICA PARA MEDICÃO DE GÁS DE QUEIMA SOB O EFEITO DE  
CURVA**

**VITÓRIA - ES  
2013**

**ERIC SIMÃO MARTINS LIMA**

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DA SENSIBILIDADE DA TECNOLOGIA  
ULTRASSÔNICA PARA MEDICÃO DE GÁS DE QUEIMA SOB O EFEITO DE  
CURVA**

**Dissertação** apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte dos requisitos para obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA.**

Área de concentração: Termofluidos

Orientador: Prof. Dr. Rogério Ramos.

Co-orientador: Prof. Dr. Marcio Coelho de Matos

**VITÓRIA - ES  
2013**

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

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DA SENSIBILIDADE DA TECNOLOGIA  
ULTRASSÔNICA PARA MEDICÃO DE GÁS DE QUEIMA SOB O EFEITO DE  
CURVA**

**ERIC SIMÃO MARTINS LIMA**

COMISSÃO EXAMINADORA

---

**Prof. Dr. Rogério Ramos - Orientador**  
Universidade Federal do Espírito Santo - UFES

---

**Prof. Dr. Marcio Coelho de Mattos - Co-Orientador**  
Universidade Federal do Espírito Santo - UFES

---

**Prof. Dr. Marcio Ferreira Martins**  
Universidade Federal do Espírito Santo - UFES

---

**Prof. Dr. Gilmar Mompean**  
Ecole Polytechnique Universitaire de Lille - France

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.

Vitória (ES), 05 de Outubro de 2013.

*“Ainda que eu ande pelo vale da sombra da morte, não temerei mal nenhum, porque tu estás comigo: a tua vara e o teu cajado me consolam.”  
(Salmo 23.4)*

## **DEDICATÓRIA**

*À Alcindo Lima, Maria Celeste Lima, Diego Lima, Elton Lima, Maria Bernarda  
Martins e Johanna M. Scheel*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus por ter me abençoado e concedido o discernimento para a conclusão de mais essa jornada e a minha família pelo apoio incondicional.

Ao meu orientador Rogério Ramos, pela dedicação, paciência, apoio, respeito, pelo incentivo, e principalmente, pela confiança depositada em mim ao longo desse período de convivência.

Ao meu pai por ser um grande homem e desde criança estimular as minhas habilidades técnicas como também o incentivo aos estudos.

Ao meu professor e amigo José Joaquim, pela oportunidade, como também, aos sábios concelhos nas horas difíceis.

Ao meu professor e amigo Antônio Bento, pela paciência e auxílio nas horas que eu precisei.

Ao meu professor Marcio Coelho, pelo apoio e paciência em me auxiliar na execução do trabalho.

Ao Programa de Recursos Humanos da Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis por disponibilizar recursos para o projeto e bolsa, bem como à empresa 2Solve pelo inestimável auxílio prestado na tarefa de instrumentação do túnel de vento.

Aos meus amigos e colegas que tive o prazer de conhecer, conviver e me ajudaram nesses dois anos de mestrado.

A todos Muito Obrigado!

## RESUMO

O trabalho aborda o efeito de curvas à montante da medição de vazão em tubos de gás de queima (flare), simulados por túnel de vento atmosférico.

São apresentadas as similaridades do escoamento em flare e o túnel de vento assim como a introdução da medição de vazão desses escoamentos.

Os ensaios foram realizados com número de Reynolds de  $10^5$  (regime turbulento), para as configurações de montagem de tubos típicas da indústria de petróleo e gás.

Os resultados foram comparados com resultados obtidos em simulação numérica encontrados na literatura.

**Palavras-chave:** Medição de vazão, medidor ultrassônico de vazão, tubo de pitot

## **ABSTRACT**

This work addresses the upstream bend effects in flow measurement of burning gas systems (flare) simulated by an atmospheric wind tunnel.

The similarities between the flare systems and the wind tunnel flows, as well as the introduction to these flow measurements are also presented.

The tests were performed with 105 Reynolds (turbulent flow) in tubes with typical upstream fittings configurations used in oil and gas industry.

The results were compared with results obtained from numerical simulation noted in the bibliography.

**Keywords:** Ultrasonic flowmeters, Instalation effects, Pitot tube, flow measurement.



# Sumário

<b>RESUMO</b> .....	<b>vi</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>vii</b>
<b>Lista de tabelas</b> .....	<b>xi</b>
<b>Lista de Siglas e Abreviaturas</b> .....	<b>xii</b>
<b>Lista de Símbolos</b> .....	<b>xiii</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>5</b>
2.1. Medição de Vazão .....	<b>5</b>
2.2. Legislação .....	<b>9</b>
2.2.1. Regulamento Técnico de Queimas e Perdas de Petróleo e Gás Natural .....	<b>9</b>
2.3. Gás de tocha ou gás de flare.....	<b>11</b>
2.4. Aparato Experimental.....	<b>13</b>
2.4.1. O escoamento em túnel de vento .....	<b>13</b>
2.4.2. Características do túnel de vento .....	<b>18</b>
2.4.3. Configuração do Túnel de Vento.....	<b>19</b>
2.4.4. Dimensões do túnel de vento .....	<b>20</b>
2.5. Controle e aquisição de dados.....	<b>22</b>
2.5.1. Controle da velocidade do escoamento.....	<b>23</b>
2.5.2. LabView®.....	<b>23</b>
2.5.3. Transmissor de pressão diferencial.....	<b>24</b>
2.6. As Tecnologias dos Medidores de Vazão .....	<b>25</b>
2.6.1. Tubo de Pitot .....	<b>25</b>
2.6.2. Medidor de vazão ultrassônico .....	<b>28</b>
2.6.3. Fator de perfil <i>k</i> .....	<b>37</b>
2.6.4. Arquitetura do controle e instrumentação do túnel de vento .....	<b>41</b>
<b>3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL</b> .....	<b>42</b>
3.1. Matriz de testes .....	<b>42</b>
3.2. Cálculo da velocidade de descarga .....	<b>44</b>
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>50</b>
4.1. Perfil de velocidades.....	<b>50</b>
4.2. Cálculo da velocidade média .....	<b>53</b>
4.3. Medidor de vazão ultrassônico .....	<b>62</b>
4.3.1. Comparação do MUV com o medidor de referência.....	<b>62</b>
4.3.2. Montagem em tubo Reto.....	<b>64</b>
4.3.3. Montagem com uma Curva .....	<b>67'</b>
4.4. Correção das leituras de vazão do MUV .....	<b>71</b>
4.4.1. Fator <i>k</i> .....	<b>71</b>
4.4.2. Correção de zeros e de ganhos .....	<b>75</b>
<b>5. CONCLUSÕES</b> .....	<b>86</b>

5.1.	<b>Questões operacionais</b> .....	<b>86</b>
5.2.	<b>Medição de vazão</b> .....	<b>88</b>
<b>6.</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	<b>89</b>
<b>7.</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>90</b>
<b>8.</b>	<b>ANEXOS</b> .....	<b>96</b>
8.1.	<b>ANEXO A: Controle da Rotação</b> .....	<b>96</b>
8.2.	<b>ANEXO B: Cálculo da velocidade de descarga</b> .....	<b>99</b>
8.3.	<b>ANEXO C: Leitura das vazões do MUV e do tubo de Pitot nas duas configurações de montagem abordadas</b> .....	<b>100</b>
8.3.1.	<i>Tubo Reto</i> .....	<i>100</i>
8.3.2.	<i>Uma Curva</i> .....	<i>111</i>
8.4.	<b>ANEXO D: Correção de Zero e de ganho</b> .....	<b>121</b>

## Lista de Figuras

<i>Figura 1. Gás de flare sendo queimado em uma plataforma de exploração de petróleo e gás [26].</i>	11
<i>Figura 2. Leituras de temperatura: (a) Leituras típicas de Temperatura em linhas de flare (°C) [28]; (b) leituras de temperatura efetuadas nas diferentes configurações de montagem do túnel de vento</i>	16
<i>Figura 3. Plenum</i>	19
<i>Figura 4. Configurações do túnel de vento: (a) Tubo Reto; (b) Uma curva; (c) Duas curvas em planos ortogonais</i>	20
<i>Figura 5. Posições de montagem do túnel de vento</i>	21
<i>Figura 6. Bocal de entrada (bell mouth) em fibra de vidro</i>	22
<i>Figura 7. Conexão entre partes constituintes do túnel de vento a partir de flanges</i>	22
<i>Figura 8. Interface para controle da rotação do soprador</i>	24
<i>Figura 9. Geometria e detalhes de um tubo de Pitot de nariz elipsóidal, conforme a ISO 3966 [32]</i>	26
<i>Figura 10. Legenda da geometria e detalhes de um tubo de Pitot de nariz elipsoidal [32]</i>	26
<i>Figura 11. Esquema básico de medidor de vazão por ultrassom de um canal [35].</i>	30
<i>Figura 12. Plano de emissão</i>	32
<i>Figura 13. Caminho acústico exagerado [14]</i>	38
<i>Figura 14. Representação do caminho acústico atravessando diferentes perfis de velocidade: i) Perfil de velocidades simétrico ii) Perfil de velocidades assimétrico</i>	38
<i>Figura 15. Comparação entre <math>k_{AGA}</math> e <math>k_{prop}</math> [42]</i>	40
<i>Figura 16. Arquitetura do controle e instrumentação do túnel de vento</i>	41
<i>Figura 17. Configurações de montagem: (a) tubo reto; (b) uma curva 90° à montante; (c) duas curvas 90° em planos perpendiculares à montante</i>	45
<i>Figura 18. Referência para os pontos de medição do tubo de Pitot</i>	46
<i>Figura 19. Perfis de velocidade em diferentes configurações e rotações: (a)700rpm; (b)950 rpm; (c)1200rpm</i>	48
<i>Figura 20. Comparação dos perfis de velocidade experimentais e a referência de perfil teórico em diferentes configurações e rotações</i>	50
<i>Figura 21. Testes de repetitividade nas três rotações do soprador</i>	52
<i>Figura 22. Perfil de Velocidades turbulento e completamente desenvolvido</i>	54
<i>Figura 23. Leituras de pressão a 700, 950 e 1200 rpm na configuração de montagem Tubo reto</i>	57
<i>Figura 24. I) Tubo reto 700 rpm, ii) Tubo reto 950 rpm, iii) Tubo reto 1200 rpm, iv) 1 curva 700 rpm, v) 1 curva 950 rpm, vi) 1 curva 1200 rpm</i>	63
<i>Figura 25. Assimetrias no perfil de velocidades logo após o acidente de linha [33]</i>	70
<i>Figura 26. Limites de inclinação dados pelas incertezas relativas de medição do MUV e do tubo de Pitot</i>	80
<i>Figura 27. Correção de zero e de ganho aplicado na configuração de montagem 1 curva no trecho reto de 4,1D a 45°</i>	80
<i>Figura 28. a) Ruído proveniente do inversor de frequência ligado, b) Saída de tensão da fonte do transmissor de pressão sem o inversor de frequência</i>	87

## Lista de tabelas

Tabela 1. Dimensões dos dutos que integram a construção do túnel de vento .....	21
Tabela 2. Medidas Geométricas do Tubo de Pitot ITMP 120 [28] .....	27
Tabela 3. Verificação de conformidade geométrica do tubo de Pitot ITMP 120 da KIMO, à ISO 3966/2008 [28] .....	27
Tabela 4. Matriz de testes.....	42
Tabela 5. Interpretação da matriz de testes .....	43
Tabela 6. Dimensões dos Trechos utilizados e os respectivos ângulos .....	44
Tabela 7. Localização dos pontos de medição, considerando a aproximação Log-Linear.....	47
Tabela 8. Síntese dos dados operacionais de cada montagem do túnel de vento para as rotações: 700, 950 e 1200rpm. ....	48
Tabela 9. Diferenças percentuais entre os perfis de velocidades: 700rpm, 950rpm e 1200rpm .....	50
Tabela 10. Diferenças percentuais referentes aos testes de repetitividade EXP1 e EXP2 .....	53
Tabela 11. Valores da Razão de velocidades $R_v$ para cada configuração de montagem dos dados brutos .....	55
Tabela 12. Diferenças percentuais (%) entre as velocidades de descarga (dados brutos) e a velocidade média do perfil teórico .....	57
Tabela 13. Limite de rejeição de Chauvenet [47] .....	59
Tabela 14. Diferenças percentuais entre as velocidades médias (Teórico e Experimental) após o critério de Chauvenet.....	59
Tabela 15. Diferenças entre as velocidades médias (teórico e experimental) com os dados brutos e os dados tratados.....	60
Tabela 16. Comparação entre as razões das velocidades a partir dos dados brutos e dos dados tratados pelo critério de Chauvenet.....	61
Tabela 17. Diferenças entre as velocidades de descarga obtidas experimentalmente (dados brutos) e após tratados com o critério de Chauvenet em cada configuração de montagem.....	62
Tabela 18. Razão MUV versus Pitot para a configuração de tubo reto.....	64
Tabela 19. Dispersão da razão $R$ em cada trecho de medição variando apenas o ângulo na configuração de montagem tubo reto.....	66
Tabela 20: Razão $R$ em relação a configuração de montagem 1 curva.....	68
Tabela 21. Dispersão da razão $R$ em cada trecho de medição variando apenas o ângulo na configuração de 1 curva.....	70
Tabela 22. a) 4,1D 1 curva, b) 12,4D 1 curva, c) 16,5D 1 curva, d) 28D 1 curva.....	73
Tabela 23. Comparação entre $Q_{MUV}$ , $Q_{corr}$ e $Q_{pitot}$ : a) 4,1D, b) 12,4D, c) 16,5 D, d) 28D .....	81
Tabela 24. Efeitos da instalação elétrica na medição de vazão.....	88

## Lista de Siglas e Abreviaturas

*ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas*

*AGA: American Gas Association*

*ANP: Agencia Nacional de Petróleo e Gás*

*INMETRO: Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial*

*LMF: Laboratório de Máquinas de Fluxo da Ufes*

*MUV: Medidor ultrassônico de vazão*

*PPGEM: Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica*

*rpm: Rotações por minuto*

*UFES: Universidade Federal do Espírito Santo*

*vos: Velocidade do som*

# Lista de Símbolos

## Letras Gregas

$\beta$	Leitura corrigida do medidor a ser calibrado;
$\Delta k$	Razão entre o fator $k_{pert}$ (assimétrico) [Ramon] e o fator $k_{cd}$ do escoamento completamente desenvolvido, Eq.(17), lembrando que $k_{cd} = k_{prop}$ ;
$\Delta R$	Incerteza absoluta da medição
$\Delta p$	Pressão diferencial gerada no tubo de Pitot (Pa);
$\lambda_{max}$	Incerteza máxima da inclinação;
$\lambda_{min}$	Incerteza mínima da inclinação;
$\mu$	Viscosidade determinada pela lei de Sutherland [Pa.s];
$\bar{v}_{AB}, \bar{v}_{BA}$	Velocidades dos pulsos ultrassônicos ao longo do caminho acústico;
$\bar{v}_{CA}$	Velocidade média do escoamento ao longo do caminho acústico;
$\rho$	Massa específica do gás considerando as propriedades do gás perfeito [kg/m <sup>3</sup> ];
$\sigma_{Pitot}$	Desvio padrão relativo das leituras do tubo de Pitot;
$\sigma_{MUV}$	Desvio padrão relativo das leituras do MUV;

## Letras Latinas

$\bar{V}_m$	Velocidade média do escoamento [m/s]
$a$	é a velocidade termodinâmica do som no escoamento [m/s]
$a$	Coefficiente angular da reta
$A$	Área interna da seção reta do duto
$b$	Coefficiente linear da reta
$C$	Velocidade de propagação do som no fluido
$C_D$	Coefficiente de descarga do tubo de Pitot, $\approx 1$ , segundo a ISO 3966/2008 [32];
$cg$	Correção de ganho
$CZ$	Correção de zero
$d_i$	Módulo do desvio
$d_{ch}$	Limite de rejeição de Chauvenet
$D$	Diâmetro interno da tubulação [m]
$D_{ext}$	Diâmetro externo
$D_{int}$	Diâmetro interno
$e$	Espessura do duto
$k$	Fator de perfil
$k_{AGA}$	Fator $k$ de acordo com a AGA 9
$k_{prop}$	Fator $k$ calculado de acordo com uma equação proprietária
$L$	Comprimento
$n$	Função do número de Reynolds (adimensional)
$P$	Pressão atmosférica ao nível do mar [ $\approx 1$ atm]
$P$	Massa específica do fluido - ar atmosférico (kg/m <sup>3</sup> );
$P_e$	Perfil teórico exponencial um sétimo
$PI$	Controle proporcional + Integral
$Q$	Vazão volumétrica do escoamento
$Q_1$	Vazão medida pelo tubo de Pitot em m <sup>3</sup> /h

$Q_2$	<i>Vazão medida pelo MUV em m<sup>3</sup>/h</i>
$Q_{\text{corrigida}}$	<i>Vazão do MUV corrigida</i>
$Q_{\text{Pitot}}$	<i>Vazão calculada através da velocidade de descarga obtida pelo tubo de Pitot</i>
$Q_{\text{MUV}}$	<i>Vazão medida pelo medidor ultrassônico MUV em cada configuração de montagem</i>
$r$	<i>Posição radial (m)</i>
$R$	<i>Razão entre os valores médios das vazões</i>
$Re$	<i>Número de Reynolds (adimensional)</i>
$R_{ij}$	<i>Razão entre os valores medidos das vazões dado por <math>Q_{\text{MUV}}/Q_{\text{Pitot}}</math></i>
$R_V$	<i>Razão entre a velocidade média e velocidade máxima do escoamento</i>
$R$	<i>Raio interno do duto (m)</i>
$t_{AB}$	<i>Tempo de trânsito do pulso ultrassônico a jusante</i>
$t_{BA}$	<i>Tempo de trânsito a montante</i>
$V_D$	<i>Velocidade de descarga de acordo com a norma</i>
$\bar{V}_e$	<i>Velocidade média teórica do escoamento</i>
$\bar{V}_{\text{MUV}}$	<i>Velocidade considerada pelos medidores de vazão ultrassônicos</i>
$V_{\text{max}}$	<i>Velocidade máxima do escoamento em cada configuração de montagem</i>
$\bar{V}_m$	<i>Velocidade média do escoamento na seção transversal do duto</i>
$\bar{V}_m$	<i>Velocidade média do escoamento ao longo da seção transversal</i>
$V_n$	<i>Velocidade local do escoamento em um ponto de medição dado pela norma;</i>
$v(r)$	<i>Perfil de velocidades (m/s)</i>
$x_i$	<i>Medição</i>
$\bar{x}$	<i>Valor da média</i>
$x$	<i>Medida da referência</i>
$y$	<i>Medida do medidor a ser calibrado</i>
$yc$	<i>Medida corrigida</i>

# 1. INTRODUÇÃO

A indústria de petróleo e gás requer medições de vazão com incertezas estabelecidas por lei. No Brasil, a Portaria Conjunta ANP/INMETRO Nº 1 de 2000 [1], foi o primeiro documento desta categoria a ser publicado. Este documento regula tecnicamente condições e procedimentos de sistemas de medição de vazão de hidrocarbonetos (petróleo e gás natural), além de autorizar previamente a utilização de medidores ultrassônicos de vazão para gás natural. Essa portaria foi recentemente atualizada para a resolução conjunta no. 1/2013.

Contudo, curvas e outros obstáculos são comumente encontrados nesse cenário, o que pode afetar a qualidade da medição de vazão em função de perturbações no escoamento, tais como efeito *swirl* e assimetrias no perfil de velocidades.

Em sistemas de gás de queima (*flare*), que são comumente utilizados como sistemas de segurança e alívio de pressão em ativos produtores de hidrocarbonetos, a sua quantificação tem sido considerada por especialistas como uma condição de medição das mais desafiadoras, tendo em vista que esses escoamentos tipicamente apresentam características tais como:

- ✓ Instalações em grandes diâmetros
- ✓ Necessidade de baixos índices de manutenção
- ✓ Necessidade de baixa intrusividade ao processo
- ✓ Variações na composição química do gás



- ✓ Presença eventual de líquidos (condensado ou gotículas de óleo)
- ✓ Ausência de trechos retos adequados.

Esses fatores contribuem para que a adequação dessa medição aos requisitos da legislação seja um problema tecnológico de elevada relevância. Com isso a comunidade científica e tecnológica [2] têm avaliado padrões de escoamento e efeitos de perturbações no escoamento causados por acidentes de linha, bem como busca laboriosamente métodos para diminuição dos consequentes erros e incertezas. Por outro lado, medidores de vazão por tecnologia ultrassônica de um canal acústico são frequentemente utilizados em instalações de queima de gás, apesar de serem sensíveis a perturbações promovidas pela presença de acidentes de linha.

Por outro lado, dadas as condições operacionais típicas em *flare* [3] considera-se que um túnel de vento atmosférico aspirado (regime turbulento,  $Re = 10^5$ ) apresente condições de similaridade hidrodinâmica adequadas para representar esse escoamento. Nesse sentido, Ruppel e Peters [4] e Mickan *et al.* [5] constataram experimentalmente padrões de perturbação em configurações típicas (curvas à montante da seção de medição).

Medidores de vazão por tempo de trânsito (MUV) têm pelo menos um par de transdutores de ultrassom que transmitem e recebem pulsos ultrassônicos através do fluido, formando assim um canal acústico, também conhecido como caminho acústico. Os pulsos são ondas mecânicas que viajam através de um meio. Essas ondas são geradas pela vibração de cristais piezelétricos ou de cerâmica que são

excitados por correntes elétricas. Desta forma, os cristais vibram na mesma frequência de excitação. Em aplicações típicas de medição de vazão, as frequências são comumente utilizadas na ordem de centenas de kHz para gases, por exemplo [5,6]. Tais ondas são denominadas como ultrassom.

Medidores de vazão ultrassônicos de um canal acústico dependem do formato do perfil de velocidades a fim de computar a relação entre o tempo de trânsito dos pulsos ultrassônicos com a velocidade média do escoamento. Via de regra, a premissa básica de operação de todos os medidores comerciais disponíveis no mercado é que as medições ocorram em um perfil de velocidades turbulento e completamente desenvolvido.

Nos últimos anos, para além do esforço das empresas de petróleo na utilização e aperfeiçoamento contínuos dos sistemas de medição de vazão, a Agência Nacional do Petróleo (ANP) e o Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO) estão mais criteriosos nas regulamentações aplicáveis às medições de vazão, em especial no caso de medição de transferência de custódia e fiscal. Atualmente, é exigido para os sistemas de medição de vazão de hidrocarbonetos líquidos, erro máximo admissível de  $\pm 0,3\%$  [7] e, para os sistemas de gás natural, incerteza de medição menor ou igual a 5% [8].

Visto que o gás de *flare* é altamente poluente, possuindo na sua composição elevadas concentrações de Metano ( $\text{CH}_4$ ), cuja influência no efeito estufa é 20 vezes maior que o  $\text{CO}_2$ , torna-se imperativo a sua correta medição e passível de legislação específica, como as ambientais e/ou econômicas, sendo a adequação

dessa medição aos requisitos da legislação um problema tecnológico de elevada relevância.

Por outro lado, os gases de queima tipicamente escoam a baixas pressões (aproximadamente 0,7 bar), apresentando níveis de impureza consideráveis [8]. Tais condições geralmente refletem em baixo valor financeiro associado a tais escoamentos, fazendo com que o uso de medidores de vazão mais sofisticados se torne impraticável.

Por questões de custo e adequação tecnológica, os medidores de vazão ultrassônicos de um caminho acústico são amplamente utilizados nessas instalações. No entanto, uma vez que esses instrumentos não podem mapear o campo de velocidades adequadamente, é desejável que eles operem sob condições de escoamento completamente desenvolvido. No entanto, devido às limitações e obstáculos, como comentado anteriormente, ocorrem perturbações no escoamento, comprometendo a qualidade de medição de vazão.

Neste estudo avalia-se a influência de acidentes de linha no processo de medição, visando analisar as incertezas na medição de vazão de gás de tocha e propor melhorias para que a qualidade da medição seja cada vez mais fidedigna em ativos produtores de petróleo, sendo eles:

- ✓ Melhoria da qualidade de medição de vazão em *flare*;
- ✓ Possibilidade de redução da emissão de gases de efeito estufa;
- ✓ Aperfeiçoamento de sistemas de controle e monitoramento de gases;

- ✓ Aumento da confiabilidade do balanço de massa em ativos produtores de gases;
- ✓ Detecção de vazamentos e emissões fugidias.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. *Medição de Vazão*

A tecnologia ultrassônica por tempo de trânsito foi patenteada por Rütgen em 1928, mas apenas 40 anos mais tarde, o medidor de vazão ultrassônico conseguiu alcançar uma incerteza aceitável em processos industriais. Os primeiros instrumentos comerciais surgiram na década de 60, em uma configuração simples, com apenas uma trajetória passando pelo centro da tubulação [10]. Na década de 70, os primeiros medidores *clamp-on* foram comercializados nos Estados Unidos [11], utilizados inicialmente na medição de água, os medidores ultrassônicos começaram a ter expressão na indústria do petróleo, na medição de vazão de óleo e gás. Nos anos 80, agregando os desenvolvimentos em microeletrônica e processamento, melhoraram seu desempenho e passaram a ser comercializados em larga escala na década de 90. Em 2008, 57% dos medidores ultrassônicos comercializados no mundo eram medidores de gás, e 41%, de líquidos [11].

Diversos experimentos foram realizados nos últimos anos visando conhecer as possibilidades e limitações dos medidores ultrassônicos. Sakariassen et al. [12] descrevem o teste de longa duração (11 meses), conduzido pela Statoil e a Ruhrgas em um circuito de gás natural, com diâmetro de 16 polegadas, com

medidores ultrassônicos, medidores tipo turbina e medidores tipo placa de orifício como referências consolidadas.

As diferenças entre os valores apontados pelos medidores ultrassônicos e os valores apontados pelos medidores tipo turbina ficaram na faixa de  $\pm 0,25\%$  (sendo considerado um resultado positivo, visto que as incertezas envolvidas giram em torno de  $0,7\%$  para cada medidor). Em comparação com a turbina, o medidor ultrassônico apresentou uma maior continuidade em operação e exigiu menos manutenção, ou seja, maior robustez.

O medidor ultrassônico de vazão é composto de um ou mais pares de transdutores e cada par de transdutores forma um canal. Pela velocidade do som (VOS) medida pelos canais é possível avaliar se o medidor ultrassônico mantém seu desempenho.

Os testes descritos por Grimley [13], realizados nos laboratórios de alta pressão de gás natural do Southwest Research Institute - SwRI com medidores ultrassônicos multicanais de 12 polegadas, fizeram parte da série de testes (testes com medidores de 4, 5 e 6 canais, com diferentes acidentes a montante dos medidores, mostrando que mesmo para o escoamento completamente desenvolvido, os condicionadores influenciam nos resultados) que contribuíram com a revisão da AGA 9 [14], norma da American Gas Association (AGA) referente aos medidores ultrassônicos. Os testes tiveram por objetivo avaliar a influência de perturbações resultantes de instalações típicas na indústria.

A comunidade científica e tecnológica têm avaliado padrões e efeitos de perturbações no escoamento, bem como busca métodos para diminuição dos consequentes erros e incertezas. Nesse sentido, Ruppel e Peters [15] e Mickan *et al.* [16] identificam padrões de perturbação em configurações típicas (curvas à montante da seção de medição, por exemplo) por meio de experimentos.

Hilgenstock e Ernst [17] comparam resultados de dinâmica dos fluidos computacional (DFC) com experimentos, sugerindo que a simulação numérica é uma ferramenta promissora para compensar as leituras e diagnóstico de medidores.

Moore *et al.* [18] avaliam alguns modelos de reprodução matemática de perfis perturbados e apresentam um estudo analítico de sensibilidade de MUV em diversas configurações. Nesse sentido Holm *et al.* [19] apresentam a proposta de inferir numericamente o fator de correção de MUV e analisar o efeito de acidentes de linha nos mesmos. Estas referências [15-19] confirmam que, em função do próprio princípio de funcionamento, os MUV são relativamente sensíveis a perturbações, de maneira que esta sensibilidade e dependência pode ser melhor entendida conhecendo-se a configuração básica e os princípios de operação destes medidores.

Em 2009 Jeff Gibson, TUV NEL Report 2008/301 [2] discute os resultados de um projeto cuja finalidade é avaliar a eficácia do uso da Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD) na modelagem para prever o erro de instalação de um medidor ultrassônico de vazão de gás de *flare* de um único canal. As simulações foram comparadas com experimentos realizados nas instalações da TUV NEL.

O medidor de vazão ultrassônico parece ser a tecnologia mais avançada e amplamente utilizada para a medição de gás de *flare*, com milhares de instalações de medição em todo o mundo. As principais vantagens são grande faixa de medição de vazão, não possui partes móveis e proporciona uma queda de pressão praticamente nula, requisito obrigatório em uma linha de queima de gás em situações de emergência. Uma vantagem adicional da tecnologia ultrassônica é a sua capacidade para determinar o peso molecular e, conseqüentemente, a densidade do gás, a partir de medições da velocidade do som do fluido. Normas gerais para medidores de vazão ultrassônicos de gás incluem ISO TR 12765 [20] e BS 7965 [21] nos dão algumas orientações sobre a aplicação dos medidores ultrassônicos para medição de *flare*.

Dependendo do tipo de medidor e do diâmetro da linha, o intervalo de velocidades de um medidor ultrassônico de gás de queima (*flare*) é estimado entre 0,03 m/s a 100 m/s. A incerteza para um medidor ultrassônico para essa aplicação é tipicamente especificado pelos fabricantes como 2,5 - 5% da velocidade em toda faixa de medição, aumentando à medida que a velocidade reduz. No entanto, essas especificações são apenas estritamente aplicáveis sob condições ideais de escoamento em laboratório (ou seja, relativamente estáveis, os perfis de velocidade completamente desenvolvidos que são livres de gotículas de líquidos, sólidos e ruído ultrassônico gerado por válvulas, etc).

Qualquer outra incerteza resultante das condições de laboratório deve ser considerada na linha de base de incertezas para se chegar ao valor da incerteza total. Estes componentes de incerteza adicionais devem ser considerados nos

relatório para determinação do valor global das emissões. O documento do Comitê de Gestão de Hidrocarbonetos HM58 [22], publicado pelo Instituto de Energia, fornece uma orientação sobre a determinação da quantidade de queima de gás para fins de relatórios ambientais. Inclui uma seção para identificar as fontes de incerteza em um medidor ultrassônico de gás de *flare* e uma metodologia para determinação e correção de erros de instalação.

Em 2011, E. von Lavante e J. Yao [23] simularam numericamente vários tipos de configurações internas assimétricas com o objetivo de investigar o desenvolvimento das correntes turbulentas (*swirl*) e não turbulentas ao longo da direção axial.

Chen et al em 2012 [24], estudam a propagação acústica em fluidos viscosos com escoamento uniforme e propõe uma nova metodologia de projeto para medidores de vazão ultrassônicos.

Zheng, et al [25], avaliam em 2013 um método baseado em um novo modelo padrão de escoamento para o estudo da adaptabilidade do escoamento aos medidores de vazão ultrassônicos.

## 2.2. **Legislação**

### 2.2.1. ***Regulamento Técnico de Queimas e Perdas de Petróleo e Gás Natural***

Devido ao fato que a indústria de petróleo e gás requer medições de vazão com baixas incertezas e baixo impacto ambiental estabelecidas por lei tal como a Portaria ANP N° 249, DE 1º.11.2000 aprova o Regulamento Técnico de Queimas e



Perdas de Petróleo e Gás Natural [1], que dispõe sobre as questões relacionadas com as queimas em *flare* e as perdas de gás natural.

Esse regulamento tem como objetivo e aplicação estabelecer os procedimentos e fundamentos para as queimas e perdas de petróleo e gás natural produzidos em todo o território nacional, e tem por objetivo:

- ✓ Regulamentar os procedimentos e fundamentos para as queimas em *flare* e as perdas de gás natural;
- ✓ Estabelecer os limites para as queimas e perdas autorizadas;
- ✓ Estabelecer os limites para as queimas e perdas não sujeitas ao pagamento de royalties;
- ✓ Estabelecer as condições para as queimas e perdas de petróleo e gás natural nos testes de poços;
- ✓ Estabelecer parâmetros para o controle das queimas e perdas de gás natural.

Este Regulamento Técnico define os procedimentos operacionais relacionados com as queimas e a perda de gás natural, tendo em vista as políticas nacionais para o aproveitamento racional das fontes de energia, visando atender aos princípios e objetivos da Política Energética Nacional. Visa determinar também as políticas nacionais para o aproveitamento racional das fontes de energia com o intuito de garantir a necessidade de proteger o meio ambiente e promover a conservação de energia, como também fazer cumprir as boas práticas de conservação e uso racional do petróleo, dos derivados e do gás natural e de preservação do meio ambiente.

Também é estabelecido que as queimas de gás em *flare*, em prejuízo de sua comercialização, e as perdas do produto ocorrida sob a responsabilidade do concessionário serão incluídas no volume total da produção a ser computada para cálculo de royalties devido.

### 2.3. **Gás de tocha ou gás de flare**

Queimadores de gás (gás de tocha ou gás de *flare*) são dispositivos de combustão a gás utilizados 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, *onshore* e *offshore* como pode ser visto na Fig. 1 [26].



Figura 1. Gás de flare sendo queimado em uma plataforma de exploração de petróleo e gás [26].

Em caso de anomalias na operação tais como paradas inesperadas e/ou sobrepressões em plantas industriais que utilizam esse recurso (*flare*), chamas são utilizadas para queimar o gás inflamável liberado por válvulas de alívio de pressão por questões de segurança. Esses queimadores também são frequentemente

utilizados para a combustão planejada de gases durante períodos relativamente curtos [26].

Usualmente, o petróleo bruto extraído e produzido a partir de poços de petróleo tanto em terra quanto *offshore*, contem óleo que por sua vez possui gás natural associado que também é elevado à superfície. Em algumas regiões exploradoras com uma infraestrutura deficitária de transporte de gases, grandes quantidades de gás associado são queimados como resíduos ou gás inutilizável. Essa queima representa um risco para a saúde humana e também uma fonte poluidora, contribuindo significativamente com as emissões mundiais de gases de efeito estufa, tais como dióxido de carbono - CO<sub>2</sub> e metano - CH<sub>4</sub> [26].

A quantidade de queima de gás associado ao petróleo representa cerca de  $4,0 \times 10^8$  toneladas de dióxido de carbono emitidos anualmente, o que equivale a cerca de 1,2% das emissões mundiais. A medição de vazão desses gases possibilita estimar as emissões de gases de efeito estufa oriundas da exploração de poços de petróleo. Com isso a sua quantificação tem sido considerada por especialistas como uma condição de medição das mais desafiadoras, pois no gás de *flare* há presença de contaminantes agressivos (H<sub>2</sub>S, HF e CO) e uma alta faixa de operação de medição necessária (cerca de 2000:1), tendo também uma característica crítica, visto que eles escoam tipicamente à baixa pressão (aproximadamente a 0,7 bar) e apresentam níveis de impurezas consideráveis [26]. Essas condições normalmente resultam em baixas vazões dificultando o uso de medidores de vazão mais modernos.

## 2.4. Aparato Experimental

### 2.4.1. O escoamento em túnel de vento

Dadas as condições operacionais típicas em *flare* considera-se que um túnel de vento atmosférico aspirado apresente condições de similaridade hidrodinâmica adequadas para essa aplicação [3].

Estudo comprova [27] que o uso do ar como um recurso para reprodução do escoamento em condições de *flare* devido a fatores como segurança, logística, recursos tecnológicos envolvidos, questões ambientais, custo e disponibilidade do ar, trazem muitos benefícios, visto que o uso de instalações de calibração de gás natural custam milhares de dólares por dia, tornando custoso ou até inviabilizando esse procedimento.

Além disso, a vazão de gás disponível de tal instalação de ensaio de gás natural seria sazonal, pois elas advém de derivações feitas em gasodutos que transferem o gás natural da zona produtora para uma unidade de tratamento.

Devido ao fato de que o escoamento em *flare* ocorre em baixas pressões, muitas vezes abaixo da pressão atmosférica, seria necessário reduzir as elevadas pressões internas do gás nas tubulações das derivações para limites que reproduzissem de forma fidedigna as condições do *flare*, tornando inviável o processo de compressão do gás contido nas tubulações de ensaio para o gasoduto.

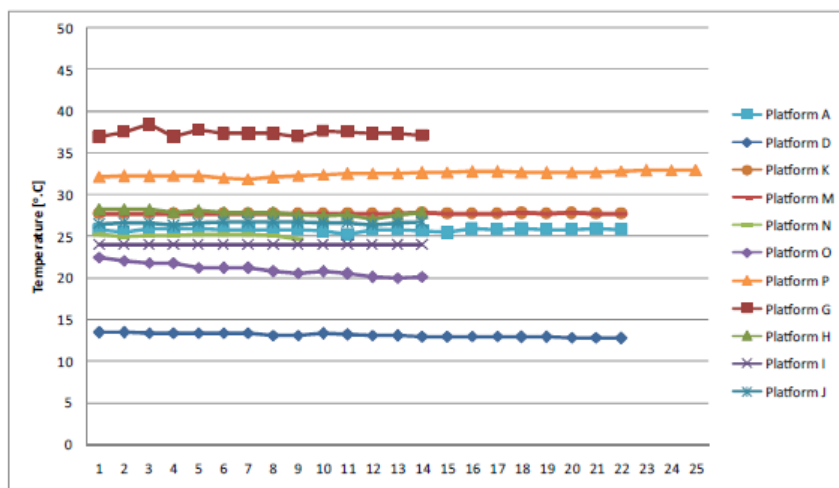
Uma das vantagens de trabalhar na pressão atmosférica, é a facilidade de elaborar protótipos de forma rápida, sem as preocupações de segurança envolvidas com o uso de gases a altas pressões, como também o uso de aparatos eletrônicos e softwares de aquisição de dados e monitoração sem o risco de se deparar com o gás combustível (ambientes explosivos). Outra vantagem é a flexibilidade que uma instalação de calibração em malha aberta proporciona, pois permite uma série de combinações, quase infinitas, de condições de instalação, uma vez que o túnel de vento aspira o ar de uma sala aberta [27].

A similaridade entre o escoamento interno promovido no túnel de vento e o escoamento no *flare*, ocorre na seguinte forma [3]:

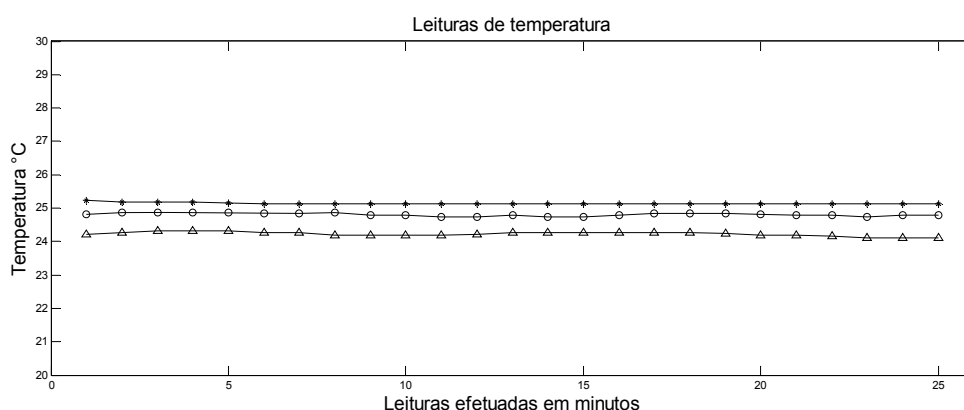
- ✓ Semelhança Geométrica
- ✓ Semelhança Térmica
- ✓ Semelhança Cinética
- ✓ Semelhança Dinâmica

Onde o termo semelhança geométrica se relaciona a geometria da seção dos tubos, nesse caso circular em ambos os casos. A razão entre comprimento e diâmetro expresso em número de diâmetros internos ( $D$ ) e a rugosidade relativa das paredes dos dutos de polipropileno do túnel de vento representam as condições de instalação do *flare*. Apesar da diferença entre os diâmetros das tubulações encontradas no *flare* e o diâmetro dos dutos do túnel de vento serem perceptíveis, essa diferença não impõe restrição técnica de similaridade hidrodinâmica como mencionado acima.

A semelhança térmica também é um ponto a se considerar, pois ela não exige que as temperaturas tenham os mesmos valores. Essa condição evidencia que a distribuição de temperaturas ao longo do trecho de medição, e da tubulação deve ser semelhante. O critério térmico é respeitado, pois é considerada a distribuição homogênea de temperatura no túnel de vento e a Fig. 2(a) [3] realça que as distribuições de temperatura em linhas de *flare* instaladas em plataformas possuem características semelhantes às obtidas no túnel de vento, onde o eixo da abcissa representa as leituras efetuadas em horas e o eixo da ordenada representa os valores de temperatura registrados. Na Fig. 2(b) também é possível observar leituras de temperatura efetuadas nas diferentes configurações de montagem do túnel de vento, permitindo visualizar a distribuição homogênea de temperaturas no túnel. As configurações de montagem abordadas na Fig. 4 serão comentadas no capítulo 4.



a)



b)

Figura 2. Leituras de temperatura: (a) Leituras típicas de Temperatura em linhas de *flare* (°C) [28]; (b) leituras de temperatura efetuadas nas diferentes configurações de montagem do túnel de vento

A semelhança cinética exige que os escoamentos apresentem a mesma distribuição de velocidades [28]. O método mais eficiente para fazer jus a essa condição é garantir um perfil de velocidades turbulento completamente desenvolvido em ambos os casos. Porém devido à presença de acidentes de linha e a dificuldade de se levantar os perfis de velocidade em campo devido a condições operacionais, o perfil de velocidades completamente desenvolvido em *flare* não é uma condição operacional usual.

Limitações essas que não se fazem sentir no túnel de vento, já que o perfil de velocidades turbulento completamente desenvolvido pode ser obtido com o auxílio de dispositivos, tais como, bocal de entrada, trecho reto suficiente e retificadores de fluxo. O levantamento do perfil de velocidades completamente desenvolvido no túnel de vento pode ser realizada através de diversas medições ao longo do comprimento do túnel onde, mais adiante no texto na metodologia experimental,

são identificados os perfis de velocidades obtidos na presença de curvas à montante de um medidor de referência (Tubo de Pitot).

Finalmente, a semelhança dinâmica exige a comparação dos efeitos das propriedades fluidodinâmicas dos escoamentos em *flare* e túnel de vento, principalmente a compressibilidade dos escoamentos e as relações entre efeitos viscosos e de inércia, onde essa semelhança pode ser obtida por análise dimensional utilizando o Teorema de *Buckingham-Pi* [28] e implica na igualdade dos seguintes parâmetros adimensionais:

$$\text{a) Número de Mach: } Ma = \frac{\bar{V}_m}{a} \quad (1)$$

$$\text{b) Número de Reynolds: } Re = \frac{\rho(T)VD}{\mu} \quad (2)$$

$$\text{c) Trecho reto para desenvolvimento do escoamento: } L_{cd} = \frac{L}{D} \quad (3)$$

Onde,

$\bar{V}_m$  Velocidade média do escoamento [m/s];

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

$D$  Diâmetro interno da tubulação [m];

$\rho(T) = \frac{P}{RT}$ , considerando as propriedades do gás perfeito [kg/m<sup>3</sup>];

$\mu$  Viscosidade determinada pela lei de Sutherland [Pa.s];

$P$  Pressão atmosférica ao nível do mar [ $\approx 1$  atm];



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 [28], ou seja:

$$Re_{flare} = Re_{túnel} \quad (4)$$

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* [28]. Essa conclusão é corroborada em [27].

#### 2.4.2. **Características do túnel de vento**

O Laboratório de Máquinas de Fluxo – LMF da UFES está equipado com um túnel de vento atmosférico constituído por tubos de polipropileno, com diâmetro interno médio de  $\varnothing=182\text{mm}$  ( $\varnothing_{\text{nominal}} = 8''$ ). O túnel opera aspirado simulando o escoamento em tubulações de gás de tocha. Sua configuração e construção permitem mudar facilmente sua configuração para diferentes tipos de montagens.

O escoamento interno é promovido por um soprador tipo *limit-load* instalado no extremo à jusante dos tubos, após o *plenum*, cuja função é reduzir os comportamentos helicoidais do escoamento promovidos pelo rotor do soprador no interior dos tubos, como também, permitir a conexão de dutos com diferentes diâmetros. Além disso, o túnel de vento possui um condicionador de fluxo antes do *plenum*, Fig. 3, cujo desempenho foi avaliado por Filipe carvalho [28]. Considerando que o escoamento interno é incompressível no túnel de vento, a pressão interna no duto é inferior à pressão atmosférica [28].



Figura 3. Plenum

#### 2.4.3. **Configuração do Túnel de Vento**

O túnel de vento é composto por dutos de polipropileno, com diferentes comprimentos e diâmetros internos uniformes para que o perfil de velocidades em diferentes trechos de medição sejam avaliados. As Figs. 4a-c mostram vistas isométricas das diferentes configurações de montagem do túnel de vento: (i) Tubo reto, (ii) 1 (uma) curva e (iii) 2 (duas) curvas em planos ortogonais.

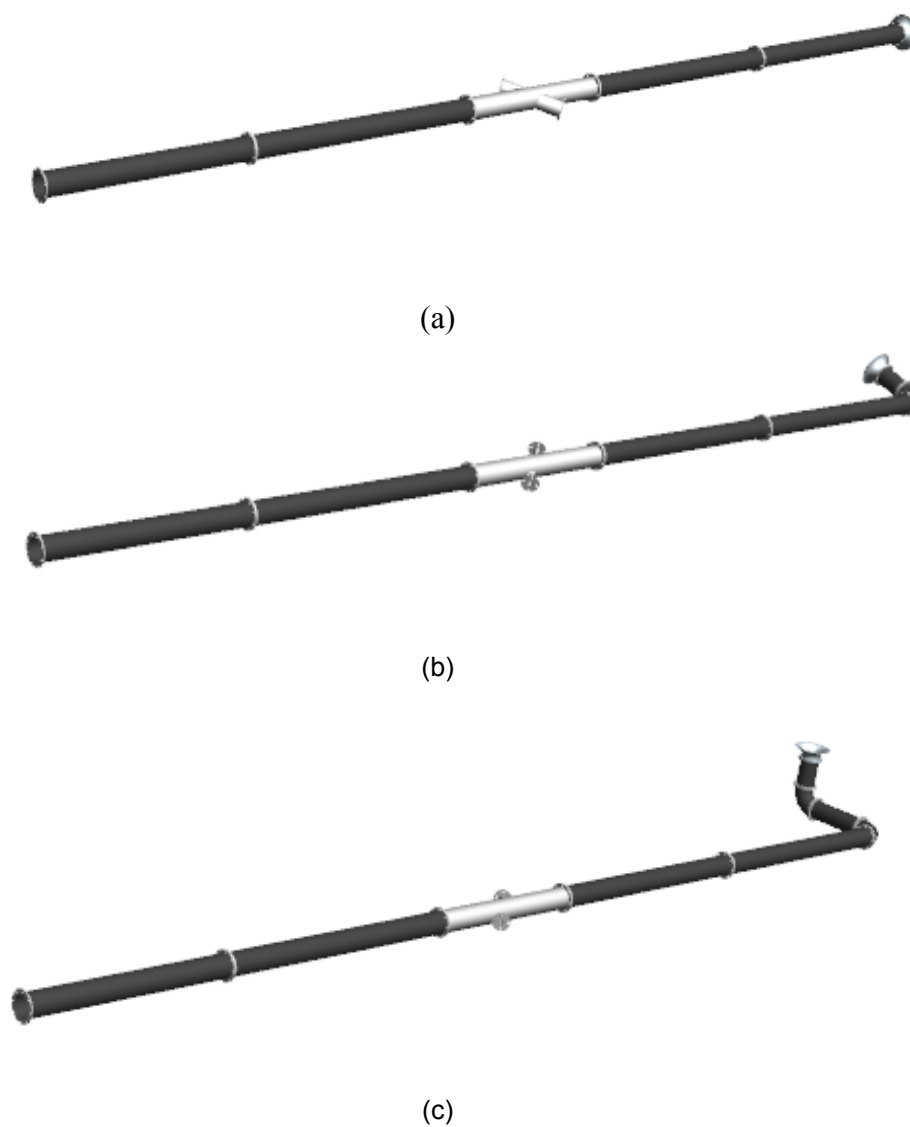


Figura 4. Configurações do túnel de vento: (a) Tubo Reto; (b) Uma curva; (c) Duas curvas em planos ortogonais

#### 2.4.4. ***Dimensões do túnel de vento***

As dimensões dos dutos que integram a construção do túnel de vento, as suas respectivas posições de montagem e organização estão dispostas na Tabela 1 e na Fig. 5.

Tabela 1. Dimensões dos dutos que integram a construção do túnel de vento

	$D_{ext}$	$e$	$D_{int}$	Massa Específica	$L$	$L1$	$L2$	$L$	$L3$	$L4$
	(mm)	(mm)	(mm)	(kg/m)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
<b>Tubo 8"</b>	198	8	182	4,5	184,6	2250	2250	1500	2235	1800

Onde,

$D_{ext}$  - diâmetro externo

$D_{int}$  - diâmetro interno

$e$  - espessura do duto

$L$  - comprimento

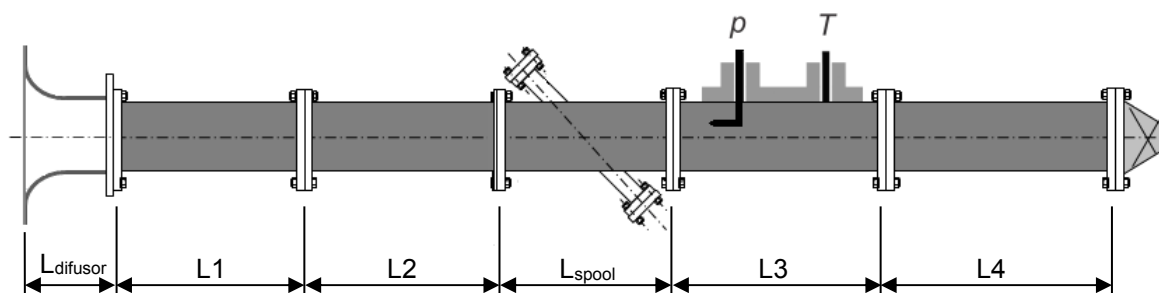


Figura 5. Posições de montagem do túnel de vento

À montante do duto está instalado um bocal em fibra de vidro, cuja geometria pode ser visualizada na Fig. 6, com o objetivo de uniformizar o perfil de velocidades na entrada do tubo [26]. O bocal de entrada é caracterizado por uma contração do diâmetro, de 462 mm para 182 mm. O objetivo de uniformizar o perfil de entrada foi obtido satisfatoriamente, conforme demonstram as simulações numéricas [26] para esta instalação especificamente.



Figura 6. Bocal de entrada (bell mouth) em fibra de vidro

O acoplamento entre dois trechos distintos, para a obtenção de diferentes configurações de montagens, é feito por flanges em nylon com encaixe tipo macho-fêmea, de forma a garantir a centralização e alinhamento das paredes internas, visando eliminar irregularidades, tais como, desalinhamentos e/ou vazamentos.

A Fig. 7 mostra a conexão entre dutos, uma curva de 90° e o bocal por intermédio de flanges.



Figura 7. Conexão entre partes constituintes do túnel de vento a partir de flanges tipo macho-fêmea

## 2.5. **Controle e aquisição de dados**

O equipamento é instrumentado com um sistema automático de aquisição de dados (National Instruments – LabView®), um transmissor de pressão como também um medidor de vazão ultrassônico de gás de *flare* modelo Fluent FGM 130, não intrusivo. Dessa forma é possível aquisitar e registrar informações do processo, tais como: velocidade e vazão do escoamento no túnel de vento,

pressão, temperatura, estimativas do peso molecular e peso específico, velocidade do som, entre outras.

### 2.5.1. **Controle da velocidade do escoamento**

O perfil de velocidades do escoamento é diretamente associado a qualidade da montagem, tais como: presença do bocal, alinhamento entre os dutos e ao controle da rotação do soprador, promovido por um inversor de frequência da WEG modelo CFW 09 em malha aberta.

Esse dispositivo é capaz de gerar tensões e frequências trifásicas ajustáveis, com a finalidade de controlar a rotação de um motor de indução trifásico com o princípio de controle vetorial *sensorless*, variando a tensão e a frequência no motor de indução trifásico, permitindo assim atingir vários patamares de velocidade de escoamento no túnel de vento, com uma regulação de velocidade na ordem de 0,5% [29].

### 2.5.2. **LabView®**

O controle da rotação do motor do soprador efetuado pelo inversor de frequência é feito por intermédio do *software* de projeto gráfico de sistemas *LabView®* que disponibiliza as ferramentas necessárias para criar e implementar sistemas de medição e controle por meio de uma integração de *hardware* e *software* [30]. Na Fig. 8 é visualizada a interface de controle desenvolvida para o controle da rotação do inversor de frequência, onde o usuário pode definir um valor de rotação

compreendido entre 0 e 1200 rpm. A legenda referente a interface e mais detalhes sobre o controle são encontrados no Anexo A.

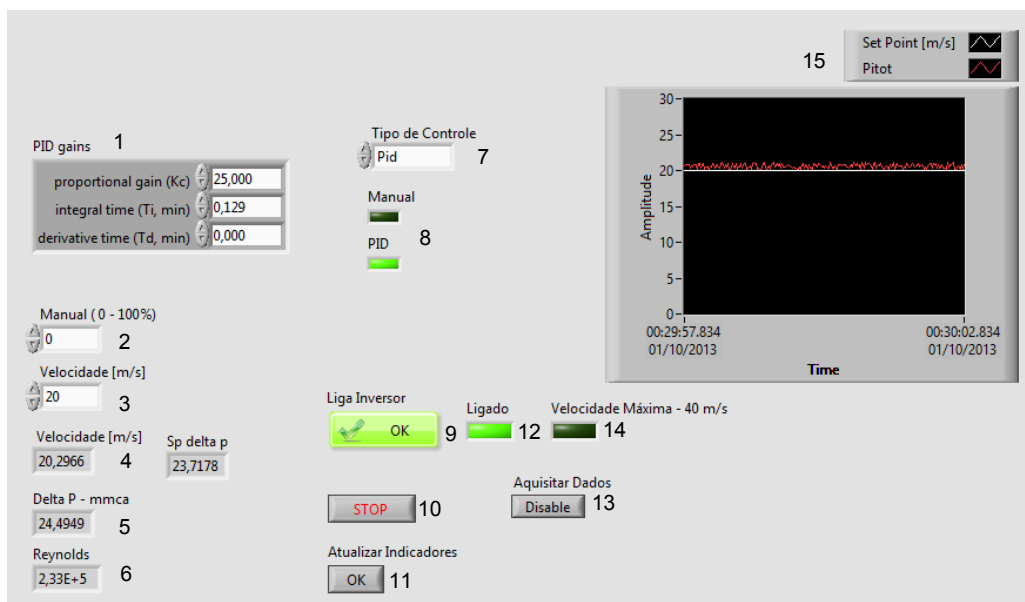


Figura 8. Interface para controle da rotação do soprador

### 2.5.3. *Transmissor de pressão diferencial*

A instrumentação do túnel de vento conta com um transmissor de pressão diferencial modelo Smar LD301 tipo 4 a 20 mA a dois fios, para realizar e transmitir medidas de pressão diferencial geradas pelo tubo de pitot utilizado para inferir as velocidades locais do escoamento ao longo da secção transversal do túnel de vento. Este transmissor está calibrado para um range de 0 à 200 mmH<sub>2</sub>O.

O sinal de 4 a 20 mA gerado pelo transmissor é lido por um módulo de aquisição de corrente (0 a 20 mA) da National Instruments® - NI 9203, convertido posteriormente para pressão diferencial, com o auxílio da interface para controle da rotação do soprador, interface essa que nos permite também registrar valores das

pressões diferenciais para análises do comportamento do perfil de velocidades do escoamento no túnel de vento em diferentes configurações de montagem.

## 2.6. ***As Tecnologias dos Medidores de Vazão***

Para realizar a análise experimental do efeito de curvas na medição de vazão de gás de queima, foram utilizados dois medidores em série: um tubo de Pitot e um medidor de vazão ultrassônico.

### 2.6.1. ***Tubo de Pitot***

Com o intuito de mapear o perfil de velocidades no túnel de vento, procedimento este abordado mais adiante na metodologia experimental, foi utilizado um tubo de Pitot, que é um instrumento constituído por dois tubos coaxiais, formando uma peça em formato de L, conforme Fig. 9.

A extremidade do tubo interno, colocado a frente do escoamento, percebe 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 ( $\Delta P$ ) é caracterizada como pressão dinâmica [31].

A norma ISO 3966 de 2008 [32] é a que regulamenta 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 melhor se adequa ao



modelo ITMP 120 da KIMO utilizado é visualizada na Fig. 10, que corresponde à Figura A.2 da norma.

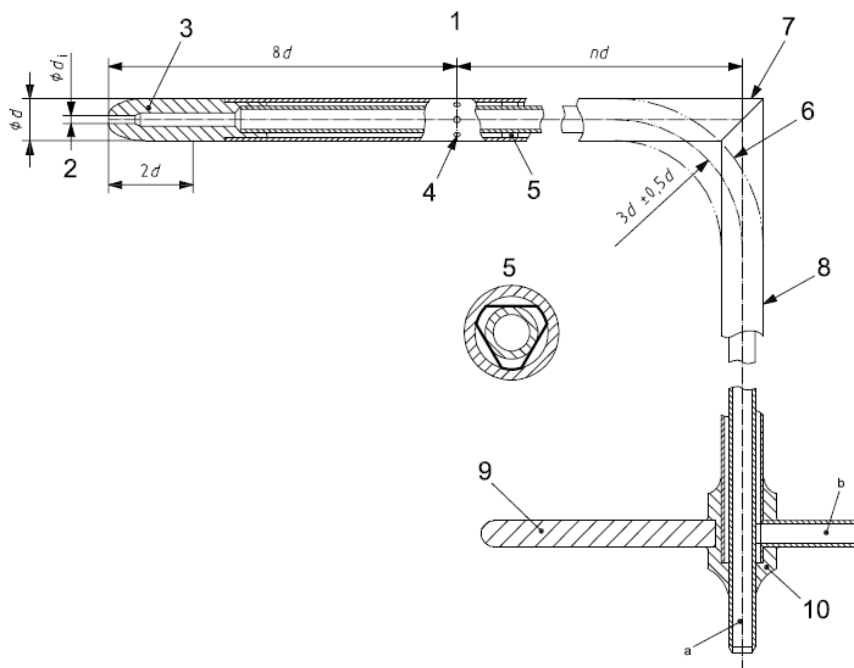


Figura 9. Geometria e detalhes de um tubo de Pitot de nariz elipsoidal, conforme a ISO 3966 [32]

Onde a legenda correspondente está descrita na Fig. 10 de acordo com a norma [32]:

#### Key

- |   |                           |    |                             |
|---|---------------------------|----|-----------------------------|
| 1 | head                      | 6  | alternative curved junction |
| 2 | total pressure hole       | 7  | mitred junction             |
| 3 | modified ellipsoidal nose | 8  | stem                        |
| 4 | static pressure holes     | 9  | alignment arm               |
| 5 | spacer                    | 10 | pressure tapping            |
| a | Total pressure.           |    |                             |
| b | Static pressure.          |    |                             |

Figura 10. Legenda da geometria e detalhes de um tubo de Pitot de nariz elipsoidal [32]

Um levantamento dimensional do Pitot, efetuado no Laboratório de Metrologia da UFES, está listado na Tab. 2 e a verificação de conformidade dimensional com a norma ISO 3966 encontra-se na Tab. 3 [28].

Tabela 2. Medidas Geométricas do Tubo de Pitot ITMP 120 [28]

	Elemento	Dimensão (mm)	Símbolo
1	Diâmetro da cabeça	6,00	d
2	Diâmetro da haste	6,00	d'
3	Extensão da haste	300,00	L <sub>haste</sub>
4	Extensão da cabeça	86,00	L <sub>cabeça</sub>
5	Extensão do nariz	15,00	L <sub>nariz</sub>
6	Furos de pressão estática:		
6.1	Diâmetro dos furos	1,04	D <sub>furo</sub>
6.2	Quantidade	6	N <sub>furo</sub>
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	15,97	R
8	Braço de alinhamento	Não-existe	
9	Ângulo entre haste e nariz (em graus)	90,018°	

Tabela 3. Verificação de conformidade geométrica do tubo de Pitot ITMP 120 da KIMO, à ISO 3966/2008 [28]

	Elemento	Símbolo	Localização na ISO 3966/2008	Valor recomendado	Verificação de Conformidade
1	Tipo do Pitot		Appendix A	-	Conforme
2	Extensão da haste	L <sub>haste</sub>	-		
3	Extensão da cabeça	L <sub>cabeça</sub>	5.1	15d - 25d	Conforme
4	Extensão do nariz	L <sub>nariz</sub>	Appendix A	= 2d	Não-Conforme
5	Furos de pressão estática:				
5.1	Diâmetro dos furos	D <sub>furo</sub>	5.2-d-1	≤ 1,6mm	Conforme
5.2	Quantidade	N <sub>furo</sub>	5.2-d-2	≥ 6	Conforme
5.3	Distância dos furos ao topo do nariz		5.2-d-3	≥ 6d	Conforme
5.4	Distância dos furos até o eixo da haste		5.2-d-4	≥ 8d	Não-conforme
6	Raio entre cabeça e haste	R	5.2-f	= (3±0,5) d	Não-conforme
7	Braço de alinhamento		5.2-g	Existe	Não-conforme
9	Ângulo entre haste e nariz		Appendix A	90° ± 1°	Conforme

De acordo com a norma ISO3966/2008 [32], o coeficiente de descarga do tubo de Pitot é praticamente igual a 1 (um), caso o tubo de Pitot e sua instalação respeitem as premissas operacionais e dimensionais dadas pela norma (secção 8.2). Sendo assim, escolheu-se o tubo de Pitot como um medidor de referência para comparação com os dados provenientes do medidor de vazão ultrassônico, visto que os valores medidos a partir do tubo de Pitot representam de forma fidedigna o comportamento do perfil de velocidades no interior do túnel de vento [28].

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 recomendados por norma. A velocidade mínima é limitada para 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, o tubo de Pitot pode ser utilizado entre os limites de velocidades compreendidos entre 0,017 m/s a 85,00 m/s. Neste amplo intervalo de velocidades, o coeficiente de descarga pode ser adotado como 1 (um), viabilizando assim o *modus operandi* descrito na metodologia experimental.

### 2.6.2. **Medidor de vazão ultrassônico**

Os medidores de vazão ultrassônicos têm várias aplicações, tais como [33]:

- ✓ Medição de gás em instalações de produção, instalações de gás de queima, dutos de transmissão, instalações de armazenamento e sistemas de distribuição nacionais;
  
- ✓ Medição de líquidos em usinas nucleares, centrais hidráulicas, entre outras áreas, como alimentícia, semicondutores e indústrias químicas;
  
- ✓ Medição de pressão arterial sistólica e diastólica, bem como a taxa de fluxo de sangue na medicina;

Apesar de existirem regulamentos [14, 1] indicando recomendações para instalação e operação desses medidores em condições de escoamento turbulento completamente desenvolvidos, muitas vezes tais recomendações se apresentam de difícil adequação, como por exemplo, no caso de medição em gás de queima.

MUV são compostos por, pelo menos, dois transdutores de sinais ultrassônicos que transmitem e recebem pulsos ultrassônicos através do fluido com certa inclinação -  $\alpha$ , que no nosso caso o medidor terá uma inclinação  $\alpha=45^\circ$ , pois estudos indicam que esse ângulo oferece a menor incerteza na medição [34] em relação ao eixo longitudinal da tubulação, como mostra a Fig. 11. O caminho descrito pelos pulsos ultrassônicos é chamado caminho acústico.

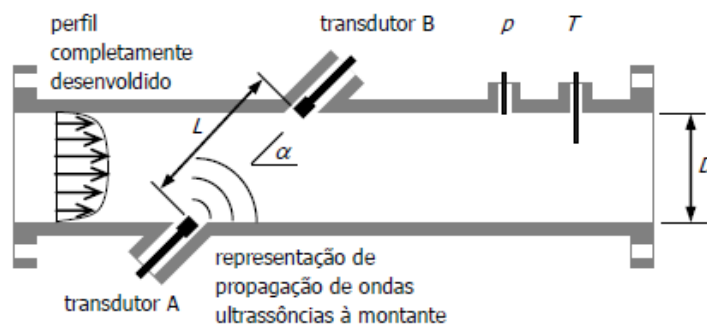


Figura 11. Esquema básico de medidor de vazão por ultrassom de um canal [35].

O LMF está equipado com um medidor de vazão ultrassônico da marca FLUENTA, especificamente para aplicações de medição em *flare*, modelo FGM 130, dotado de um computador de vazão que pode receber até três sistemas de medição em dutos distintos. Ele é composto de um par de transdutores ultrassônicos, cabos e um par de unidades conversoras. O medidor Fluenta FGM 130 oferece recursos como entradas analógicas para transmissores de pressão e transmissores de temperatura e também a comunicação serial modbus RS485.

A arquitetura da instrumentação da medição de gás de queima consiste em transmissores de pressão e temperatura interligados ao medidor Fluenta FGM 130 em que essas variáveis do processo (pressão e temperatura) são lidas, por um computador de vazão via modbus ou por 4 a 20 mA, junto com a variável de vazão proveniente do medidor. Sendo assim, o MUV faz a leitura desses sinais, estimando a velocidade do som com bases nessas propriedades termodinâmicas do fluido. Esta velocidade do som estimada é utilizada pelo medidor de vazão por ultrassom para validar a medição dos tempos de trânsito entre os dois transdutores a montante e a jusante.

Medidores de vazão ultrassônicos por tempo de trânsito possuem pelo menos um par de transdutores que transmitem e recebem pulsos de ultrassom através do fluido, formando um canal acústico, chamado caminho acústico [33]. Os pulsos são, na verdade, ondas mecânicas que trafegam através do meio fluido. Essas ondas são geradas pela vibração de cristais piezoelétrico quando excitados por uma corrente elétrica de frequência conhecida. Assim, os cristais vibram na mesma frequência de excitação. Em aplicações de medição de vazão, as frequências são tipicamente na ordem de centenas de kHz para gases e igual ou superior a 1 MHz para líquidos [35, 36]. Tais ondas são conhecidas como ultrassom.

Na realidade, medidores de vazão ultrassônicos medem o tempo de trânsito dos pulsos a montante e a jusante entre os transdutores. Considerando que o som é uma onda mecânica cuja velocidade sofre interferência direta da velocidade do meio que a conduz, a onda emitida pelo transdutor de montante chega em menor tempo que a onda emitida pelo transdutor de jusante. A diferença entre os tempos de trânsito a montante e a jusante permite inferir a velocidade média do escoamento.

A Fig. 12 mostra um desenho esquemático de um medidor de vazão ultrassônico por tempo de trânsito com um único par de transdutores, onde os transdutores a montante e a jusante são identificadas pelas letras A e B, respectivamente. É possível notar que o centro do duto coincide com eixo x, e que D é o diâmetro interno do duto. Os ângulos de montagem dos transdutores são definidos pelo ângulo de rotação no eixo x a partir da posição vertical do eixo y. O ângulo  $\theta$  define

o plano de emissão, que contém a direção dos pulsos acústicos emitidos pelo par de transdutores.

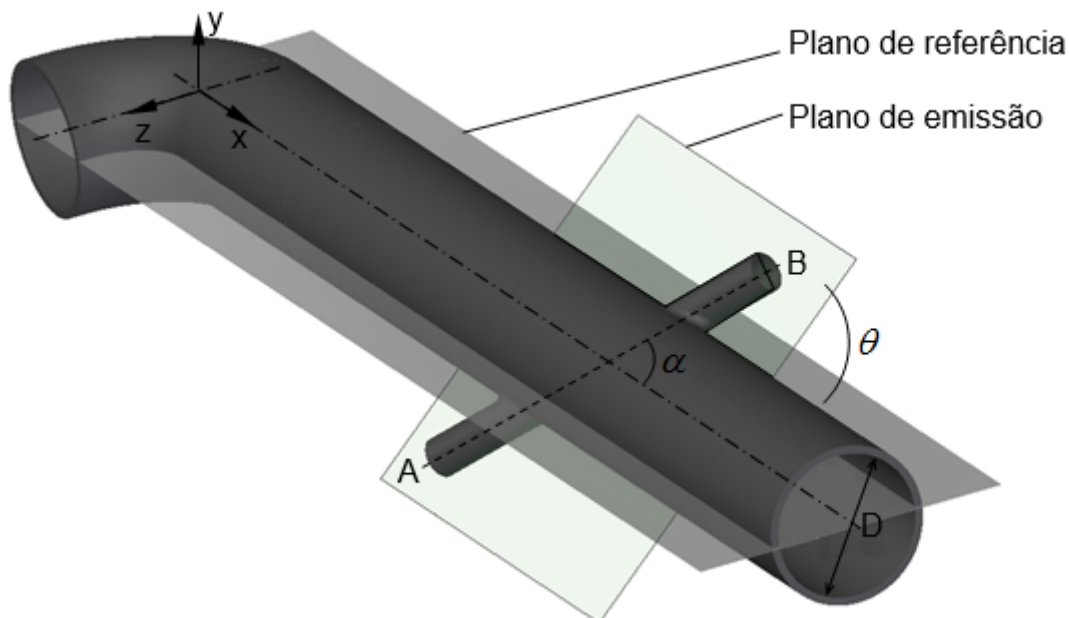


Figura 12. Plano de emissão

O ângulo do plano de emissão desempenha um papel importante na medição de vazão por ultrassom sob condições perturbadas [36].

Estudos demonstram [37, 38] *apdu* MARTINS R.S., que o perfil de velocidades assimétrico desvia os feixes de som de modo que o caminho acústico não é uma linha reta e depende do perfil de velocidades. No entanto, a abordagem mais simples é a de considerar que o caminho acústico é uma linha reta, cujo comprimento pode ser inferido a partir da distância entre os transdutores, originando  $L_{CA} = L$  [37].

Considerando a Fig. 12, o tempo de trânsito do pulso ultrassônico a montante, de A para B -  $t_{AB}$ , e o tempo de trânsito a jusante, de B para A -  $t_{BA}$ , são medidos. Uma vez medidos e se as suas trajetórias são conhecidas, é possível calcular a velocidade média do pulso ao longo do caminho acústico. As médias das velocidades dos pulsos ultrassônicos ao longo do caminho acústico a montante  $\bar{v}_{AB}$  e a jusante  $\bar{v}_{BA}$  podem ser calculadas de acordo com as Eq. (5) e (6) [33].

$$\bar{v}_{AB} = \frac{L_{CA}}{t_{AB}} = C + \bar{v}_{CA} \quad (5)$$

$$\bar{v}_{BA} = \frac{L_{CA}}{t_{BA}} = C - \bar{v}_{CA} \quad (6)$$

Nas Eq. (5) e (6), as velocidades médias são compostas pela velocidade de propagação do som no fluido  $C$  mais uma parcela  $\bar{v}_{CA}$ , que representa a influência do campo de velocidades do escoamento ao longo do caminho acústico, sendo obtida por meio da integração das velocidades ao longo do caminho acústico.

Matematicamente, as incógnitas  $C$  e  $\bar{v}_{CA}$  podem ser determinadas resolvendo o sistema algébrico de duas equações e duas incógnitas representado por (5) e (6). Partindo da premissa anterior que considera  $L_{CA} = L$ , se torna mais fácil demonstrar a seguinte relação geométrica [33].

$$D = L_{CA} \sin \alpha \quad (7)$$



Com isso, ( $C$ ) e ( $\bar{v}_{CA}$ ) podem ser obtidos a partir das Eqs. (8) e (9).

$$C = \frac{D}{2\text{sen}\alpha} \left( \frac{t_{AB} + t_{BA}}{t_{AB}t_{BA}} \right) \quad (8)$$

$$\bar{v}_{CA} = \frac{D}{\text{sen}(2\alpha)} \left( \frac{t_{AB} - t_{BA}}{t_{AB}t_{BA}} \right) \quad (9)$$

Com base no seu princípio de medição, os medidores ultrassônicos por tempo de trânsito calculam  $C$  e  $\bar{v}_{CA}$ , onde a velocidade de propagação do som  $C$  é uma propriedade termodinâmica que também pode ser determinada pela composição química do fluido e estado termodinâmico do fluido escoando. Sendo assim a velocidade média do escoamento ao longo do caminho acústico é determinada a partir da Eq. (10), onde devem ser levados em conta todos os componentes tridimensionais da velocidade para que a medição seja mais fidedigna [33]. Atualmente os MUV's para gás de queima de um canal acústico não fazem a contabilização dessas componentes de velocidades.

$$\bar{v}_{CA} = \frac{1}{L_{CA}} \int_{L_{CA}} \vec{u}(x, y, z) \cdot d\vec{L} \quad (10)$$

Ainda sobre a Eq. (9), pode-se concluir que  $\bar{v}_{CA}$  é o valor médio da velocidade do escoamento projetado no caminho acústico. Entretanto, uma velocidade média na direção do escoamento (perpendicular a secção transversal) é necessária para

inferir a vazão. Neste sentido, a variável  $\bar{V}_m$  que é a velocidade considerada pelos medidores de vazão ultrassônicos, é agora introduzida para representar a velocidade média do escoamento ao longo do caminho acústico na direção do escoamento, onde a relação entre  $(\bar{v}_{CA})$  e  $(\bar{V}_m)$  é descrita por:

$$\bar{V}_m = \frac{\bar{v}_{CA}}{\cos \alpha} \quad (11)$$

É importante salientar que a velocidade considerada pelos MUVs de um canal acústico para inferir a vazão é na verdade uma velocidade média. É esperado que esses medidores detectem apenas um perfil de velocidades uniforme, na qual o valor médio das velocidades nesse perfil se iguale a  $\bar{V}_m$ , resultante da contribuição de  $\bar{v}_{CA}$  na direção do caminho acústico.

Porém devido ao fato da condição de não-deslizamento nas paredes internas do duto, o perfil de velocidades esperado, quando na presença de trechos retos suficientes é um perfil de velocidades turbulento completamente desenvolvido.

Conforme mostrado na Eq. (12), a velocidade média do escoamento na seção transversal do duto  $\bar{V}_m$  é necessário para computar a vazão  $Q$  para escoamentos turbulentos e completamente desenvolvidos.

$$Q = \bar{V}_m \times A \quad (12)$$

Onde,

$Q$  - Vazão volumétrica do escoamento

$\bar{V}_m$  - Velocidade média do escoamento na secção transversal

$A$  - Área interna do duto

Definidos os conceitos de  $\bar{v}_{CA}$  e de  $\bar{V}_m$  é necessário agora relaciona-los entre si. Esta é uma relação entre duas médias diferentes de uma mesma variável, nesse caso a velocidade. Onde  $\bar{v}_{CA}$  representa a média do campo de velocidades ao longo do caminho acústico e  $\bar{V}_m$  representa a média do campo de velocidades ao longo da secção transversal do duto. Sendo assim os medidores ultrassônicos de vazão dependem de um fator  $k$ , fator de perfil, para relacionar  $\bar{V}_m$  e  $\bar{v}_{CA}$ , como mostrado na Eq. (13).

$$k = \frac{\bar{V}_m}{\bar{v}_{CA}} \quad (13)$$

Com isso a vazão pode ser inferida de acordo com a Eq.(14),

$$Q = \bar{V}_m * A * k \quad (14)$$

Onde,

$k$  = Fator de perfil

O fator  $k$ , também conhecido como fator de correção hidrodinâmico [39] *apdu* MARTINS R.S, fator de perfil [40] *apdu* MARTINS R.S. ou fator de correção hidráulico [41] *apdu* MARTINS R.S., conforme demonstrado na Eq. (10) acima, é definido na AGA 9 [14], e é também usado na regulamentação brasileira [13].

Uma vez que a área interna da secção transversal  $A$  pode ser expressa como  $\frac{\pi D^2}{4}$ , a equação para computar a vazão volumétrica  $Q$ , é finalmente obtida substituindo as Eq. (9) e (13) na Eq. (14), obtendo-se assim a Eq. (15):

$$Q = \frac{\pi D^3}{4 \text{sen} 2\alpha} \left( \frac{t_{AB} - t_{BA}}{t_{AB} t_{BA}} \right) k \quad (15)$$

### 2.6.3. Fator de perfil $k$

Os efeitos da instalação no perfil de velocidades do escoamento são consequência da presença de diferentes acidentes de linha, tais como, válvulas, curvas, expansões e contrações do diâmetro interno do duto e trechos retos insuficientes, entre outros. Tais conexões promovem diferentes efeitos no escoamento, dependendo da montagem, retardando assim a formação do perfil de velocidades completamente desenvolvido. Em algumas estações de medição, e de acordo com a configuração estrutural da instalação, o perfil de velocidades completamente desenvolvido é considerado um perfil idealizado, visto que, a configuração de montagem do duto não permite que essa condição seja satisfeita. Sendo assim, efeitos como *swirl* e vórtices, necessitam ser reduzidos, com o intuito de aproximar esse escoamento perturbado o mais próximo de uma condição

aceitável para a medição. Nesses casos, é necessário adequar o fator  $k$ , que na verdade representa a influência do perfil de velocidades ao longo do caminho acústico entre os transdutores ultrassônicos A e B, como mostra a Fig. 13. O MUV de um único canal acústico não possui a capacidade de mapear o perfil de velocidades como nos medidores multi-canais, sendo assim, é necessário um perfil de velocidades turbulento e completamente desenvolvido na secção de medição. Esta é considerada uma condição adequada para a medição de vazão [14], na qual é possível deduzir uma fórmula característica para o fator  $k_{AGA}$  nos casos onde o perfil de velocidades se apresenta não-conforme, equação essa demonstrada na Eq.(15). As Figs. 15i-ii também mostram o efeito do perfil de velocidades no caminho acústico.

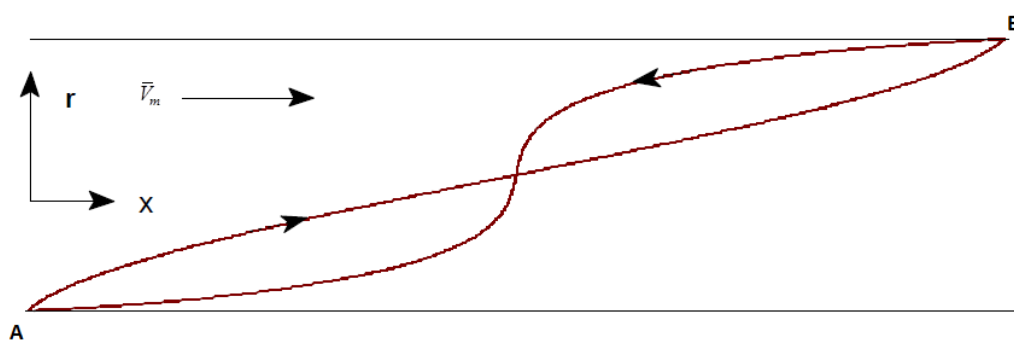


Figura 13. Caminho acústico exagerado [14]

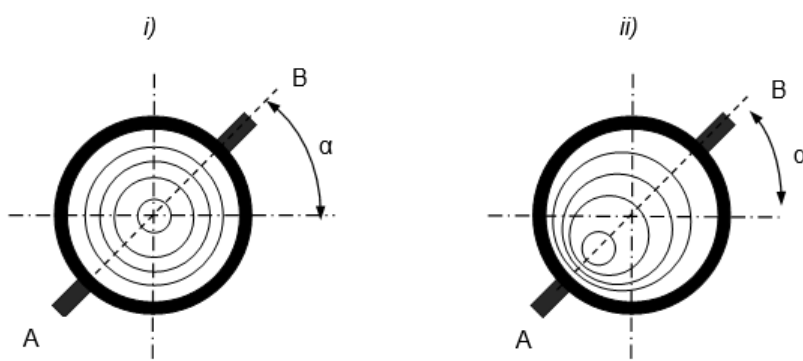


Figura 14. Representação do caminho acústico atravessando diferentes perfis de velocidade:

i) Perfil de velocidades simétrico ii) Perfil de velocidades assimétrico

$$k_{AGA} = \frac{\bar{V}_m}{\bar{v}_{CA}} = \frac{\frac{1}{A} \int v(r) dA}{\frac{1}{L} \int v(r) dL} = \frac{\frac{\mu Re}{\rho D}}{\frac{1}{L} \int v(r) dL} \quad (15)$$

Onde o fator  $k_{AGA}$  pode ser computado uma vez que  $v(r)$  (velocidade radial),  $L$  e  $A$  são conhecidos. Sendo  $v(r)$  uma função do número de Reynolds -  $Re$ , o fator  $k_{AGA}$ , é também uma função de  $Re$ . Se o caminho acústico está situado num plano de emissão que cruza a linha de centro do duto, uma aproximação é dada pela Eq.(16).

$$k_{AGA} = \frac{1}{1,12 - 0,01 \text{Log}(Re)} \quad (16)$$

Onde,

$k_{AGA}$  Fator  $k$  de acordo com a AGA 9

$\bar{v}_{CA}$  Velocidade média do escoamento ao longo do caminho acústico

$\bar{V}_m$  Velocidade média do escoamento ao longo da secção transversal

$\rho$  Massa específica do gás considerando as propriedades do gás perfeito [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ];

$\mu$  Viscosidade [ $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ] (para o ar pode ser estimada pela lei de Sutherland);

A equação do fator  $k$  para escoamento completamente desenvolvido é conhecimento proprietário e outras correlações além daquela fornecida pela AGA 9, Eq.(16) podem ser utilizadas, dependendo do fabricante. Assim, o fator  $k$  do

modelo utilizado é calculado de acordo com uma equação proprietária,  $k_{prop}$ , levando em consideração as propriedades do gás natural para estimar  $Re$ , conforme mostrado na Eq.(17).

$$k_{prop} = 0,889 + 0,0091\text{Log}(Re) + 0,0001\text{Log}^2(Re) \quad (17)$$

Na Figura 15, é possível visualizar uma comparação entre o fator  $k$  definido pela AGA 9,  $k_{AGA}$  (Eq.16), e o fator  $k$  estimado pelo MUV,  $k_{prop}$  (Eq. 17).

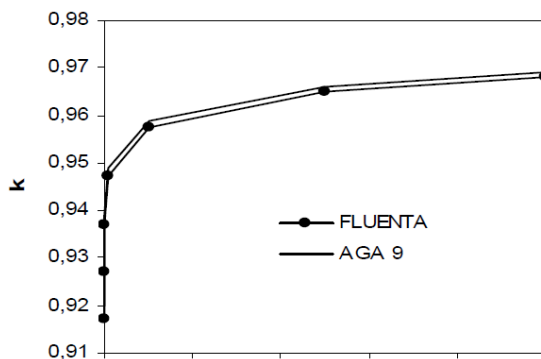


Figura 15. Comparação entre  $k_{AGA}$  e  $k_{prop}$  [42]

Assim, o fator  $k$  é uma relação geométrica entre a velocidade média do escoamento ao longo da seção transversal e a velocidade média do escoamento ao longo do caminho acústico. Lembrando que a velocidade média na seção transversal é obtida pela definição do número de Reynolds e a velocidade média do escoamento na direção do caminho acústico é obtida por meio da integração das velocidades ao longo do caminho acústico.

#### 2.6.4. Arquitetura do controle e instrumentação do túnel de vento

Na Figura 16 pode ser visualizada a arquitetura utilizada para a conexão entre os equipamentos responsáveis pelo controle e instrumentação do túnel de vento, onde o diagrama elétrico de conexão se encontra no Anexo A, conforme comentado anteriormente.

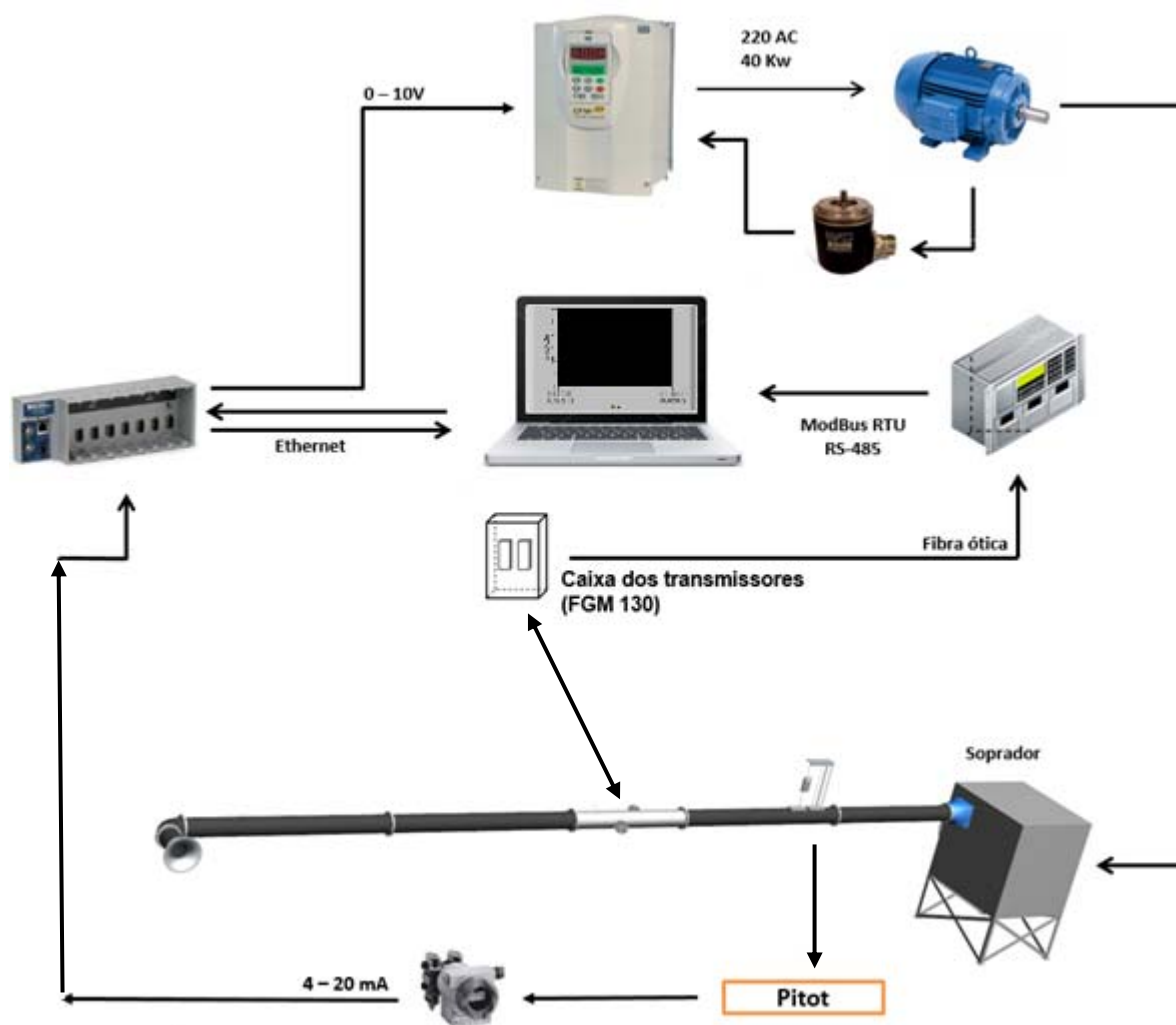


Figura 16. Arquitetura do controle e instrumentação do túnel de vento



### 3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

#### 3.1. *Matriz de testes*

Foi adotada uma matriz de testes para realizar a análise experimental do efeito de curvas na medição de vazão de *flare*, onde leituras feitas com um medidor de referência (tubo de Pitot) foram comparadas com o comportamento dos perfis de velocidade na seção de medição de vazão MUV de gás de *flare* com objetivo de propor metodologias de correção no caso de instalações onde o perfil se apresenta não conforme. A Tab. 4 ilustra a matriz de testes adotada.

Tabela 4. Matriz de testes

	Ângulo 1 (0°)	Ângulo 2 (45°)	Ângulo 3 (90°)	Ângulo 4 (135°)	Ângulo 5 (180°)
<b>Trecho 1 (28,0D)</b>	$R_{11}$	$R_{12}$	$R_{13}$	$R_{14}$	$R_{15}$
	$\sigma_{Pitot11}$	$\sigma_{Pitot12}$	$\sigma_{Pitot13}$	$\sigma_{Pitot14}$	$\sigma_{Pitot15}$
	$\sigma_{MUV11}$	$\sigma_{MUV12}$	$\sigma_{MUV13}$	$\sigma_{MUV14}$	$\sigma_{MUV15}$
<b>Trecho 2 (16,5D)</b>	$R_{12}$	$R_{22}$	$R_{23}$	$R_{24}$	$R_{25}$
	$\sigma_{Pitot21}$	$\sigma_{Pitot22}$	$\sigma_{Pitot23}$	$\sigma_{Pitot24}$	$\sigma_{Pitot25}$
	$\sigma_{MUV21}$	$\sigma_{MUV22}$	$\sigma_{MUV23}$	$\sigma_{MUV24}$	$\sigma_{MUV25}$
<b>Trecho 3 (12,4D)</b>	$R_{31}$	$R_{32}$	$R_{33}$	$R_{34}$	$R_{35}$
	$\sigma_{Pitot31}$	$\sigma_{Pitot32}$	$\sigma_{Pitot33}$	$\sigma_{Pitot34}$	$\sigma_{Pitot35}$
	$\sigma_{MUV31}$	$\sigma_{MUV32}$	$\sigma_{MUV33}$	$\sigma_{MUV34}$	$\sigma_{MUV35}$
<b>Trecho 4 (4,1D)</b>	$R_{41}$	$R_{42}$	$R_{43}$	$R_{44}$	$R_{45}$
	$\sigma_{Pitot41}$	$\sigma_{Pitot42}$	$\sigma_{Pitot43}$	$\sigma_{Pitot44}$	$\sigma_{Pitot45}$
	$\sigma_{MUV41}$	$\sigma_{MUV42}$	$\sigma_{MUV43}$	$\sigma_{MUV44}$	$\sigma_{MUV45}$

Onde,

$R_{ij}$  – Razão entre os valores medidos das vazões dado por  $Q_{MUV}/Q_{Pitot}$

$Q_{Pitot}$  – Vazão calculada através da velocidade de descarga obtida pelo tubo de Pitot

$Q_{MUV}$  – Vazão medida pelo medidor ultrassônico MUV

$\sigma_{Pitot}$  – Desvio padrão relativo das leituras do tubo de Pitot

$\sigma_{MUV}$  – Desvio padrão relativo das leituras do MUV

A interpretação da matriz de testes pode ser vista na Tab. 5, onde, por exemplo, foi escolhido o experimento  $i,j=1,4$  para ilustrar e facilitar o entendimento das diferentes configurações de montagens utilizados na análise experimental. Então, a Tag  $\sigma_{Pitot14}$ , por exemplo, significa o desvio padrão das leituras realizadas na configuração de montagem Trecho 1 em relação ao ângulo 4, a Tag  $R_{15}$  significa a razão entre os valores medidos das vazões na configuração de montagem Trecho 1 em relação ao ângulo 5, e assim sucessivamente.

Tabela 5. Interpretação da matriz de testes

	Ângulo 1	Ângulo 2	Ângulo 3	Ângulo 4	Ângulo 5
Trecho 1	$R_{11}$	$R_{12}$	$R_{13}$	$R_{14}$	$R_{15}$
	$\sigma_{Pitot11}$	$\sigma_{Pitot12}$	$\sigma_{Pitot13}$	$\sigma_{Pitot14}$	$\sigma_{Pitot15}$
	$\sigma_{MUV11}$	$\sigma_{MUV12}$	$\sigma_{MUV13}$	$\sigma_{MUV14}$	$\sigma_{MUV15}$

As dimensões dos Trechos utilizados e os respectivos ângulos estão descritos na Tab. 6. É importante salientar que a matriz de testes é a mesma nas configurações de montagem para trecho reto, 1 (uma) curva e duas curvas.

Tabela 6. Dimensões dos Trechos utilizados e os respectivos ângulos

	Ângulo 1	Ângulo 2	Ângulo 3	Ângulo 4	Ângulo 5
<b>Trecho 1</b>	28D	28D	28D	28D	28D
	0°	45°	90°	135°	180°
<b>Trecho 2</b>	16,5D	16,5D	16,5D	16,5D	16,5D
	0°	45°	90°	135°	180°
<b>Trecho 3</b>	12,4D	12,4D	12,4D	12,4D	12,4D
	0°	45°	90°	135°	180°
<b>Trecho 4</b>	4,1D	4,1D	4,1D	4,1D	4,1D
	0°	45°	90°	135°	180°

Na Tab. 6 encontram-se os trechos retos e os ângulos de emissão, de acordo com a Fig. 12, para realizar a análise experimental do efeito de curvas. O MUV foi montado em diferentes configurações, onde foram feitas diversas leituras em diferentes rotações do compressor, permitindo posteriormente comparar a vazão computada pelo MUV com o medidor de referência (tubo de Pitot), visando a proposição de uma metodologia de correção nos trechos onde o perfil de velocidades se apresentou não conforme.

### 3.2. Cálculo da velocidade de descarga

Foram montadas três configurações distintas instaladas à montante do medidor de referência (tubo de Pitot), como pode ser observado na Fig. 17, identificadas como: a) tubo reto; b) 1 curva de 90°; c) 2 curvas a 90° em planos ortogonais. A seção de medição de referência foi instalada em um comprimento de

desenvolvimento de 30D (5.460 mm) a partir do bocal do túnel, inserido em uma posição de forma a fazer uma varredura diametral, Fig. 18, e realizar as leituras de diferença de pressão nos pontos de inserção prescritos pela norma ISO 3966/2008 [32].

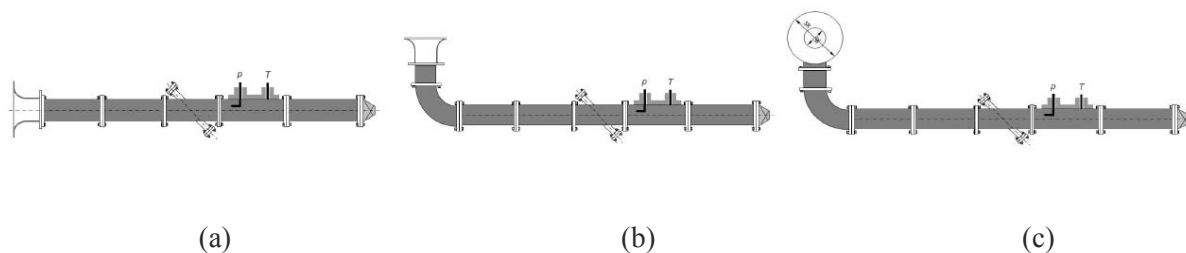


Figura 17. Configurações de montagem: (a) tubo reto; (b) uma curva 90° à montante; (c) duas curvas 90° em planos perpendiculares à montante

A instalação é instrumentada ainda com um sistema automático de aquisição de dados (*National Instruments – LabView®*), um medidor de vazão ultrassônico de gás de *flare* modelo *Fluenta FGM 130* e um transmissor de pressão diferencial. Dessa forma é possível aquisitar e registrar informações do processo, tais como:

- ✓ Velocidade;
- ✓ Vazão do escoamento no túnel de vento;
- ✓ Pressão, temperatura, peso molecular;
- ✓ Peso específico estimado;
- ✓ Velocidade do som, entre outros;

Foram utilizadas três níveis de rotações do compressor para o estudo do efeito das curvas no perfil de velocidades, a saber: 700, 950 e 1200 rpm, respeitando as especificações da ISO 3966/2008 [32] na matriz de testes.

O sistema de referências para varredura diametral do tubo de Pitot está demonstrado na Fig. 18.

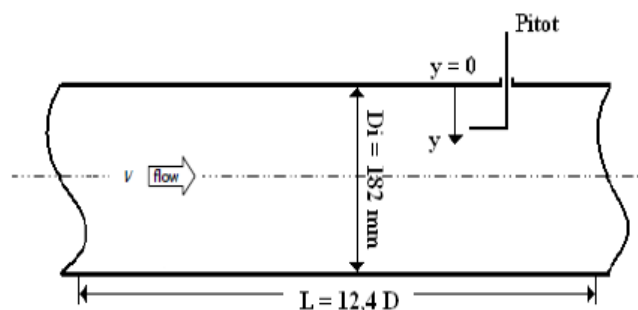


Figura 18. Referência para os pontos de medição do tubo de Pitot

A velocidade média do escoamento, abordada na norma [32] como velocidade de descarga, *discharge velocity*, foi determinada a partir de uma integração numérica da velocidade na secção transversal [32] através de interpolações entre pares sucessivos de pontos de medição ao longo de curvas de terceiro grau de acordo com a relação  $(r/R_i)^2$  para uma secção transversal circular do duto. A localização dos pontos de medição (na análise em questão foram utilizadas leituras em 4 pontos ao longo do diâmetro) correspondem aos valores de distância em relação à parede,  $y/D_i$ , conforme mostrado na Tab. 7 [32].

Tabela 7. Localização dos pontos de medição, considerando a aproximação Log-Linear

Número de pontos de medição por raio	$r/R_i$	$y/D_i$
3	$0,3586 \pm 0,0100$	$0,3207 \pm 0,0050$
	$0,7302 \pm 0,0100$	$0,1349 \pm 0,0050$
	$0,9358 \pm 0,0032$	$0,0321 \pm 0,0016$
5	$0,2776 \pm 0,0100$	$0,3612 \pm 0,0050$
	$0,5658 \pm 0,0100$	$0,2171 \pm 0,0050$
	$0,6950 \pm 0,0100$	$0,1525 \pm 0,0050$
	$0,8470 \pm 0,0760$	$0,0765 \pm 0,0038$
	$0,9622 \pm 0,0018$	$0,0189 \pm 0,0009$

A velocidade local em cada posição é calculada como sendo igual à média aritmética das velocidades lidas nos pontos de medição situados no raio em questão de acordo com a Eq. 18:

$$V_n = C_D \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad (18)$$

Onde,

$C_D$  Coeficiente de descarga do tubo de Pitot,  $\approx 1$ , segundo a ISO 3966/2008 [32];

$\Delta p$  Pressão diferencial gerada no tubo de Pitot (Pa);

$P$  Massa específica do fluido - ar atmosférico ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );

$V_n$  Velocidade local do escoamento em um ponto de medição dado pela norma;

As leituras dos perfis de velocidade obtidos nas três configurações de montagem são mostradas na Figura 19a-c para os três níveis de rotação do soprador: 700, 950 e 1200 rpm.

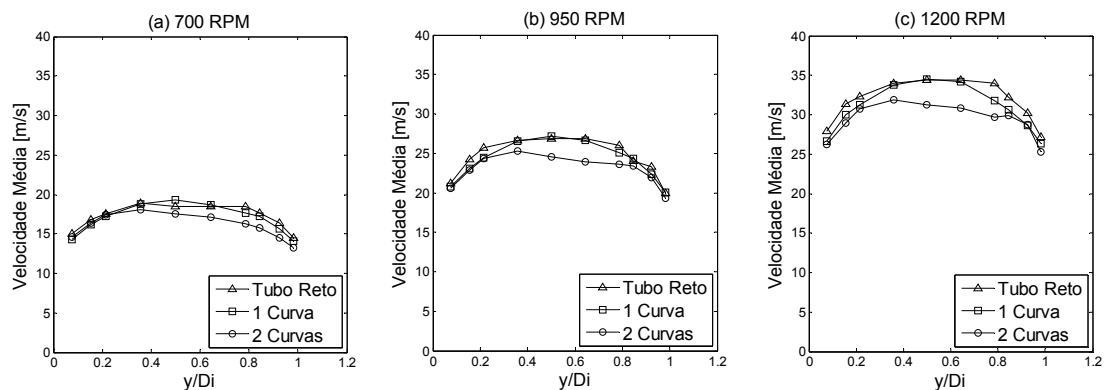


Figura 19. Perfis de velocidade em diferentes configurações e rotações: (a)700rpm; (b)950 rpm; (c)1200rpm

A síntese dos dados operacionais relativos à Figura 19a-c, encontram-se na Tab. 8, tais como: comprimento total do tubo, a velocidade média, o número de Reynolds e a perda de carga total para cada configuração de montagem e rotação do soprador.

Tabela 8. Síntese dos dados operacionais de cada montagem do túnel de vento para as rotações: 700, 950 e 1200rpm.

	Tubo Reto - 5,5 m (30D)			1 Curva - 6,3 m (35D)			2 Curvas - 7,36 m (41D)		
	Vel. Descarga [m/s]	Re	$\Delta p_{total}$ mmH <sub>2</sub> O	Vel. Descarga [m/s]	Re	$\Delta p_{total}$ mmH <sub>2</sub> O	Vel. Descarga [m/s]	Re	$\Delta p_{total}$ mmH <sub>2</sub> O
<b>700 Rpm</b>	16,51	1,89E+05	17,61	15,93	1,84E+05	18,67	16,11	1,85E+05	20,72
<b>950 Rpm</b>	23,15	2,64E+05	31,45	22,82	2,63E+05	32,61	22,10	2,54E+05	37,71
<b>1200 Rpm</b>	29,66	3,39E+05	48,24	28,77	3,32E+05	51,15	28,17	3,24E+05	57,91

A velocidade de descarga do escoamento -  $V_D$ , foi inferida pela Eq.(19) da norma [32], secção 10.1. Se  $V_0$  é a velocidade no centro do duto e  $v_1, v_2...v_n$  são as

velocidades médias ao longo da secção transversal com seus respectivos raios

$r_1, r_2, \dots, r_n$  (sendo  $r_i = \frac{r_i}{R}$ , onde  $R$  é o raio da secção transversal):

$$\begin{aligned}
 V_D = & V_0 \left( -\frac{1}{12} r_2^2 + \frac{5}{12} r_1^2 + \frac{1}{12} \frac{r_2^3}{r_2} \right) r_2^3 + V_1 \left( \frac{1}{6} r_1^2 + \frac{2}{3} r_2^2 - \frac{1}{12} r_3^2 \right) - V_2 \left( \frac{r_1^3}{12 r_2} \right) + \\
 & \sum_{i=2}^{i=n-2} V_i \left[ -\frac{1}{12} r^{1(i+2)} + \frac{2}{3} r^{2(i+1)} - \frac{2}{3} r^{2(i-1)} + \frac{1}{12} r^{2(i-2)} \right] + V(n_n - 1) \left[ \frac{1}{2} r^2_{n_n} + \frac{1}{12} r^2_{(n_n - 1)} - \right. \\
 & \left. \frac{2}{3} r^2_{(n_n - 1)} + \frac{1}{12} r^2_{(n_n - 3)} \right] + (19) \\
 & V_{n_n} \left\{ \frac{m}{m+1} (1 - r^2_{n_n}) + \frac{[r^2_{n_n} - r^2_{(n_n - 1)}]^2}{12m(1 - r^2_{n_n})} + \frac{7}{12} r^2_{n_n} - \frac{2}{3} r^2_{(n_n - 1)} + \frac{1}{12} r^2_{(n_n - 2)} \right\}
 \end{aligned}$$

Onde  $n_n$  é o número de pontos por raio. Nesse trabalho foi utilizado  $n_n=4$ , fazendo com que o termo da somatória seja avaliado apenas para  $i = 2$ . O fator  $m$  depende da rugosidade da parede do tubo e das condições do escoamento, e é compreendido entre 4 (parede rugosa) e 10 (parede lisa). Neste trabalho foi adotado  $m=7$ . No Anexo B, estão representados os dados que permitiram o cálculo da velocidade de descarga.



## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1. Perfil de velocidades

Para fins de validação dos perfis de velocidade, as leituras de velocidades locais em cada ponto do escoamento estão representadas na Figura 20a-c e comparadas com uma referência de perfil teórico de velocidades. Nesse caso, foi utilizado o perfil teórico de velocidades turbulento completamente desenvolvido apresentado por De Chant [43].

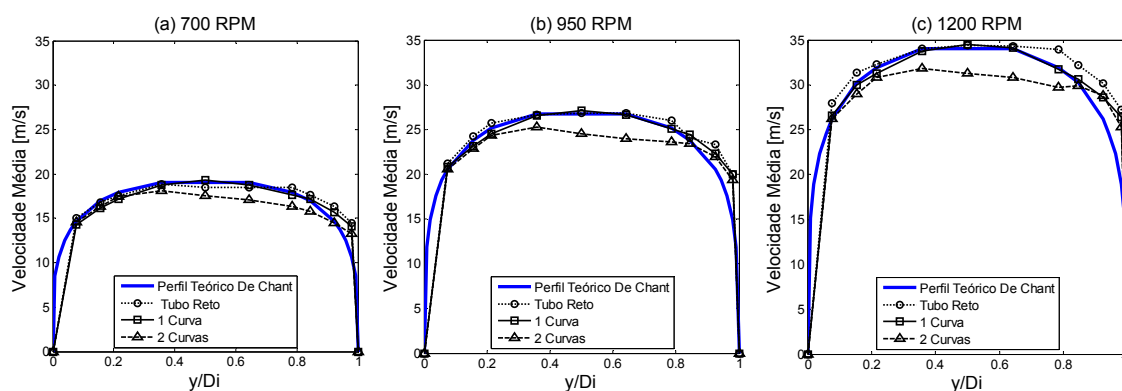


Figura 20. Comparação dos perfis de velocidade experimentais e a referência de perfil teórico em diferentes configurações e rotações

As diferenças percentuais entre o perfil de velocidades proveniente das leituras efetuadas com o medidor de referência (tubo de Pitot) e o perfil teórico de De Chant [44] estão listadas na Tab. 9.

Tabela 9. Diferenças percentuais entre os perfis de velocidades: 700rpm, 950rpm e 1200rpm

y/Di	Tubo Reto			1 Curva			2 Curvas		
	700 rpm	950 rpm	1200 rpm	700 rpm	950 rpm	1200 rpm	700 rpm	950 rpm	1200 rpm
0,076	2,1	3,1	6,3	-2,7	1,0	1,7	-0,5	-0,2	0,3
0,155	-0,8	2,0	3,6	-4,9	-2,9	-0,8	-3,6	-4,1	-4,4
0,215	-2,1	2,4	1,1	-4,4	-2,7	-2,1	-2,6	-3,1	-3,8
0,357	-1,2	-0,4	0,1	-1,7	-0,8	-0,6	-5,6	-5,9	-6,8
0,643	-3,3	0,3	1,1	-1,9	-0,4	0,5	-11,8	-11,7	-10,3
0,785	2,8	3,3	5,8	-1,5	-0,3	-0,5	-9,8	-6,4	-7,5
0,845	4,0	1,1	6,1	1,5	2,4	1,2	-7,6	-1,5	-1,1
0,924	10,3	11,6	13,3	6,4	7,8	8,5	-1,3	6,2	9,1

Na Tab. 9, observa-se que as diferenças percentuais máximas no tubo reto a 700 rpm são de 10,3%, 11,6% a 950 rpm e 13,3% a 1200 rpm, próximo à parede do tubo, o que indica que com o incremento da rotação do soprador as diferenças percentuais aumentam visto que o desenvolvimento do perfil de velocidades turbulento completamente desenvolvido é proporcional ao número de Reynolds -  $Re$ . Com isso infere-se que a 700 rpm, o perfil de velocidades turbulento completamente desenvolvido possui trecho reto suficiente (30D) para se desenvolver nas configurações, tanto em tubo reto, quanto em 1 curva. O aumento das diferenças percentuais com o aumento do  $Re$  também se repete para as configurações de 1 curva e 2 curvas.

As diferenças com ordens superiores observadas na configuração em 2 curvas, tanto nas Figs. 19 e 20, quanto na Tab.9, levam a crer que para esta configuração o trecho reto da seção de medição com 30D deve ter sido insuficiente para a equalização das forças inerciais e viscosas, não gerando a condição de escoamento completamente desenvolvido. Dessa forma, essa configuração não será abordada nas próximas análises.

As diferenças percentuais entre os perfis de velocidades, Tab. 8, podem ser atribuídas também às variações da rotação e oscilações de torque no motor, visto que o método de controle utilizado é em malha aberta. Testes realizados de repetitividade indicam que o processo não é totalmente controlado. Um método que provavelmente poderá reduzir essas variações da rotação seria o uso de algoritmos clássicos de controle -  $PI$ , no sentido de obter um melhor controle da velocidade do escoamento como também melhorias no controle do processo objetivando

reduzir a variabilidade e as incertezas nas leituras do medidor de vazão de referência (tubo de Pitot). Essas propostas serão abordadas na seção de trabalhos futuros, mais adiante no texto.

Para a verificação da repetitividade do perfil de velocidades, foram realizadas duas baterias consecutivas de leituras denominadas: i) Experimento 1 - Exp1 e ii) Experimento 2 - Exp 2, em que foram efetuadas leituras distintas de velocidade local em cada ponto do escoamento a partir de uma varredura diametral já mencionada anteriormente na configuração de montagem tubo reto, mantendo as mesmas premissas dadas pela norma [32], ou seja, interpolações entre pares sucessivos de pontos de medição ao longo de uma seção transversal circular do duto.

A Fig. 21 e Tab. 10 apresentam resultados dos testes de repetitividade, como também as respectivas diferenças percentuais mantendo as mesmas premissas (Exp1 e Exp2).

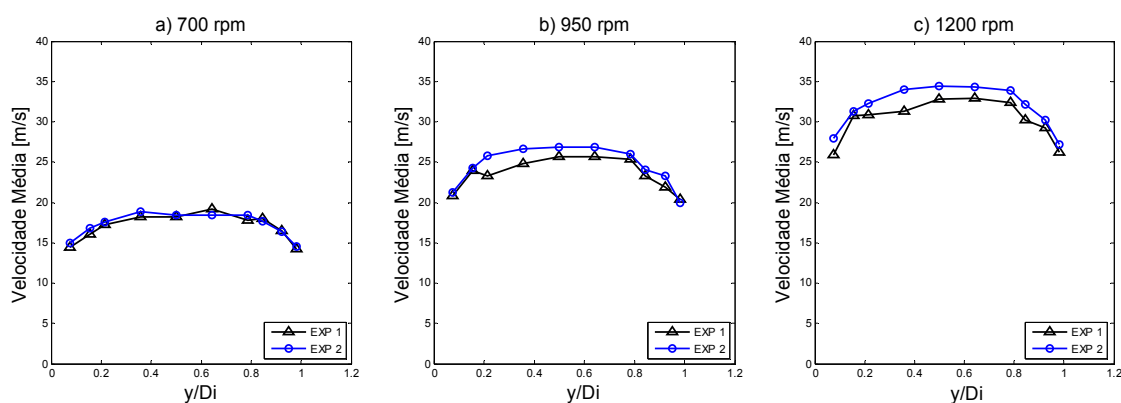


Figura 21. Testes de repetitividade nas três rotações do soprador

Tabela 10. Diferenças percentuais referentes aos testes de repetitividade EXP1 e EXP2

Pontos da Norma	700 RPM	950 RPM	1200 RPM
0,076	3,5	2,0	7,4
0,155	4,7	1,1	1,8
0,215	1,9	9,4	4,6
0,357	3,6	6,8	7,9
0,500	1,2	4,6	4,5
0,643	-3,7	4,2	4,3
0,785	3,9	2,3	4,7
0,845	-1,9	3,1	6,2
0,924	-0,9	5,9	3,2
0,981	2,3	-1,8	3,5

Assim, embora os perfis de velocidade na seção de referência apresentem aderência com o perfil teórico, tanto para a configuração em tubo reto quanto em 1 curva, não foi considerado que houvesse repetitividade desse comportamento. Essa característica será abordada na próxima seção.

#### 4.2. *Cálculo da velocidade média*

Considerando os resultados obtidos pela análise experimental do perfil de velocidades para as configurações em tubo reto e 1 curva, ou seja, que o escoamento na seção de medição do tubo de Pitot é turbulento e completamente desenvolvido, infere-se então uma relação entre a velocidade média do escoamento e a velocidade máxima na linha de centro do duto para cada configuração de montagem. Essa relação está explícita na Eq. (20).

$$R_V = \left( \frac{V_D}{V_{\max}} \right) \times 100\% \quad (20)$$

Onde,

$R_v$  Razão entre a velocidade média e velocidade máxima do escoamento

$V_D$  Velocidade de descarga de acordo com a norma [32]

$V_{\max}$  Velocidade máxima do escoamento em cada configuração de montagem

Na Fig. 22 é visualizado um perfil de velocidades idealizado, turbulento e completamente desenvolvido e a relação entre a velocidade média e máxima. Essa distribuição da velocidade do escoamento pode ser descrita pelo *perfil da lei de potência,  $P_e$*  [44].

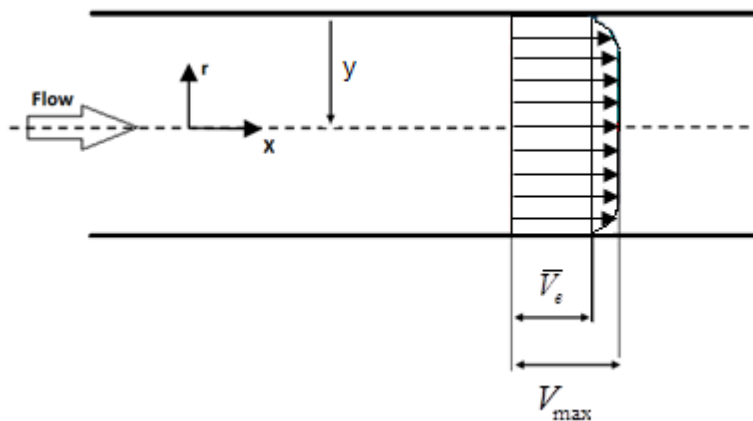


Figura 22. Perfil de Velocidades turbulento e completamente desenvolvido

Considerando o escoamento completamente desenvolvido ideal, em regime permanente, sem efeito de *swirl* e ao longo de dutos cilíndricos sem acidentes de linha e com um raio  $R$ , apresentaria como único componente da velocidade diferente de zero um vetor na direção axial, sendo uma função da posição radial  $r$  apenas. Tal função pode ser estimada de acordo com a Eq. (21) [14].

$$v(r) = V_{\max} \left( 1 - \frac{r}{R} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (21)$$

Onde,

$r$  Posição radial (m)

$R$  Raio interno do duto (m)

$n$  Função do número de Reynolds (adim.)

$v(r)$  Perfil de velocidades (m/s)

O parâmetro  $n$  é uma função do n° de Reynolds –  $Re$ , além da rugosidade interna da parede do duto na forma da Eq.(22). Para tubos lisos a equação de Prandtl (*universal law of friction for smooth pipes*) se aplica (Schlichting, 1968) [45].

$$n = 2 \log_{10} \left( \frac{Re}{n} \right) - 0,8 \quad (22)$$

Em tubos lisos, se  $Re$  for conhecido,  $n$  pode ser estimado e o perfil de velocidades pode ser obtido em condição de regime permanente. Para os valores de  $Re$  abordados nesse trabalho ( $Re \approx 10^5$ ), calcula-se:  $n = 7,455$ .

Os valores de  $R_V$  obtidos experimentalmente em cada configuração de montagem encontram-se na Tab. 11.

Tabela 11. Valores da Razão de velocidades  $R_V$  para cada configuração de montagem dos dados brutos

Rotação	Tubo Reto	1 Curva
700 rpm	86,6 %	82,3 %
950 rpm	86,5 %	84,1 %
1200 rpm	73,7 %	83,3 %

As diferenças percentuais das velocidades máximas que representam a velocidade média  $v$  do escoamento, obtidas experimentalmente nas diferentes configurações de montagem podem ser atribuídas às assimetrias no perfil de velocidades apresentadas nas Tabs. 9 e 10.

Um outro método para determinar a velocidade média do escoamento na presença de um perfil de velocidades turbulento e completamente desenvolvido é obtido a partir da integração das velocidades ao longo da secção transversal do duto de acordo com um perfil exponencial *um sétimo*,  $P_e$ , dando origem a Eq. (24).

$$\bar{V}_e = \frac{1}{A} \int_0^R \vec{V}_e \cdot d\vec{A} \quad (23)$$

$$\bar{V}_e = \frac{2n^2}{(n+1)(2n+1)} V_{\max} \quad (24)$$

Onde,

$\bar{V}_e$  Velocidade média teórica do escoamento

A Tab. 13 apresenta as diferenças percentuais entre a velocidade média teórica do escoamento,  $\bar{V}_e$ , obtidas a partir do perfil exponencial um sétimo,  $P_e$ , e a velocidade de descarga do escoamento  $V_D$ , a partir da varredura diametral experimental do duto segundo a norma [32]. A Eq. (25) aborda a relação entre essas velocidades.

$$\Delta V_m = \left( \frac{V_D - \bar{V}_e}{\bar{V}_e} \right) \times 100\% \quad (25)$$

Tabela 12. Diferenças percentuais (%) entre as velocidades de descarga (dados brutos) e a velocidade média do perfil teórico

$\Delta V_m$	Tubo Reto			1 Curva		
	700 rpm	950 rpm	1200 rpm	700 rpm	950 rpm	1200 rpm
%	4,9	4,6	10,9	3,0	3,4	12,5

Na Tab. 12, observa-se que as maiores diferenças são encontradas nas rotações de 950 e 1200 rpm. Essas diferenças podem ser atribuídas às assimetrias nos perfis de velocidades, como anteriormente comentado.

Por outro lado, considerando o comportamento temporal das leituras de velocidade, tal como apresentado na Fig. 23, outra análise deve ser levada em conta, tendo em vista o comportamento da variabilidade observada no processo.

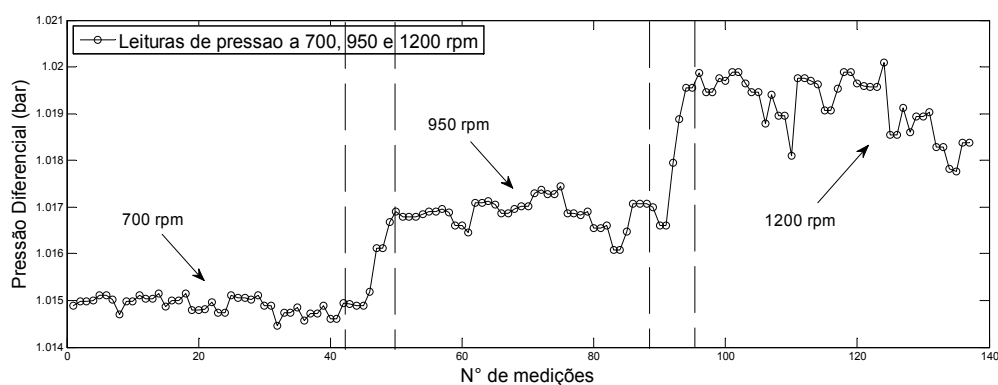


Figura 23. Leituras de pressão a 700, 950 e 1200 rpm na configuração de montagem Tubo reto

Pela análise da Fig. 23, constata-se que as medidas realizadas pelo transmissor de pressão apresentam maior variabilidade a 950 e 1200 rpm, quando comparadas



com as leituras efetuadas a 700 rpm. As variabilidades podem ser atribuídas provavelmente a perturbações no processo, como também aos maiores gradientes de pressão gerados devido aos efeitos inerciais e viscosos com o incremento de  $Re$ . É comum e até esperado que alguns valores experimentais extrapolem uma tendência dominante. Estes valores podem ser, de fato, medições erradas, como podem também representar certo fenômeno físico de interesse. Por este motivo, tais valores não podem ser descartados sem recorrer a um critério consistente para sua rejeição. Este critério justifica que um dado valor medido pode ser aceito apesar de apresentar certo desvio em relação à média.

Para tal procedimento foi utilizado o critério de rejeição de *Chauvenet*, que de acordo com Mendes e Rosário (2005) [46], determina que se o módulo do desvio  $d_i$  de uma determinada medição  $x_i$  em relação à média  $\bar{x}$  for maior que um valor  $d_{ch}$  (limite de rejeição de *Chauvenet*), a medição deve ser rejeitada.

$$|d_i| = |x_i - \bar{x}| > d_{ch} \quad (26)$$

Assim, passa-se a descrever de forma breve, a aplicação do critério de *Chauvenet* para rejeição dos pontos espúrios nas leituras experimentais.

Em primeiro lugar foi calculado a média e o desvio padrão do conjunto de dados aquiridos. A média de cada um dos pontos foi comparada com o desvio padrão, conforme os valores da Tab. 13, com o objetivo de eliminar os pontos espúrios. Para a apresentação dos dados finais, um novo valor médio e um novo desvio padrão foram calculados, sem incluir os pontos anteriormente descartados.

Tabela 13. Limite de rejeição de Chauvenet [47]

Nº de medidas	$d_{ch}$
2	1,15
3	1,38
4	1,54
5	1,65
6	1,73
7	1,80
8	1,87
9	1,91
10	1,96
11	1,99

Nesse experimento foram utilizadas 11 medidas de pressão diferencial para cada posição da varredura diametral, o que representa um  $d_{ch}=1,99$ . Na Tab. 14 são visualizadas as diferenças percentuais entre as velocidades médias (Teórico e Experimental) após a aplicação do critério de *Chauvenet*.

Tabela 14. Diferenças percentuais entre as velocidades médias (Teórico e Experimental) após o critério de Chauvenet.

$\Delta V_m$	Tubo Reto			1 Curva		
	700 rpm	950 rpm	1200 rpm	700 rpm	950 rpm	1200 rpm
%	4,9	4,6	4,3	0,9	1,6	0,1

Na Tab. 15 observa-se o efeito do tratamento estatístico, considerando dados brutos e dados tratados, aplicado às diferenças de velocidades médias Eq. (25) obtidas pelo modelo teórico Eq. (24) e através das medidas experimentais Eq. (19). Constata-se que tanto na configuração de montagem em tubo reto quanto em 1 curva apresentam as diferenças percentuais menores entre o modelo teórico e as leituras experimentais. Isso pode ser justificado desde que, com o tratamento dos

dados brutos, as leituras de velocidades locais, utilizadas para inferir a velocidade média em ambas configurações de montagem do escoamento possuíam pontos espúrios do desvio padrão adotado, acarretando em um cálculo de uma média não-representativa do escoamento, conseqüentemente, um cálculo da vazão também não representativo do processo. Tais diferenças são mais acentuadas na montagem em 1 curva.

Tabela 15. Diferenças entre as velocidades médias (teórico e experimental) com os dados brutos e os dados tratados

Rotação	$\Delta V_m$ (%)	Tubo reto	1 Curva
700 rpm	Dado bruto	4,9	3,0
	<i>Chauvenet</i>	4,9	0,9
950 rpm	Dado bruto	4,6	3,4
	<i>Chauvenet</i>	4,6	1,6
1200 rpm	Dado bruto	10,9	12,5
	<i>Chauvenet</i>	4,3	0,1

A razão entre a velocidade média e a velocidade máxima obtidas com perfil teórico é função do parâmetro  $n$ , na forma da Eq. (27).

$$\left( \frac{\bar{V}_e}{V_{\max}} \right)_{\text{teórico}} = \frac{2n^2}{(n+1)(2n+1)} \quad (20)$$

E que, quando  $n=7,455$ , resulta em:

$$\left( \frac{\bar{V}_e}{V_{\max}} \right)_{\text{teórico}} = 83\% \quad (21)$$

Esse resultado é comparável às razões mostradas na Tab.15, mas também demonstra a necessidade de se avaliar melhor a adoção do parâmetro  $n=7,455$  quando comparados com os perfis obtidos experimentalmente.

Tabela 16. Comparação entre as razões das velocidades a partir dos dados brutos e dos dados tratados pelo critério de *Chauvenet*

<b>Rotação</b>	$R_V$ (%)	<b>Tubo reto (%)</b>	<b>1 Curva (%)</b>
<b>700 rpm</b>	Dado bruto	87,00	82,30
	Dado tratado	86,70	84,10
<b>950 rpm</b>	Dado bruto	86,50	84,10
	Dado tratado	86,40	84,00
<b>1200 rpm</b>	Dado bruto	73,70	83,30
	Dado tratado	86,20	82,70

Existem diferenças em  $R_V$  menores que 0,1% no caso de 950 rpm em tubo curvo até da ordem de 17% no caso de 1200 rpm em tubo reto, considerando a relação da velocidade média obtida através dos dados brutos e os dados tratados estatisticamente. Essas diferenças observadas corroboram a necessidade de aplicação de procedimentos estatísticos às leituras brutas de forma a se obter comportamentos mais estáveis e confiáveis. Essa análise também se aplica aos resultados dispostos na Tab. 16.

A Tab. 16 agrupa os dados referentes as diferenças entre as velocidades de descarga obtidas experimentalmente (dados brutos) e após tratados com o critério de *Chauvenet* em cada configuração de montagem.

Tabela 17. Diferenças entre as velocidades de descarga obtidas experimentalmente (dados brutos) e após tratados com o critério de *Chauvenet* em cada configuração de montagem

Rotação	$V_D$ (m/s)	Tubo reto	1 Curva
700 rpm	Dado bruto	16,50	15,93
	Dado tratado	16,51	15,93
	dif (%)	0,06	0
950 rpm	Dado bruto	23,23	22,84
	Dado tratado	23,15	22,82
	dif (%)	- 0,34	- 0,08
1200 rpm	Dado bruto	25,33	28,73
	Dado tratado	29,66	28,77
	dif (%)	14,6	0,14

Analisando em conjunto a Tab. 17 e a Fig. 23, é possível ver que as maiores diferenças porcentuais se localizam a 1200 rpm, onde na realidade o processo demonstrou ter maior variabilidade.

#### 4.3. **Medidor de vazão ultrassônico**

##### 4.3.1. *Comparação do MUV com o medidor de referência*

De forma a quantificar o efeito da instalação de curvas sobre as leituras da velocidade do escoamento com o MUV, com o intuito de inferir a vazão e com isso comparar essas leituras com o medidor de referência (tubo de Pitot), foram efetuadas leituras em diferentes trechos e em diferentes ângulos de emissão, conforme descritos na matriz de testes na secção 4.1, em três rotações distintas. O objetivo dessa varredura de trechos e planos de emissão, foi avaliar os efeitos da geometria (acidentes de linha e trecho de desenvolvimento) no perfil de velocidades, isolando assim os efeitos dinâmicos devido à rotação e significativos do escoamento. A Fig. 24 mostra a comparação das razões  $R$  Eq.(29), efetuadas com o MUV e com o Pitot, identificados como: *i*) Tubo reto 700 rpm, *ii*) Tubo reto

950 rpm, *iii*) Tubo reto 1200 rpm, *iv*) 1 curva 700 rpm, *v*) 1 curva 950 rpm, *vi*) 1 curva 1200 rpm. No Anexo C, estão dispostos os dados brutos referentes as vazões do MUV e as vazões do tubo de Pitot.

$$R = \frac{Q_{MUV}}{Q_{Pitot}} \quad (22)$$

Onde,

$R$  Razão entre os valores médios das vazões (dados brutos)

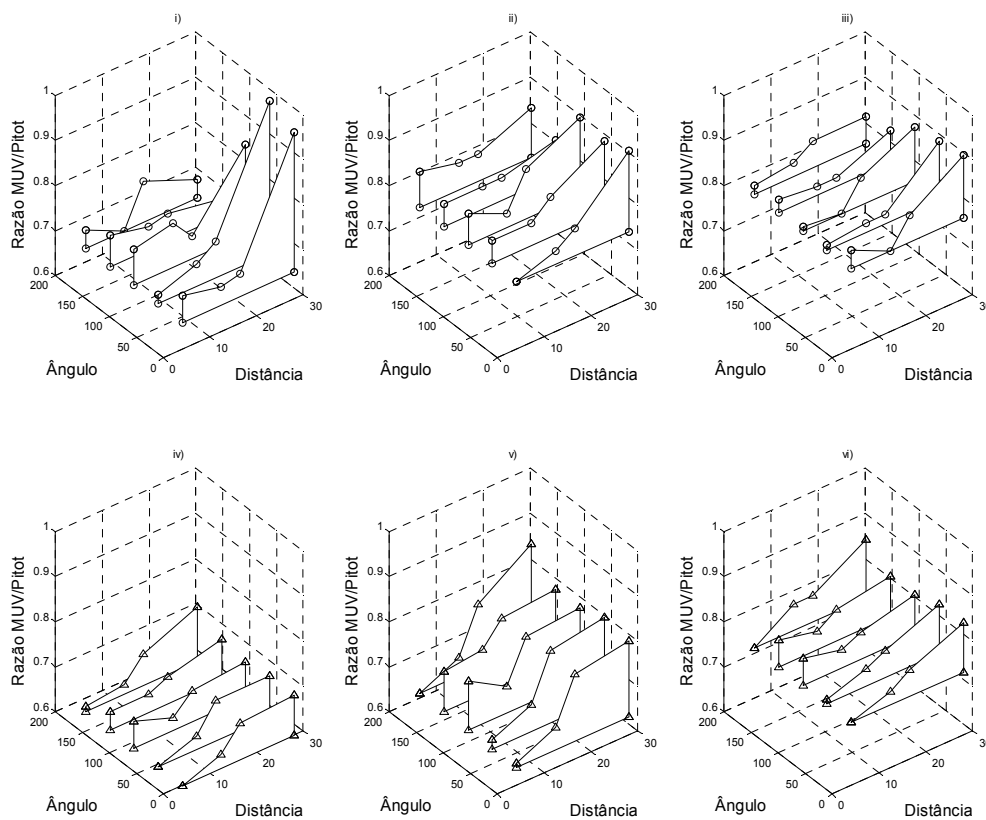


Figura 24. *i*) Tubo reto 700 rpm, *ii*) Tubo reto 950 rpm, *iii*) Tubo reto 1200 rpm, *iv*) 1 curva 700 rpm, *v*) 1 curva 950 rpm, *vi*) 1 curva 1200 rpm

### 4.3.2. Montagem em tubo Reto

Os dados referentes à análise da razão  $R$  em relação à configuração de montagem tubo reto, que deram origem a Fig. 24 *i-iii* estão ilustrados na Tab. 18.

Tabela 18. Razão MUV versus Pitot para a configuração de tubo reto

<b>700 rpm</b>	<b>Ângulo</b>	<b>4,1 D</b>	<b>12,4 D</b>	<b>16,5 D</b>	<b>28 D</b>
	<b>0°</b>	0,72	0,70	0,71	0,97
	<b>45°</b>	0,68	0,71	0,74	1,00
	<b>90°</b>	0,74	0,69	0,71	0,86
	<b>135°</b>	0,73	0,71	0,72	***
	<b>180°</b>	0,70	0,71	0,75	***
<b>950 rpm</b>	<b>Ângulo</b>	<b>4,1 D</b>	<b>12,4 D</b>	<b>16,5 D</b>	<b>28 D</b>
	<b>0°</b>	0,75	0,78	0,81	0,93
	<b>45°</b>	0,80	0,80	0,84	0,91
	<b>90°</b>	0,82	0,78	0,86	0,92
	<b>135°</b>	0,80	0,80	0,80	***
	<b>180°</b>	***	0,81	0,81	***
<b>1200 rpm</b>	<b>Ângulo</b>	<b>4,1 D</b>	<b>12,4 D</b>	<b>16,5 D</b>	<b>28 D</b>
	<b>0°</b>	0,82	0,84	0,84	0,92
	<b>45°</b>	0,79	0,80	0,83	0,91
	<b>90°</b>	0,80	0,84	0,83	0,90
	<b>135°</b>	0,81	0,80	0,81	***
	<b>180°</b>	0,80	0,84	0,84	***

\*\*\* – MUV a 135° e a 180° apresenta um efeito de variável não controlada, a qual não interferiu na dinâmica do tubo de Pitot, mas que levou o processo do MUV a medir de forma bastante diferente, quando estatisticamente analisado. Na configuração de montagem de tubo reto a 28D, 90° (700 rpm) é possível constatar que o valor da razão  $R$  (0,86) destoa das restantes razões para a mesma configuração de montagem, devido a presença de um transiente nas leituras de vazão do MUV. A tabela que faz menção a esse comportamento transiente pode ser visualizada no Anexo C na Tabela C3. Tubo reto 28D 90° em negrito.

A incerteza relativa de  $R$ , sendo  $\Delta R$  a incerteza absoluta, é facilmente obtida pela propagação das incertezas das medições nela envolvidas e pode ser expressa pela Eq.(30).

$$\frac{\Delta R}{R} = \left(\frac{\Delta_1}{Q_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_2}{Q_2}\right)^2 \quad (30)$$

Onde,

$\Delta R$  Incerteza absoluta

$Q_1$  Vazão medida pelo tubo de Pitot em m<sup>3</sup>/h

$Q_2$  Vazão medida pelo MUV em m<sup>3</sup>/h

O subscrito 1 se refere às medições do tubo de Pitot, e o subscrito 2 se refere às medições do MUV. Sendo as incertezas relativas das medições do Pitot e do MUV declaradas pela norma e pelo fabricante como 2% e 5% respectivamente, a incerteza da relação  $R$ , no mesmo nível de confiança das incertezas anteriores é segundo a Eq.(30), é 5,4%.

A Tab. 18 revela dois conjuntos de dados distintos em sua dinâmica, a saber, as medições relativas aos trechos retos 4,1D, 12,4D, 16,5D e as medições correspondentes ao trecho reto de 28D.

A partir da Tab. 18, pretende-se dar uma resposta estatisticamente adequada as seguintes perguntas:



1. Considerando o tubo de Pitot uma referência confiável, os resultados da razão  $R$  constantes nas tabelas permitem afirmar que o ângulo de rotação do MUV altera significativamente a sua medição?

2. Considerando o tubo de Pitot uma referência confiável, os resultados da razão  $R$  constantes nas tabelas permitem afirmar que o trecho reto entre o acidente de linha e o MUV altera significativamente a sua medição?

Para responder a primeira pergunta deve-se considerar a dispersão da razão  $R$  em cada distância. A Tab. 19 apresenta esta dispersão a partir da razão média. Nota-se que o máximo desvio relativo à respectiva média é bem inferior a própria incerteza da razão  $R$  consideradas as incertezas das medições do tubo de Pitot e do MUV, já descritas anteriormente. Portanto não se pode afirmar que as leituras do MUV tenham sido afetadas pelo ângulo de instalação dos transdutores, qualquer que seja, de modo estatisticamente relevante.

Tabela 19. Dispersão da razão  $R$  em cada trecho de medição variando apenas o ângulo na configuração de montagem tubo reto

Rotação	Ângulo	4.1 D	12,4 D	16,5D	28 D
700 rpm	0°	0,32%	-0,81%	-2,01%	2,62%
	45°	-4,49%	0,90%	1,52%	6,29%
	90°	3,13%	-2,02%	-2,04%	-8,91%
	135°	2,37%	0,55%	-0,87%	***
	180°	-1,32%	1,38%	3,40%	***
950 rpm	Ângulo	4.1 D	12,4 D	16,5D	28 D
	0°	-4,73%	-2,22%	-1,86%	0,73%
	45°	0,96%	1,20%	1,97%	-0,70%
	90°	3,07%	-1,77%	4,16%	-0,03%
	135°	0,70%	1,12%	-2,60%	***
	180°	***	1,67%	-1,67%	***
1200 rpm	Ângulo	4.1 D	12,4 D	16,5D	28 D
	0°	2,56%	-2,22%	2,42%	1,35%
	45°	-1,88%	1,20%	-2,70%	0,15%
	90°	-0,69%	-1,77%	1,61%	1,50%
	135°	0,59%	1,12%	-2,75%	***
	180°	-0,58%	1,67%	1,42%	***

A resposta para a segunda questão, exige um pouco de cautela. Deve-se notar que os valores de  $R$  para a distância 28D (Tab. 18) são muito distantes dos demais trechos. Por isto é razoável pressupor que estes dois conjuntos de dados operam com dinâmicas distintas. De fato, se analisarmos as razões  $R$ , para os trechos 4,1D, 12,4D e 16,5D e aplicarmos a mesma análise anterior, com base na Tab. 19, chegamos à mesma conclusão de que, nestes casos, o trecho reto não afetou significativamente a medição do MUV. No entanto, a razão  $R$  para 28D mostra que essa medição se desvia muito menos da medição do tubo de Pitot.

Se a medição do tubo de Pitot é a referência, isto mostra que a medição do MUV a 28D é mais exata que as demais medições. Não é possível tirar conclusões sobre uma possível linearidade da exatidão com o trecho reto, já que os três primeiros trechos mostraram variabilidade menor que a própria variabilidade esperada para a razão  $R$  a partir das incertezas de cada medidor.

#### 4.3.3. *Montagem com uma Curva*

Os dados referentes a análise da razão  $R$  em relação a configuração de montagem com uma curva, que deram origem as Figs. 24iv-vi estão ilustrados na Tab. 20.

Tabela 20: Razão  $R$  em relação a configuração de montagem 1 curva

Rotação	Ângulo	4.1 D	12,4 D	16,5D	28 D
700 rpm	0°	0,60	0,63	0,68	0,69
	45°	0,60	0,63	0,69	0,69
	90°	0,66	0,63	0,67	0,68
	135°	0,64	0,64	0,66	0,69
	180°	0,61	0,62	0,67	0,72
950 rpm	Ângulo	4.1 D	12,4 D	16,5D	28 D
	0°	0,65	0,69	0,79	0,81
	45°	0,66	0,70	0,80	0,82
	90°	0,75	0,70	0,79	0,80
	135°	0,73	***	0,79	0,80
	180°	0,64	0,68	0,78	***
1200 rpm	Ângulo	4.1 D	12,4 D	16,5D	28 D
	0°	0,74	0,77	0,80	0,85
	45°	0,75	0,78	0,80	0,85
	90°	0,80	0,78	0,80	0,83
	135°	***	0,78	0,81	0,83
	180°	0,74	0,80	0,80	0,87

Fazendo uma análise análoga a seção anterior, pode-se afirmar de acordo com a Tab. 20:

- I. Que o ângulo de instalação do MUV a 90° afeta significativamente a medição no trecho reto de 4,1D para todos os níveis de vazão.
- II. Para os demais trechos retos e ângulos não se pode fazer a mesma afirmação, já que a variabilidade da razão  $R$  fica abaixo daquela prevista pela propagação das incertezas dos medidores.
- III. É possível notar que a medição do MUV converge para a medição do tubo de Pitot quando o trecho reto aumenta. Ao contrário da situação anterior de tubo reto, isto pode ser visto mesmo para trechos retos até 16,5D. No

entanto, para uma mesma convergência, isto é, para uma mesma razão  $R$ , será necessário um maior trecho reto.

Na Tab. 21 estão ilustradas as dispersões da razão  $R$  em cada trecho de medição variando apenas o ângulo de emissão na configuração de 1 curva. Pode – se constatar que o MUV se mostra insensível ao ângulo de emissão dos transdutores na maioria dos casos. O trecho reto de 4,1D é a exceção, para todas as velocidades de rotação do rotor. Pode-se notar que, nestes casos a razão  $R$  a  $90^\circ$  extrapola o limite de 5% em relação à média, o que aponta que estes valores não podem ser justificados com base na incerteza do MUV. O fato de apenas o valor a  $90^\circ$  extrapolar a incerteza do medidor não significa que a sensibilidade ocorre apenas para este ângulo. Na verdade, pode-se concluir que, para o acidente de linha analisado, as medições do MUV são sensíveis ao ângulo de emissão, como aponta a posição  $90^\circ$ . No entanto, o efeito fora do plano de  $90^\circ$  fica ainda dentro do limite da incerteza do medidor, o que não permitiu que ele fosse distinguido dos efeitos aleatórios (relacionados à incerteza) durante o experimento.

Isso pode ser atribuído ao fato de que, no trecho reto de 4,1D (pior trecho), logo após o acidente de linha, o escoamento ainda esteja sujeito aos gradientes de pressões adversos gerados pela combinação dos efeitos inerciais e viscosos originários no acidente de linha (assimetrias), como também a presença de vórtices. Porém se mostram necessários estudos sobre o comportamento do perfil de velocidades na seção de medição, onde tais assimetrias no perfil de velocidades, simuladas por computação numérica, podem ser visualizadas na Fig. 25.

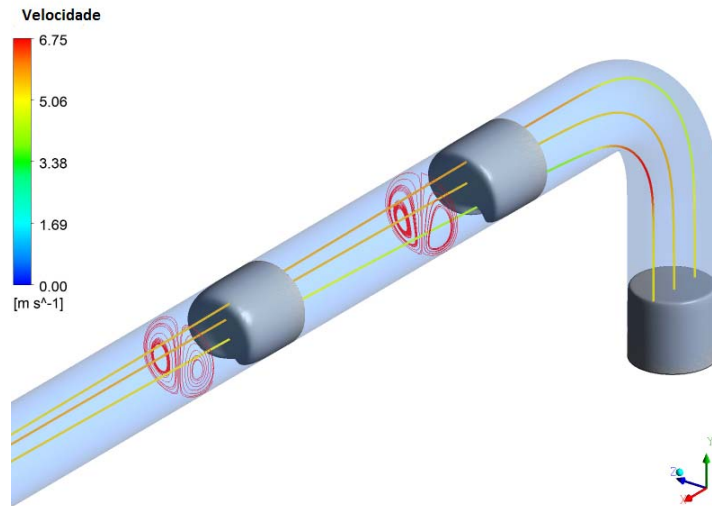


Figura 25. Assimetrias no perfil de velocidades logo após o acidente de linha [33]

Na Tab. 21, estão dispostos as dispersões da razão  $R$  em cada trecho de medição variando apenas o ângulo na configuração de 1 curva.

Tabela 21. Dispersão da razão  $R$  em cada trecho de medição variando apenas o ângulo na configuração de 1 curva

<b>Rotação</b>	<b>Ângulo</b>	<b>4.1 D</b>	<b>12,4 D</b>	<b>16,5D</b>	<b>28 D</b>
<b>700 rpm</b>	<b>0°</b>	-3,54%	0,00%	0,89%	-0,58%
	<b>45°</b>	-3,54%	0,00%	2,37%	-0,58%
	<b>90°</b>	6,11%	0,00%	-0,59%	-2,02%
	<b>135°</b>	2,89%	1,59%	-2,08%	-0,58%
	<b>180°</b>	-1,93%	-1,59%	-0,59%	3,75%
<b>950 rpm</b>	<b>Ângulo</b>	<b>4.1 D</b>	<b>12,4 D</b>	<b>16,5D</b>	<b>28 D</b>
	<b>0°</b>	-5,25%	-0,36%	0,00%	0,31%
	<b>45°</b>	-3,79%	1,08%	1,27%	1,55%
	<b>90°</b>	9,33%	1,08%	0,00%	-0,93%
	<b>135°</b>	6,41%	***	0,00%	-0,93%
	<b>180°</b>	-6,71%	-1,81%	-1,27%	***
<b>1200 rpm</b>	<b>Ângulo</b>	<b>4.1 D</b>	<b>12,4 D</b>	<b>16,5D</b>	<b>28 D</b>
	<b>0°</b>	-2,31%	-1,53%	-0,25%	0,47%
	<b>45°</b>	-0,99%	-0,26%	-0,25%	0,47%
	<b>90°</b>	5,61%	-0,26%	-0,25%	-1,89%
	<b>135°</b>	***	-0,26%	1,00%	-1,89%
	<b>180°</b>	-2,31%	2,30%	-0,25%	2,84%

#### 4.4. Correção das leituras de vazão do MUV

Fatores como escoamentos pulsantes, escoamentos não homogêneos e as assimetrias no perfil de velocidades, são características não controladas do processo que têm influência direta na precisão da medição de vazão. Na tecnologia ultrassônica, o perfil de velocidades pode ser afetado por diferentes fontes, tais como, escoamentos perturbados *apdu* MARTINS R.S. [37, 48], propriedades não-newtonianas, qualidade dos transdutores, rugosidade interna da parede e o regime do escoamento. Sendo assim, nessa seção são propostas metodologias de correção para as leituras de vazão do MUV com base em um medidor de referência.

##### 4.4.1. Fator $k$

Como comentado na seção 3.3.4, o fator de perfil  $k$  é definido pela AGA 9 (2007) [14], Eq. (15), ou estimado por outras equações proprietárias, como na equação Eq. (16). Porém em ambos os casos, a contribuição das componentes tridimensionais da velocidade  $\vec{v}(x, y, z, t)$  necessárias para se especificar o campo de velocidades são negligenciadas, pois presume-se que o escoamento é unidimensional. Uma vez que os efeitos da instalação são definidos e a presença de velocidades tangenciais são considerados, é importante avaliar o comportamento de fatores de correção sob condições de escoamento perturbado, levando em conta todas as componentes tridimensionais da velocidade. Essa análise foi abordada por Martins (2011) [33], que propôs uma metodologia de correção,  $k_{pert}$  ( $k$  perturbado) simulado numericamente utilizando *softwares* da ANSYS, em que foram computados os efeitos das componentes tridimensionais da

velocidade no cálculo da velocidade média do pulso ultrassônico ao longo do caminho acústico. Na Tab. 22a-d estão representadas as diferenças entre a vazão do MUV medida e a vazão do MUV corrigida quando comparadas com o medidor de referência na configuração de montagem de 1 curva. Sendo assim as Eq. (31, 32) demonstram uma proposta de correção nos casos onde o perfil de velocidades se apresenta não-conforme.

$$\Delta k = \frac{k_{pert}}{k_{cd}} \quad (31)$$

$$Q_{corrigida} = Q_{MUV} * \Delta k \quad (32)$$

Onde,

$Q_{corrigida}$  Vazão do MUV corrigida

$Q_{MUV}$  Vazão média do MUV em cada configuração de montagem

$\Delta k$  Razão entre o fator  $k_{pert}$  (assimétrico) [Ramon] e o fator  $k_{cd}$  do escoamento completamente desenvolvido, Eq.(17), lembrando que  $k_{cd} = k_{prop}$ .

Tabela 22. a) 4,1D 1 curva, b) 12,4D 1 curva, c) 16,5D 1 curva, d) 28D 1 curva

a)

4,1D					
Rotação	Ângulo	$R Q_{MUV}/Q_{Pitot}$	Dif 1 (%)	$R Q_{cor}/Q_{Pitot}$	Dif 2 (%)
700 rpm	0	0,56	-78,08	0,57	-76,23
	45	0,57	-76,48	0,55	-82,23
	90	0,61	-63,61	0,59	-69,40
	135	0,61	-64,48	0,61	-65,14
	180	0,57	-73,97	0,62	-60,65
950 rpm	0	0,60	-65,90	0,60	-65,49
	45	0,62	-62,23	0,60	-66,84
	90	0,68	-47,34	0,65	-53,12
	135	0,69	-45,93	0,68	-46,34
	180	0,60	-66,34	0,65	-53,18
1200 rpm	0	0,70	-43,68	0,69	-43,92
	45	0,71	-40,65	0,70	-43,82
	90	0,75	-33,34	0,72	-39,52
	135	0,74	-36,05	0,73	-37,02
	180	0,69	-45,04	0,75	-33,40

b)

12,4D					
Rotação	Ângulo	$R Q_{MUV}/Q_{Pitot}$	Dif 1 (%)	$R Q_{cor}/Q_{Pitot}$	Dif 2 (%)
700 rpm	0	0,59	-70,82	0,57	-67,80
	45	0,59	-70,64	0,55	-73,62
	90	0,58	-72,68	0,59	-75,07
	135	0,59	-69,88	0,61	-69,47
	180	0,58	-72,86	0,62	-63,28
950 rpm	0	0,63	-57,83	0,60	-54,44
	45	0,64	-57,02	0,60	-59,33
	90	0,63	-59,17	0,65	-60,46
	135	0,67	-48,35	0,68	-47,32
	180	0,62	-61,80	0,65	-51,21
1200 rpm	0	0,72	-39,66	0,69	-36,15
	45	0,72	-38,68	0,70	-40,40
	90	0,72	-39,24	0,72	-40,28
	135	0,72	-38,94	0,73	-37,77
	180	0,70	-42,41	0,75	-32,05



c)

16,5D					
Rotação	Ângulo	R $Q_{MUV}/Q_{Pitot}$	Dif 1 (%)	R $Q_{cor}/Q_{Pitot}$	Dif 2 (%)
700 rpm	0	0,60	-65,40	0,61	-64,73
	45	0,62	-60,94	0,60	-66,49
	90	0,63	-59,25	0,60	-65,48
	135	0,63	-59,77	0,61	-64,12
	180	0,63	-59,29	0,64	-55,66
950 rpm	0	0,71	-40,66	0,72	-39,67
	45	0,72	-38,52	0,70	-42,68
	90	0,73	-37,32	0,70	-42,11
	135	0,72	-38,79	0,70	-42,05
	180	0,72	-39,31	0,74	-35,28
1200 rpm	0	0,73	-36,17	0,74	-34,97
	45	0,74	-36,01	0,71	-40,12
	90	0,75	-33,03	0,73	-37,50
	135	0,74	-34,38	0,73	-36,80
	180	0,75	-32,81	0,77	-29,06

d)

28D					
Rotação	Ângulo	R $Q_{MUV}/Q_{Pitot}$	Dif 1 (%)	R $Q_{cor}/Q_{Pitot}$	Dif 2 (%)
700 rpm	0	0,64	-56,02	0,63	-58,42
	45	0,63	-58,13	0,61	-64,18
	90	0,63	-58,49	0,61	-65,21
	135	0,64	-57,12	0,62	-62,45
	180	0,62	-60,38	0,62	-62,21
950 rpm	0	0,74	-35,81	0,73	-37,14
	45	0,74	-34,44	0,71	-39,91
	90	0,72	-39,81	0,69	-45,44
	135	0,72	-38,33	0,70	-42,98
	180	0,74	-35,47	0,73	-36,10
1200 rpm	0	0,76	-31,21	0,75	-32,45
	45	0,77	-30,71	0,74	-35,78
	90	0,75	-33,08	0,72	-38,80
	135	0,75	-33,38	0,73	-37,57
	180	0,74	-34,34	0,74	-34,83

Onde,

**Dif 1 (%)** – corresponde a diferença percentual entre as leituras do MUV e o medidor de referência;

**Dif 2 (%)** – corresponde a diferença percentual entre as leituras corrigidas do MUV e o medidor de referência com o novo  $\Delta k$ ;

A análise das Tabs. 22a-d mostra que a proposta de manipulação das leituras de um medidor ultrassônico de um canal acústico, através do fator de perfil  $k$  não se mostra suficiente para se perceber uma correção da vazão em relação às leituras de um tubo de Pitot, ao menos considerando as incertezas inerentes aos próprios processos de medição.

Essa observação não invalida as propostas de estimativas do fator  $k$  por simulação numérica. Apenas indica que esses modelos devem ser evoluídos de forma a prever melhor os fenômenos hidrodinâmicos envolvidos, assim como a instrumentação deve ser mais adequada para capturar detalhes mais íntimos desses fenômenos.

#### 4.4.2. Correção de zeros e de ganhos

Uma outra abordagem para a correção das leituras de vazão do MUV é a correção de zero e de ganho (também conhecido como ajuste de zero e *spam*) desde que exista um medidor de referência. Nesse trabalho, o medidor de referência utilizado, como já descrito, é o tubo de Pitot. Este é um procedimento muito comum na calibração de certos equipamentos, quando o medidor calibrador, por seu princípio de funcionamento, permite que sua leitura seja ajustada.

Suponhamos que as leituras de ambos os medidores ajustem bem uma reta, conforme a equação seguinte:

$$y = ax + b \quad (33)$$

Onde,

$x$  Medida da referência

$y$  Medida do medidor a ser calibrado

É claro que, se  $a=1$  e  $b=0$ , não haveria necessidade de calibrar o medidor. Caso contrário, é necessário encontrar uma correção para as medidas do medidor a ser calibrado que se ajuste à equação, com  $a=1$  e  $b=1$ . Como a nova equação a envolver, as medidas corrigidas precisam, também, ser descritas por uma reta, seja esta reta representada por:

$$y_c = cg * y + cz \quad (34)$$

Onde,

$y_c$  Medida corrigida

$cg$  Correção de ganho

$cz$  Correção de zero

Substituindo a equação Eq.(33) na Eq.(34), obtém-se que,

$$y_c = cg * (ax + b) + cz \quad (35)$$

Então deseja-se que,

$$cg * a = 1 \text{ e}$$

$$cg * b + cz = 0$$

Resultando em,

$$Q_{cor} = \frac{Q_{MUV} - b}{a} \quad (36)$$

Onde,

$Q_{cor}$  Vazão corrigida

$Q_{MUV}$  Vazão média do MUV em cada configuração de montagem

$b$  Coeficiente linear da reta

$a$  Coeficiente angular da reta

Vale salientar que na medição de vazão, caso fosse possível obter exatidão perfeita e precisão infinita, as metodologias de correção se tornariam desnecessárias, visto que as leituras da vazão seriam totalmente representativas do processo. Porém devido a fatores já comentados, essa quantificação fidedigna se mostra ainda uma condição idealizada. Sendo assim, os medidores de vazão, que na verdade são medidores da velocidade do escoamento, possuem incertezas que nos possibilitam quantificar a vazão dentro de limites aceitáveis por órgãos regulamentadores. A incerteza na inclinação da correção, que determina se os

valores das leituras de vazão estão dentro das incertezas relativas de cada medidor, é dada pela dedução da Eq.(37).

$$\Delta R^2 = \left( \frac{\partial_R}{\partial_{FGM}} \Delta_{FGM} \right)^2 + \left( \frac{\partial_R}{\partial_{Pitot}} \Delta_{Pitot} \right)^2 \quad (37)$$

Onde,

$\Delta R$  Corresponde à incerteza absoluta da medição

$\left( \frac{\partial_R}{\partial_{FGM}} \Delta_{FGM} \right)^2$  Corresponde à incerteza da razão  $R$  em relação ao MUV

$\left( \frac{\partial_R}{\partial_{Pitot}} \Delta_{Pitot} \right)^2$  Corresponde à incerteza da razão  $R$  em relação ao tubo de Pitot

Dividindo a incerteza absoluta  $\Delta R$ , pela razão  $R$ , é possível obter a incerteza na inclinação  $\lambda$ , de acordo com a Eq.(38):

$$\left( \frac{\Delta R}{R} \right)^2 = \left( \frac{\Delta_{FGM}}{FGM} \right)^2 + \left( \frac{\Delta_{Pitot}}{Pitot} \right)^2 \quad (38)$$

$$\frac{\Delta R}{R} = \sqrt{\left( \frac{\Delta_{FGM}}{FGM} \right)^2 + \left( \frac{\Delta_{Pitot}}{Pitot} \right)^2} \quad (39)$$

$$\lambda = 1 \pm \frac{\Delta R}{R} \quad (40)$$

Onde,

$$\left(\frac{\Delta_{FGM}}{FGM}\right)^2 \text{ Incerteza relativa da medição do MUV, 5\%}$$

$$\left(\frac{\Delta_{Pitot}}{Pitot}\right)^2 \text{ Incerteza relativa da medição do tubo de Pitot, 2\%}$$

A partir da premissa de que a incerteza do MUV é a incerteza dominante, os limites máximos e mínimos da inclinação são determinados de acordo com as Eqs. (41,42), conforme pode ser visto na Fig. 26.

$$\lambda_{\max} = \beta * \left(1 + \frac{\Delta R}{R}\right) \quad (41)$$

$$\lambda_{\min} = \beta * \left(1 - \frac{\Delta R}{R}\right) \quad (42)$$

Onde,

$\lambda_{\max}$  Incerteza máxima da inclinação

$\lambda_{\min}$  Incerteza mínima da inclinação

$\beta$  Leitura corrigida do medidor a ser calibrado

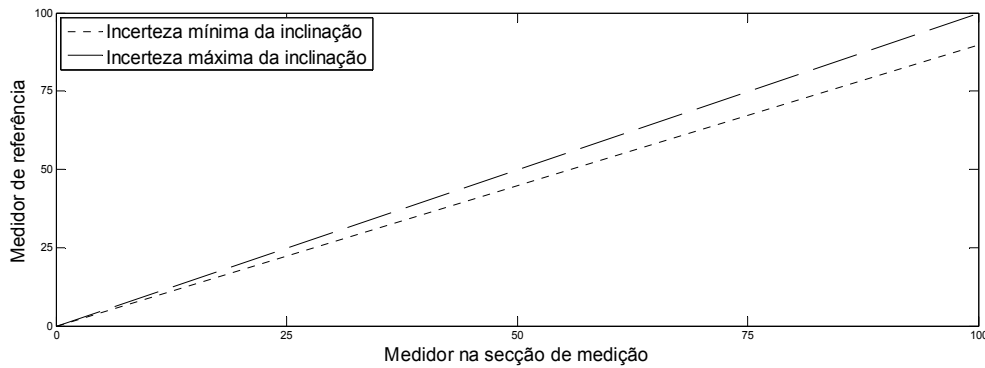


Figura 26. Limites de inclinação dados pelas incertezas relativas de medição do MUV e do tubo de Pitot

A Fig. 27 mostra a correção de zero e de ganho aplicado na configuração de montagem 1 curva no trecho reto de 4,1D a 45° e no Anexo D, estão ilustradas as correções de zero e de ganho efetuadas no restante das configuração de montagem 1 curva. Os dados que deram origem as figuras que abordam a correção de zero e de ganho no Anexo D, estão representados na Tab. 23a-d, onde podem ser visualizadas as leituras de vazão do MUV, as leituras corrigidas com base no medidor de referência, tubo de Pitot e as suas respectivas diferenças percentuais, na configuração de montagem de 1 curva a 28,8D, 16,5D, 12,4D e 4,1D.

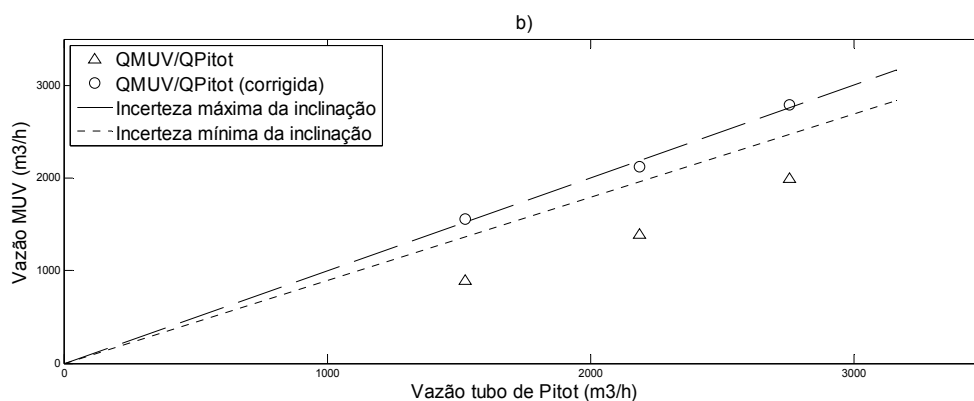


Figura 27. Correção de zero e de ganho aplicado na configuração de montagem 1 curva no trecho reto de 4,1D a 45°

Tabela 23. Comparação entre  $Q_{MUV}$ ,  $Q_{corr}$  e  $Q_{pitot}$ . a) 4,1D, b) 12,4D, c) 16,5 D, d) 28D

a)

4,1D 0°					
Rotação	Pitot (m³/h)	MUV (m³/h)	Dif 1 (%)	MUV Corrigido (m³/h)	Dif 2 (%)
700	1381,29	987,17	-39,92	1376,42	-0,35
950	1999,93	1614,94	-23,84	2010,92	0,55
1200	2510,03	2102,96	-19,36	2504,16	-0,23
4,1D 45°					
Rotação	Pitot (m³/h)	MUV (m³/h)	Dif 1 (%)	MUV Corrigido (m³/h)	Dif 2 (%)
700	1334,8	986,81	-35,26	1311,49	-1,78
950	1966,82	1648,83	-19,29	2016,44	2,46
1200	2531,43	2108	-20,09	2505,39	-1,04
4,1D 90°					
Rotação	Pitot (m³/h)	MUV (m³/h)	Dif 1 (%)	MUV Corrigido (m³/h)	Dif 2 (%)
700	1304,23	930,41	-40,18	1267,09	-2,93
950	1936,67	1661,66	-16,55	2019,79	4,12
1200	2445,44	2030,3	-20,45	2399,25	-1,93
4,1D 135°					
Rotação	Pitot (m³/h)	MUV (m³/h)	Dif 1 (%)	MUV Corrigido (m³/h)	Dif 2 (%)
700	1288,12	958,6	-34,38	1258,82	-2,33
950	1930,15	1611,07	-19,81	1993,09	3,16
1200	2487,19	2020,09	-23,12	2453,39	-1,38
4,1D 180°					
Rotação	Pitot (m³/h)	MUV (m³/h)	Dif 1 (%)	MUV Corrigido (m³/h)	Dif 2 (%)
700	1381,29	969,91	-42,41	1387,3	0,43
950	1999,93	1561,58	-28,07	1986,4	-0,68
1200	2510,03	2085,88	-20,33	2517,29	0,29



b)

<b>12,4D 0°</b>					
<b>Rotação</b>	<b>Pitot (m³/h)</b>	<b>MUV (m³/h)</b>	<b>Dif 1 (%)</b>	<b>MUV Corrigido (m³/h)</b>	<b>Dif 2 (%)</b>
<b>700</b>	1381,29	987,17	-39,92	1376,42	-0,35
<b>950</b>	1999,93	1614,94	-23,84	2010,92	0,55
<b>1200</b>	2510,03	2102,96	-19,36	2504,16	-0,23
<b>12,4D 45°</b>					
<b>Rotação</b>	<b>Pitot (m³/h)</b>	<b>MUV (m³/h)</b>	<b>Dif 1 (%)</b>	<b>MUV Corrigido (m³/h)</b>	<b>Dif 2 (%)</b>
<b>700</b>	1334,8	986,81	-35,26	1311,49	-1,78
<b>950</b>	1966,82	1648,83	-19,29	2016,44	2,46
<b>1200</b>	2531,43	2108	-20,09	2505,39	-1,04
<b>12,4D 90°</b>					
<b>Rotação</b>	<b>Pitot (m³/h)</b>	<b>MUV (m³/h)</b>	<b>Dif 1 (%)</b>	<b>MUV Corrigido (m³/h)</b>	<b>Dif 2 (%)</b>
<b>700</b>	1304,23	930,41	-40,18	1267,09	-2,93
<b>950</b>	1936,67	1661,66	-16,55	2019,79	4,12
<b>1200</b>	2445,44	2030,3	-20,45	2399,25	-1,93
<b>12,4D 135°</b>					
<b>Rotação</b>	<b>Pitot (m³/h)</b>	<b>MUV (m³/h)</b>	<b>Dif 1 (%)</b>	<b>MUV Corrigido (m³/h)</b>	<b>Dif 2 (%)</b>
<b>700</b>	1288,12	958,6	-34,38	1258,82	-2,33
<b>950</b>	1930,15	1611,07	-19,81	1993,09	3,16
<b>1200</b>	2487,19	2020,09	-23,12	2453,39	-1,38
<b>12,4D 180°</b>					
<b>Rotação</b>	<b>Pitot (m³/h)</b>	<b>MUV (m³/h)</b>	<b>Dif 1 (%)</b>	<b>MUV Corrigido (m³/h)</b>	<b>Dif 2 (%)</b>
<b>700</b>	1381,29	969,91	-42,41	1387,3	0,43
<b>950</b>	1999,93	1561,58	-28,07	1986,4	-0,68
<b>1200</b>	2510,03	2085,88	-20,33	2517,29	0,29

c)

<b>16,5D 0°</b>					
<b>Rotação</b>	<b>Pitot (m³/h)</b>	<b>MUV (m³/h)</b>	<b>Dif 1 (%)</b>	<b>MUV Corrigido (m³/h)</b>	<b>Dif 2 (%)</b>
<b>700</b>	1381,29	987,17	-39,92	1376,42	-0,35
<b>950</b>	1999,93	1614,94	-23,84	2010,92	0,55
<b>1200</b>	2510,03	2102,96	-19,36	2504,16	-0,23
<b>16,5D 45°</b>					
<b>Rotação</b>	<b>Pitot (m³/h)</b>	<b>MUV (m³/h)</b>	<b>Dif 1 (%)</b>	<b>MUV Corrigido (m³/h)</b>	<b>Dif 2 (%)</b>
<b>700</b>	1334,8	986,81	-35,26	1311,49	-1,78
<b>950</b>	1966,82	1648,83	-19,29	2016,44	2,46
<b>1200</b>	2531,43	2108	-20,09	2505,39	-1,04
<b>16,5D 90°</b>					
<b>Rotação</b>	<b>Pitot (m³/h)</b>	<b>MUV (m³/h)</b>	<b>Dif 1 (%)</b>	<b>MUV Corrigido (m³/h)</b>	<b>Dif 2 (%)</b>
<b>700</b>	1304,23	930,41	-40,18	1267,09	-2,93
<b>950</b>	1936,67	1661,66	-16,55	2019,79	4,12
<b>1200</b>	2445,44	2030,3	-20,45	2399,25	-1,93
<b>16,5D 135°</b>					
<b>Rotação</b>	<b>Pitot (m³/h)</b>	<b>MUV (m³/h)</b>	<b>Dif 1 (%)</b>	<b>MUV Corrigido (m³/h)</b>	<b>Dif 2 (%)</b>
<b>700</b>	1288,12	958,6	-34,38	1258,82	-2,33
<b>950</b>	1930,15	1611,07	-19,81	1993,09	3,16
<b>1200</b>	2487,19	2020,09	-23,12	2453,39	-1,38
<b>16,5D 180°</b>					
<b>Rotação</b>	<b>Pitot (m³/h)</b>	<b>MUV (m³/h)</b>	<b>Dif 1 (%)</b>	<b>MUV Corrigido (m³/h)</b>	<b>Dif 2 (%)</b>
<b>700</b>	1381,29	969,91	-42,41	1387,3	0,43
<b>950</b>	1999,93	1561,58	-28,07	1986,4	-0,68
<b>1200</b>	2510,03	2085,88	-20,33	2517,29	0,29

d)

28D 0°					
Rotação	Pitot (m³/h)	MUV (m³/h)	Dif 1 (%)	MUV Corrigido (m³/h)	Dif 2 (%)
700	1381,29	987,17	-39,92	1376,42	-0,35
950	1999,93	1614,94	-23,84	2010,92	0,55
1200	2510,03	2102,96	-19,36	2504,16	-0,23
28D 45°					
Rotação	Pitot (m³/h)	MUV (m³/h)	Dif 1 (%)	MUV Corrigido (m³/h)	Dif 2 (%)
700	1334,8	986,81	-35,26	1311,49	-1,78
950	1966,82	1648,83	-19,29	2016,44	2,46
1200	2531,43	2108	-20,09	2505,39	-1,04
28D 90°					
Rotação	Pitot (m³/h)	MUV (m³/h)	Dif 1 (%)	MUV Corrigido (m³/h)	Dif 2 (%)
700	1304,23	930,41	-40,18	1267,09	-2,93
950	1936,67	1661,66	-16,55	2019,79	4,12
1200	2445,44	2030,3	-20,45	2399,25	-1,93
28D 135°					
Rotação	Pitot (m³/h)	MUV (m³/h)	Dif 1 (%)	MUV Corrigido (m³/h)	Dif 2 (%)
700	1288,12	958,6	-34,38	1258,82	-2,33
950	1930,15	1611,07	-19,81	1993,09	3,16
1200	2487,19	2020,09	-23,12	2453,39	-1,38
28D 180°					
Rotação	Pitot (m³/h)	MUV (m³/h)	Dif 1 (%)	MUV Corrigido (m³/h)	Dif 2 (%)
700	1381,29	969,91	-42,41	1387,3	0,43
950	1999,93	1561,58	-28,07	1986,4	-0,68
1200	2510,03	2085,88	-20,33	2517,29	0,29

Analisando a Tab. 23a-d conclui-se que, apesar de ser necessário o uso de um medidor de referência, nas várias configurações de montagem, ângulo e trecho reto, a correção de zero e de ganho baseado em uma referência confiável, seja mais significativa que a correção pelo fator  $k$  simulado numericamente, conforme mostram as Tabs.23a-d.

Esse importante resultado pode ser atribuído ao fato de que, em simulações numéricas, várias perturbações no processo não foram fielmente reproduzidas, assim como também, do ponto de vista experimental, a faixa de sensibilidade da instrumentação não é capaz de detectar uma série de fenômenos de interesse de Mecânica dos Fluidos, mas que estão no escopo da incerteza aceita pelas legislações abordadas.

Também há o fato sobre o próprio modelo numérico adotado na simulação do fator  $k$ , que pode não ter reproduzido todos os fenômenos observados devido às suas próprias premissas, hipóteses simplificadoras e modelos de turbulência.

## 5. CONCLUSÕES

### 5.1. *Questões operacionais*

Vale considerar que o fluxo de ar gerado pelo soprador tem uma característica inerente de escoamento pulsante, gerada devido ao movimento das pás do soprador, fazendo com que esse escoamento não seja ideal para medições precisas. Com o intuito de amenizar esse problema, a instalação de retificadores de fluxo e *plenum* são utilizadas para amenizar os efeitos do fluxo pulsante de ar.

Em outros casos, utilizam-se difusores ou bocais no túnel com o objetivo de uniformizar o perfil de velocidades e, assim, obter um desenvolvimento do perfil de velocidades objetivando reduzir a necessidade de grandes trechos retos, pois na sucção caso não houver um controle das linhas de corrente do escoamento (uso de bocal), as regiões de baixa pressão dão origem a vórtices.

Outros fatores podem influenciar o escoamento em um túnel de vento. Para o caso de medição de vazão, por exemplo, o próprio medidor altera o escoamento se for intrusivo, gerando turbulências e perdas de carga, como também a presença de curvas, válvulas, joelhos e flanges, os chamados acidentes de linha.

Foi observado também, que devido ao fato do inversor de frequência, responsável pelo controle da velocidade do soprador introduz ruídos harmônicos na rede, por possuir dispositivos semicondutores na sua construção. O sistema mecânico de acionamento (motor + inversor de frequência) é visto pela fonte de alimentação como uma carga não-linear, cuja corrente possui harmônicas

(componentes de frequências múltiplas da frequência da rede). Os harmônicos presentes elevarão as perdas elétricas, que reduzirão o rendimento e acarretarão aumento também da temperatura do motor, reduzindo ainda mais seu rendimento. A evolução dos semicondutores de potência tem levado à criação de chaves eletrônicas mais eficientes, porém, mais rápidas. As elevadas frequências de chaveamento das chaves eletrônicas empregadas nos inversores atuais (comumente transistores IGBT) acarretam algumas consequências indesejáveis, tais como o aumento de emissão eletromagnética e a provável incidência de picos de tensão, bem como elevados valores de  $dV/dt$  (taxa de variação da tensão no tempo), nos terminais dos motores alimentados por inversores [49].

A Figura 28a-b mostra uma análise da fonte de alimentação do transmissor de pressão antes e depois do inversor ser ligado. Esses ruídos na rede também introduzem efeitos que afetam a medição de vazão por aparelhos ligados na mesma rede.

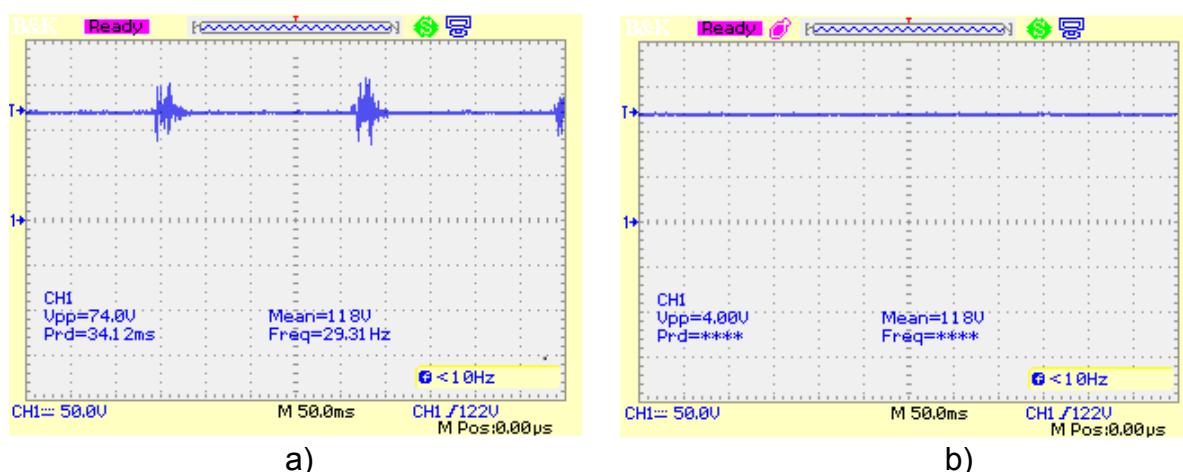


Figura 28. a) Ruído proveniente do inversor de frequência ligado, b) Saída de tensão da fonte do transmissor de pressão sem o inversor de frequência

Para solucionar esses problemas propõe-se o uso de reatâncias de rede, ou filtros, no intuito de reduzir os ruídos que contaminam os instrumentos de medição entre outros equipamentos eletrônicos. A Tab.24 mostra duas medidas distintas A e B. Na medida A ligou-se o transmissor de pressão simultaneamente com o inversor de frequência, sem que fosse aplicado um diferencial de. É possível verificar o efeito dos ruídos no zero vivo do instrumento. Na medida B, manteve-se a mesma premissa da medida A, porém com o inversor de frequência desligado.

Tabela 24. Efeitos da instalação elétrica na medição de vazão

	A	B
	4,09	4,01
	4,3	4,02
<b>mA</b>	3,93	4
	3,5	3,96
	4,1	4.05
<b>Média</b>	3,984	3,9975
<b>D. Padrão</b>	0,300716	0,022776

mA – miliampère (Leituras de corrente do transmissor de pressão)

## 5.2. *Medição de vazão*

Devido ao fato de que, a incerteza dominante dos MUV comerciais são da ordem de 5%, e as incertezas das simulações numéricas do fator  $k$  serem menores, é necessário realizar testes e novos estudos no túnel de vento, no intuito de propor fatores de correção que englobem as incertezas dominantes dos MUV.

## 6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Os testes realizados no túnel de vento, com base nos resultados obtidos, demonstram a necessidade de melhorias no controle de rotação do soprador, tais como melhorias na rede elétrica, uso de técnicas de controle de velocidade em malha fechada. É necessário também o uso de resistores de frenagem (frenagem reostática) no inversor de frequência, pois, o motor de indução utilizado nesse processo exige desacelerações e acelerações rápidas, no caso de controle em malha fechada. Durante a desaceleração a frequência do rotor é superior a frequência do estator, acarretando em um fluxo reverso de energia orientado do rotor para o estator. Nessa condição, o motor se comporta como um gerador de energia, dissipando assim essa energia no barramento *DC (direct current)* do inversor dando origem a sobretensões e erros no equipamento.

É necessário também repetir a matriz de testes, porém em situações mais controladas, para avaliar o efeito de acidentes de linha, como também os efeitos da instalação, qualidade da rede elétrica e outras perturbações (oscilações de velocidade e torque) na medição de vazão ultrassônica, e propor novas metodologias de correção onde o perfil de velocidades se apresentar não conforme.



## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ANP/INMETRO, *Portaria Conjunta ANP/INMETRO Nº1*. 2000, DOU - Diário Oficial da União
- [2] Jeff Gibson, TUV NEL Report 2008/301 Installation effects on a flare gas ultrasonic meter (Draft)
- [3] Salgado, A.L, Ramos, R., *Perfect Gas Approach Validation Aiming Estimation Of Thermophysical Properties In Flare Flows Considering Operational Data*, Proceedings of 20th. International Congress of Mechanical Engineering – COBEM 2009, Brazil, 2009.
- [4] Ruppel, C. e Peters, F., *Effects of upstream installations on the reading of an ultrasonic flowmeter*. Flow Measurement and Instrumentation, 2004. **15**(3): p. 167-177.
- [5] Mickan, B., *et al.*, *Systematic investigation of flow profiles in pipes and their effects on gas meter behaviour*. Measurement, 1997. **22**(1-2): p. 1-14.
- [6] J. Berrebi, *Self-Diagnosis Techniques and Their Applications to Error Reduction for Ultrasonic Flow Measurement*. PhD thesis Luleå University of Technology 2004.
- [7] RTM-64: Regulamento técnico metrológico referente à medição dinâmica de petróleo, derivados líquidos e álcool. INMETRO, 2003.
- [8] RTM-001/2000: Regulamento técnico metrológico de petróleo e gás natural. ANP/INMETRO, 2000.
- [9] K. Mylvaganam, “High-Rangeability Ultrasonic Gas Flowmeter for Monitoring Flare Gas,” IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectric and Frequency Control, vol. 36, no. 2, pp. 144 – 149, 1989.

[10] BRASSIER, P. Débitmétrie par technique ultrasonore en milieu gazeux industriel. 2000. Tese (Doutorado) – École Doctorale de Sciences Physiques e de L'Ingenieur, L'Université Bordeaux I, Bordeaux., 2000.

[11] YODER, J. Ultrasonic flow meters in the energy measurement spotlight. Pipeline & Gas Journal, 2009.

[12] SAKARIASSEN, R.; SDUN, W.; VULOVIC, F.; VIETH, D. Long term comparison of an ultrasonic meter and a turbine meter with an orifice meter at EMS test loop. Proceedings of NORTH SEA FLOW MEASUREMENT WORKSHOP, 18., St. Andrews, 2000.

[13] GRIMLEY, T. A. Ultrasonic meter installation configuration testing. Proceedings of AGA 2000 OPERATIONS CONFERENCE, Denver, 2000.

[14] AGA, *Measurement of gas by multipath ultrasonic meters*. Report No. 9, American Gas Association, 2007, Washington, DC, USA.

[15] Ruppel, C. e Peters, F., *Effects of upstream installations on the reading of an ultrasonic flowmeter*. Flow Measurement and Instrumentation, 2004. **15**(3): p. 167-177.

[16] Mickan, B., *et al.*, *Systematic investigation of flow profiles in pipes and their effects on gas meter behaviour*. Measurement, 1997. **22**(1-2): p. 1-14.

[17] Hilgenstock, A. e Ernst, R., *Analysis of installation effects by means of computational fluid dynamics--CFD vs experiments*, Flow Measurement and Instrumentation, 1996. **7**(3-4): p. 161-171.

[18] Moore, P.I., Brown, G.J. e Stimpson, B.P., *Ultrasonic transit-time flowmeters modelled with theoretical velocity profiles: methodology*. Measurement Science and Technology, 2000. **11**(12): p. 1802-1811.

- [19] Holm, M., Stang, J. e Delsing, J., *Simulation of flow meter calibration factors for various installation effects*. Measurement, 1995. **15**(4): p. 235-244.
- [20] INTERNATIONAL STANDARD ORGANISATION. Measurement of fluid flow in closed conduits - methods using transit-time ultrasonic meters, BSI ISO/TR 12765, 1998.
- [21] BRITISH STANDARDS INSTITUTE. Guide to the selection, installation, operation and calibration of diagonal path transit time ultrasonic flowmeters for industrial gas applications, BS 7965 2008.
- [22] Hydrocarbon Management Committee. Determination of flare quantities from upstream oil and gas facilities, HM58, Energy Institute, London, May 2008.
- [23] E. von Lavante, J. Yao, Numerical investigation of turbulent swirling flows in axisymmetric internal flow configurations, University of Duisburg-Essen, Faculty of Engineering, Lotharstr. 1-21, D 47057 Duisburg, Germany.
- [24] Yong Chen, Yiyong Huang, Xiaoqian Chen, *Acoustic propagation in viscous fluid with uniform flow and a novel design methodology for ultrasonic flow meter*, Institute of Space Technology, College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, 410073 Changsha, China.
- [25] Dandan Zheng, Pengyong Zhang, Tao Zhang, Dan Zhao, A method based on a novel flow pattern model for the flow adaptability study of ultrasonic flowmeter, Tianjin Key Laboratory of Process Measurement and Control, School of Electrical Engineering & Automation, Tianjin University, Tianjin 300072, China.
- [26] Bruno Rebello, Felipe Caroni, "*CARACTERIZAÇÃO DO ESCOAMENTO NO TÚNEL DE VENTO E ACESSÓRIOS DO LABORATÓRIO DE MÁQUINAS DE FLUXO*", Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2013

[27] North Sea Flow Measurement Workshop 22nd – 25 th October 2002, Qualification of Ultrasonic Flow Meters for Custody Transfer of Natural Gas Using Atmospheric Air Calibration Facilities.

[28] Felipe Carvalho da Silva, “*Análise comparativa de medidor de vazão em flare por tecnologia ótica e pitometria utilizando túnel de vento*”, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2012.

[29] WEG, *Guia de Aplicação de Inversores de Frequência, 2ª Edição*.

[30] BRASIL, National Instruments. Sistemas LabView®. 2013. Disponível em: <<http://brasil.ni.com>>. Acesso em: 01 abr. 2013.

[31] G. J. Delmée, *Manual de Medição de Vazão*. São Paulo, Brazil: Edgard Blücher Ltda 3rd ed., 2003.

[32] International organization for standardization. ISO/FDIS 3966: *Mesurement of fluid flow in closed conduits – Velocity area method using Pitot static tubes, 2008*.

[33] Martins, R.S., *Installation Effects of Upstream Elbows on the Correction Factor of Single-Path Transit-Time Ultrasonic Flow Meters*, M.Sc. Thesis, Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Espírito Santo - UFES, Vitória, ES, Brazil, 143p., 2012.

[34] R. Ramos, “Desenvolvimento de um medidor de vazão de gás por ultrassom: modelagem, protótipo e testes,” Master’s thesis, Programa de Pós-graduação, em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2006.

[35] Martins R.S., Rogério Ramos, 6º Congresso Brasileiro de pesquisa e desenvolvimento em petróleo e gás, “*Uma abordagem numérica para o cálculo de fator de correção de medidores de vazão por ultrassom*”, Universidade Federal do Espírito Santo.

[36] L. Lynnworth and Y. Liu, "Ultrasonic flowmeters: Half-century progress report, 1955- 2005," *Ultrasonics*, vol. 44, no. Supplement 1, pp. e1371 – e1378, 2006. Proceedings of Ultrasonics International (UI'05) and World Congress on Ultrasonics (WCU).

[37] T. Yeh and G. Mattingly, "Computer simulations of ultrasonic flow meter performance in ideal and non-ideal pipeflows," in ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting - FEDSM'97, ASME, 1997.

[38] R. B. Mathias, "Influencia do perfil de velocidade do escoamento sobre a medição ultrassônica de vazão por tempo de trânsito," Master's thesis, Programa de Pós-graduação, em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2010.

[39] P. I. Moore, G. J. Brown, and B. P. Stimpson, "Ultrasonic transit-time flowmeters modelled with theoretical velocity profiles: methodology," *Measurement Science and Technology*, vol. 11, no. 12, p. 1802, 2000.

[40] H. Köchner, A. Melling, and M. Baumgartner, "Optical flow field investigations for design improvements of an ultrasonic gas meter," *Flow Measurement and Instrumentation*, vol. 7, no. 3-4, pp. 133 – 140, 1996.

[41] B. Looss, C. Lhuillier, and H. Jeanneau, "Numerical simulation of transit-time ultrasonic flowmeters: uncertainties due to flow profile and fluid turbulence," *Ultrasonics*, vol. 40, pp. 1009 – 1015, 2002.

[42] Rogério Ramos, *Tecnologias em medição de vazão na indústria de Petróleo e Gás, Medidores Ultrassônicos*, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2013.

[43] Eric Lima, Rogério Ramos, Leonardo Bastos, Ricardo Calheiros, 7º Congresso Brasileiro de pesquisa e desenvolvimento em petróleo e gás, "ANÁLISE

*EXPERIMENTAL DO EFEITO DE CURVAS NA MEDIÇÃO DE VAZÃO DE GÁS DE TOCHA*”, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2013.

[44] De Chant, L.J., *The venerable 1/7th power law turbulent velocity profile: a classical nonlinear boundary value problem solution and its relationship to stochastic processes*. Applied Mathematics and Computation, 2005.

[45] Schlichting, H., *Boundary-Layer Theory*. 6 ed. McGraw-Hill series in Mechanical Engineering. 1968, USA: McGraw-Hill.

[46] Mendes, A. e Rosário, P. P. (2005). *Metrologia e incerteza de medição*. Editora Epse.

[47] Marcelo Aiolfi Barone, “*ANÁLISE EXPERIMENTAL SOBRE A UTILIZAÇÃO DE SENSORES INFRAVERMELHOS EM PROVADORES DE VAZÃO DE FLUIDOS CLAROS*”, Master’s thesis, Programa de Pós-graduação, em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2012.

[48] M. Holm, J. Stang, and J. Delsing, “Simulation of flow meter calibration factors for various installation effects,” *Measurement*, vol. 15, no. 4, pp. 235 – 244, 1995.

[49] WEG, *Motores de indução alimentados por inversores de frequência PWM, Guia Técnico*

## 8. ANEXOS

### 8.1. **ANEXO A:** *Controle da Rotação*

A variação da rotação é feita a partir de sinais analógicos (0-10Volts) que são lidos e convertidos posteriormente em referência de rotação pelo inversor de frequência através do seu canal AI1 (*analog input 1*). Esse sinal de tensão é gerado por um hardware específico da *National Instruments* o cDAQ – 9188 que é um sistema *NI CompactDAQ* que combina medições realizadas a partir de sensores com sinais de tensão ou corrente, possibilitando criar sistemas customizados conectados a um PC host ou laptop por intermédio de protocolos de comunicação [site ni].

Os sinais de tensão são enviados para o inversor de frequência por intermédio de um cartão de 4 saídas analógicas  $\pm 30V$ , o NI 9263. A interface de controle também permite gravar variáveis do processo em arquivos txt, permitindo a análise posterior dos dados. As Figuras A1 e A2 ilustram os diagramas elétricos da conexão entre os equipamentos.

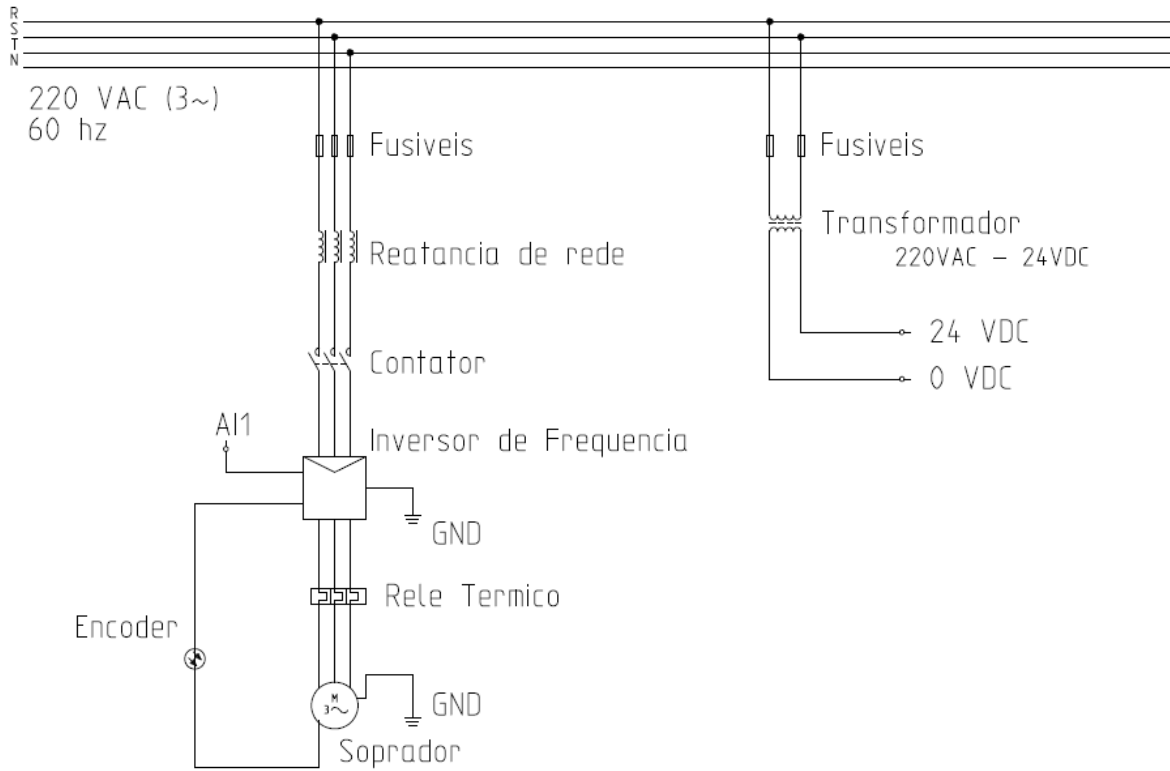


Figura A1. Diagrama de potência

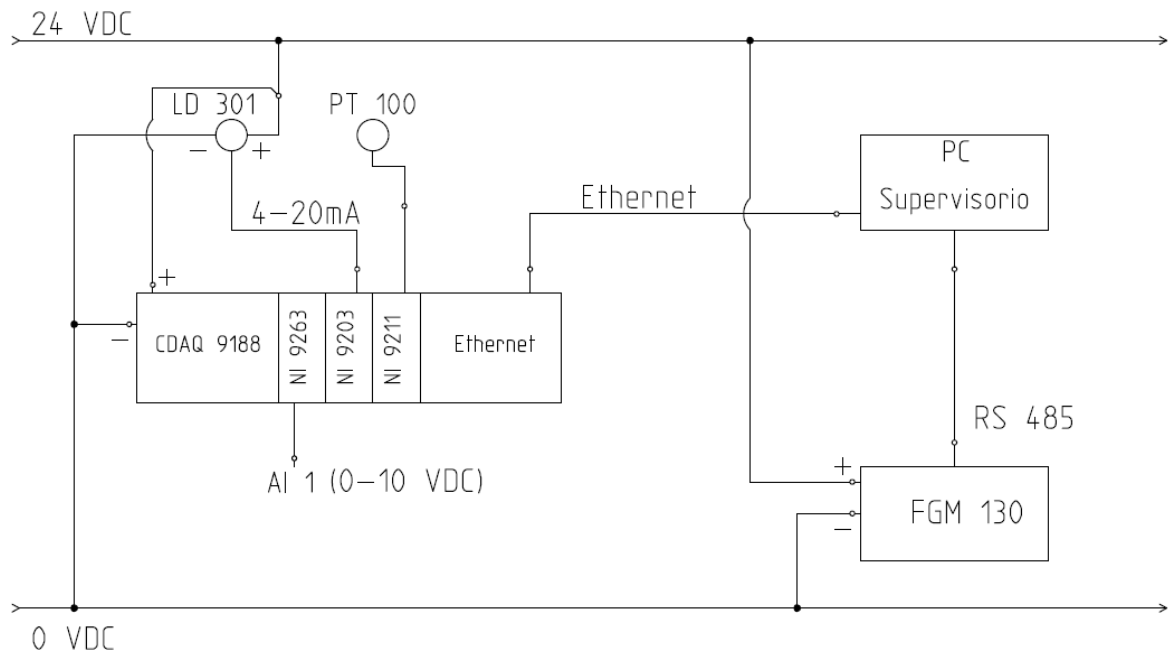


Figura A2. Diagrama de comando



Conforme mencionado na secção 3.2.2, a seguir pode-se visualizar a legenda da Fig. 8, que corresponde a interface de controle, onde:

1. Variáveis para ajuste ou sintonia do controlador PID (proporcional, integral e derivativo);
2. Controle manual;
3. Set point de velocidades para controle automático;
4. Variável do processo (velocidade);
5. Diferencial de pressão gerado no transmissor de pressão
6. N° de Reynolds calculado a partir da variável do processo;
7. Tipo de controle (automático/manual);
8. Indicador do tipo de controle selecionado pelo usuário;
9. Botão liga inversor de frequência;
10. Botão desliga inversor de frequência;
11. Botão atualizar valores do processo no caso de anomalias durante o processo de controle e aquisição de dados;
12. Indicador do status do inversor de frequência (ligado/desligado);
13. Botão liga/desliga aquisição de dados;
14. Indicador de limite de velocidade máxima (40m/s);
15. Gráfico (*chart*) para monitoração do desempenho do controlador (variável do processo e set point) e qualidade do sinal do transmissor de pressão;

## 8.2. Anexo B: Cálculo da velocidade de descarga

Nessa seção estão apresentadas os pontos de medição, considerando a aproximação Log-Linear, assim como as leituras de velocidades locais em cada ponto do escoamento, lembrando que, nos dados em questão já foram aplicados o critério de rejeição de *Chauvenet*.

Tabela B1. Pontos de medição e velocidades máximas em cada configuração de montagem

Raio ( $r_i/R_i$ )	Valor	Velocidade Máxima $V_0$ [m/s]			
		Rotação	Tubo Reto	1 Curva	2 Curvas
$r_1$	0,2860	<b>700 rpm</b>	19,04	19,46	18,15
$r_2$	0,5700		26,79	27,18	25,26
$r_3$	0,6900		34,46	34,79	32,15
$r_4$	0,8480				

Tabela B2. Leituras de velocidades locais em cada ponto do escoamento

700 rpm	Velocidades Médias [m/s]	Tubo Reto [m/s]	1 Curva [m/s]	2 Curvas [m/s]
	$v_1$	19,04	18,75	18,15
	$v_2$	17,4	17,22	17,7
	$v_3$	16,86	16,19	16,63
	$v_4$	15,25	14,25	14,66
950 rpm	Velocidades Médias [m/s]	Tubo Reto [m/s]	1 Curva [m/s]	2 Curvas [m/s]
	$v_1$	26,79	26,53	25,26
	$v_2$	26	24,68	24,93
	$v_3$	23,56	23,27	22,88
	$v_4$	21,19	21,02	20,07
1200 rpm	Velocidades Médias [m/s]	Tubo Reto [m/s]	1 Curva [m/s]	2 Curvas [m/s]
	$v_1$	34,42	33,59	32,15
	$v_2$	32,95	31,31	31,32
	$v_3$	31,64	30,11	29,21
	$v_4$	27,26	26,73	26,41

8.3. **Anexo C:** *Leitura das vazões do MUV e do tubo de Pitot nas duas configurações de montagem abordadas*

8.3.1. **Tubo Reto**

Dados brutos referentes as vazões do tubo de Pitot e do MUV, na configuração de montagem Tubo reto onde:

M Média das vazões

D Desvio padrão das vazões

Tabela C1. Tubo reto 28D 0°

700 rpm		950 rpm		1200 rpm	
Pitot (m <sup>3</sup> /h)	MUV (m <sup>3</sup> /h)	Pitot (m <sup>3</sup> /h)	MUV (m <sup>3</sup> /h)	Pitot (m <sup>3</sup> /h)	MUV (m <sup>3</sup> /h)
1412,60	1398,71	2057,06	1812,43	2631,46	2373,98
1412,60	1426,16	2044,45	1828,72	2588,73	2389,25
1412,60	1426,16	2044,45	1848,02	2637,77	2446,54
1454,61	1437,09	2026,96	1820,39	2612,19	2359,48
1454,61	1437,09	2064,56	1840,97	2612,19	2417,63
1368,54	1294,72	1832,81	1858,05	2587,41	2409,50
1368,54	1345,11	1832,81	1846,82	2567,39	2339,33
1459,34	1418,76	1829,35	1816,42	2567,39	2368,50
1452,65	1299,39	2004,72	1838,52	2493,95	2312,77
1428,35	1329,63	2004,72	1875,00	2524,85	2402,13
1443,64	1380,48	2033,27	1817,75	2543,99	2400,55
<b>M</b>		<b>M</b>		<b>M</b>	
1424,37	1381,21	1979,56	1836,64	2578,85	2383,60
<b>D</b>		<b>D</b>		<b>D</b>	
33,00	54,90	96,79	19,66	44,98	37,86

Tabela C2. Tubo reto 28D 45°

700 rpm		950 rpm		1200 rpm	
Pitot (m <sup>3</sup> /h)	MUV (m <sup>3</sup> /h)	Pitot (m <sup>3</sup> /h)	MUV (m <sup>3</sup> /h)	Pitot (m <sup>3</sup> /h)	MUV (m <sup>3</sup> /h)
1374,34	1417,63	1958,26	1856,92	2614,13	2405,76
1374,34	1439,19	2023,82	1799,84	2629,15	2381,75
1429,12	1439,19	2023,82	1789,14	2556,21	2328,38
1429,12	1439,19	1995,02	1847,28	2611,45	2356,81
1479,59	1439,19	1960,08	1797,92	2611,45	2418,39
1435,81	1439,19	1960,08	1781,58	2604,21	2423,40
1435,81	1439,19	1972,90	1765,31	2523,39	2385,63
1435,66	1439,19	1953,40	1783,38	2523,39	2360,14
1435,66	1406,94	1966,68	1813,44	2535,76	2324,57
1441,82	1435,13	1966,68	1831,16	2640,46	2348,62
1433,30	1312,90	1985,95	1842,90	2663,50	2307,33
<b>M</b>		<b>M</b>		<b>M</b>	
1427,69	1422,45	1978,79	1809,90	2592,10	2367,34
<b>D</b>		<b>D</b>		<b>D</b>	
29,80	37,93	25,43	30,55	49,09	39,02

Tabela C3. Tubo reto 28D 90°

700 rpm		950 rpm		1200 rpm	
Pitot (m <sup>3</sup> /h)	MUV (m <sup>3</sup> /h)	Pitot (m <sup>3</sup> /h)	MUV (m <sup>3</sup> /h)	Pitot (m <sup>3</sup> /h)	MUV (m <sup>3</sup> /h)
1421,94	<b>1409,55</b>	2020,76	1739,44	2624,49	2323,46
1421,94	<b>1339,60</b>	2009,29	1771,54	2624,49	2395,79
1422,01	<b>1272,93</b>	1970,94	1786,70	2620,93	2323,10
1422,01	<b>1272,93</b>	1931,91	1816,50	2657,56	2353,72
1430,88	<b>1172,38</b>	1931,91	1800,41	2643,39	2346,15
1455,44	<b>1192,85</b>	2006,67	1779,84	2643,39	2362,53
1457,69	<b>1192,85</b>	1972,80	1795,77	2619,00	2312,87
1457,69	<b>1156,55</b>	1972,80	1837,22	2490,20	2344,16
1404,17	<b>1189,53</b>	1778,77	1838,18	2490,20	2243,61
1422,31	<b>1267,02</b>	1823,07	1830,33	2518,46	2298,42
1422,31	<b>1267,02</b>	2024,25	1829,16	2553,54	2283,34
<b>M</b>		<b>M</b>		<b>M</b>	
1430,76	1248,47	1949,38	1802,28	2589,60	2326,11
<b>D</b>		<b>D</b>		<b>D</b>	
17,94	77,48	80,50	31,48	63,88	41,55

Tabela C4. Tubo reto 28D 135°

700 rpm		950 rpm		1200 rpm	
Pitot (m <sup>3</sup> /h)	MUV (m <sup>3</sup> /h)	Pitot (m <sup>3</sup> /h)	MUV (m <sup>3</sup> /h)	Pitot (m <sup>3</sup> /h)	MUV (m <sup>3</sup> /h)
1420,98	968,36	2019,96	1626,48	2594,30	2212,60
1420,98	1010,22	2019,96	1651,50	2454,06	2165,99
1353,92	1010,22	1961,41	1693,09	2475,08	2157,58
1375,49	982,38	2032,56	1687,00	2475,08	2145,58
1375,49	948,78	2032,56	1692,97	2390,56	2088,52
1400,71	948,78	2037,00	1654,49	2394,65	1947,39
1416,78	964,60	1969,69	1662,13	2394,65	1972,15
1351,71	982,66	1982,71	1670,62	2381,07	2013,72
1351,71	960,94	1982,71	1665,10	2529,32	2165,97
1344,39	960,94	2022,80	1696,26	2555,71	2141,94
1322,78	895,41	2046,58	1659,02	2555,71	2169,93
<b>M</b>		<b>M</b>		<b>M</b>	
1375,90	966,66	2009,81	1668,97	2472,75	2107,40
<b>D</b>		<b>D</b>		<b>D</b>	
34,38	31,76	29,87	21,70	77,11	89,46

Tabela C5. Tubo reto 28D 180°

700 rpm		950 rpm		1200 rpm	
Pitot (m <sup>3</sup> /h)	MUV (m <sup>3</sup> /h)	Pitot (m <sup>3</sup> /h)	MUV (m <sup>3</sup> /h)	Pitot (m <sup>3</sup> /h)	MUV (m <sup>3</sup> /h)
1418,07	1024,59	1905,69	1638,54	2576,83	2139,16
1418,07	1010,34	1919,14	1642,51	2554,51	2201,45
1351,01	1010,34	1962,33	1652,32	2554,51	2172,42
1383,65	977,34	1945,85	1611,02	2490,70	2115,46
1408,98	982,73	1945,85	1668,53	2371,94	2108,92
1408,98	969,98	1965,47	1575,62	2490,70	2038,55
1415,97	969,98	1878,51	1662,10	2490,70	2132,49
1383,57	1007,53	1878,51	1682,97	2619,13	2165,77
1418,14	959,66	1861,36	1667,05	2629,96	2154,92
1418,14	959,66	1942,37	1688,15	2629,96	2242,04
1440,72	992,80	1932,28	1600,03	2584,67	2179,86
<b>M</b>		<b>M</b>		<b>M</b>	
1405,94	987,72	1921,58	1644,44	2544,87	2150,09
<b>D</b>		<b>D</b>		<b>D</b>	
24,36	22,67	35,92	35,67	78,42	53,40

Tabela C6. Tubo reto 16,5D 0°

700 rpm		950 rpm		1200 rpm	
Pitot (m <sup>3</sup> /h)	MUV (m <sup>3</sup> /h)	Pitot (m <sup>3</sup> /h)	MUV (m <sup>3</sup> /h)	Pitot (m <sup>3</sup> /h)	MUV (m <sup>3</sup> /h)
1386,29	975,88	2036,23	1640,86	2397,94	2078,80
1377,23	975,88	1998,00	1654,74	2510,10	2160,26
1386,50	931,79	1998,00	1683,07	2601,45	2117,74
1381,69	941,68	2006,04	1632,33	2585,57	2087,09
1381,69	995,71	2025,33	1651,14	2585,57	2108,19
1393,51	995,71	1966,08	1621,79	2458,51	1967,50
1379,46	999,74	1966,08	1534,11	2499,87	1993,31
1379,46	994,84	2012,74	1557,93	2499,87	2101,57
1379,32	994,84	1990,45	1562,82	2424,27	2109,62
1367,75	992,76	1990,45	1604,01	2508,88	2110,81
1353,43	1004,65	2009,79	1621,56	2538,34	2162,21
<b>M</b>		<b>M</b>		<b>M</b>	
1378,76	982,14	1999,93	1614,94	2510,03	2090,65
<b>D</b>		<b>D</b>		<b>D</b>	
10,57	24,23	21,77	46,07	65,84	60,57

Tabela C7. Tubo reto 16,5D 45°

700 rpm		950 rpm		1200 rpm	
Pitot (m <sup>3</sup> /h)	MUV (m <sup>3</sup> /h)	Pitot (m <sup>3</sup> /h)	MUV (m <sup>3</sup> /h)	Pitot (m <sup>3</sup> /h)	MUV (m <sup>3</sup> /h)
1371,15	976,90	2028,34	1636,59	2500,40	2167,51
1321,12	1001,84	1976,95	1614,58	2563,88	2130,37
1321,12	982,34	1964,03	1621,71	2564,95	2134,16
1340,47	982,34	1964,03	1618,30	2564,95	2044,57
1303,91	986,48	1967,53	1656,58	2514,40	2082,77
1303,91	968,56	1944,22	1653,70	2487,50	2149,10
1345,44	968,56	1960,68	1710,84	2504,17	2040,65
1338,10	953,89	1960,68	1696,27	2504,17	2106,68
1330,80	999,42	1985,35	1666,98	2522,02	2093,42
1330,80	1017,30	1972,38	1659,87	2559,67	2146,09
1376,01	1017,30	1972,38	1601,66	2559,67	2092,71
<b>M</b>		<b>M</b>		<b>M</b>	
1334,80	986,81	1972,42	1648,83	2531,43	2108,00
<b>D</b>		<b>D</b>		<b>D</b>	
23,43	20,33	21,33	34,42	31,07	41,85

Tabela C8. Tubo reto 16,5D 90°

700 rpm		950 rpm		1200 rpm	
Pitot (m <sup>3</sup> /h)	MUV (m <sup>3</sup> /h)	Pitot (m <sup>3</sup> /h)	MUV (m <sup>3</sup> /h)	Pitot (m <sup>3</sup> /h)	MUV (m <sup>3</sup> /h)
1209,93	954,09	1977,06	1515,80	2432,56	1936,45
1256,58	937,09	1977,06	1549,66	2240,29	1894,57
1256,58	878,09	1999,89	1680,12	2240,29	2008,03
1269,59	878,09	1901,25	1637,44	2432,69	1962,07
1274,44	893,09	1911,22	1689,94	2467,89	2083,98
1304,25	892,27	1911,22	1673,24	2456,09	2033,52
1304,25	912,73	1889,33	1696,47	2456,09	2034,24
1333,53	912,73	1931,07	1680,17	2486,00	2001,66
1371,36	970,76	1931,07	1680,64	2555,99	2091,03
1371,36	1002,77	1926,08	1667,25	2555,99	2173,89
1394,61	1002,77	1942,53	1602,54	2576,00	2113,84
<b>M</b>		<b>M</b>		<b>M</b>	
1304,23	930,41	1936,16	1643,02	2445,44	2030,30
<b>D</b>		<b>D</b>		<b>D</b>	
57,93	46,53	35,01	61,07	113,30	82,09

Tabela C9. Tubo reto 16,5D 135°

700 rpm		950 rpm		1200 rpm	
Pitot (m <sup>3</sup> /h)	MUV (m <sup>3</sup> /h)	Pitot (m <sup>3</sup> /h)	MUV (m <sup>3</sup> /h)	Pitot (m <sup>3</sup> /h)	MUV (m <sup>3</sup> /h)
1369,33	983,48	1824,05	1649,81	2562,28	2058,55
1369,33	961,10	1998,72	1631,64	2625,28	2033,94
1272,22	961,10	1998,72	1622,94	2482,01	2000,80
1359,92	971,46	2016,17	1643,09	2482,01	1979,22
1359,92	961,38	1987,42	1668,65	2500,92	1993,93
1336,29	961,38	2009,79	1637,09	2458,11	1982,35
1319,34	949,42	2009,79	1608,20	2475,19	2008,03
1311,92	956,01	2025,83	1619,48	2475,19	2030,49
1311,92	954,29	1985,77	1558,20	2507,62	2038,16
1307,28	954,29	1985,77	1526,05	2493,44	2052,00
1331,42	955,55	2037,06	1556,61	2510,21	2043,56
<b>M</b>		<b>M</b>		<b>M</b>	
1331,72	960,86	1989,01	1611,07	2506,57	2020,09
<b>D</b>		<b>D</b>		<b>D</b>	
30,85	9,45	57,17	44,89	47,90	28,23

Tabela C10. Tubo reto 16,5D 180°

700 rpm		950 rpm		1200 rpm	
Pitot (m <sup>3</sup> /h)	MUV (m <sup>3</sup> /h)	Pitot (m <sup>3</sup> /h)	MUV (m <sup>3</sup> /h)	Pitot (m <sup>3</sup> /h)	MUV (m <sup>3</sup> /h)
1249,53	960,07	1859,33	1500,15	2666,05	2059,97
1246,65	960,07	1859,33	1499,17	2666,05	2125,79
1269,93	978,48	1885,05	1511,43	2449,67	2171,62
1269,93	964,79	1885,05	1552,63	2523,47	2081,43
1297,55	964,79	1885,05	1541,14	2375,09	2052,68
1316,81	969,71	1886,68	1585,45	2439,49	2095,65
1304,66	972,36	1971,48	1556,21	2439,49	1997,85
1304,66	977,41	2012,00	1587,30	2406,18	1999,74
1290,07	977,41	2012,00	1568,53	2506,92	2123,05
1309,77	990,75	1992,75	1621,84	2387,27	2151,06
1309,77	953,17	1982,92	1653,54	2387,27	2102,05
<b>M</b>		<b>M</b>		<b>M</b>	
1288,12	969,91	1930,15	1561,58	2477,00	2087,35
<b>D</b>		<b>D</b>		<b>D</b>	
25,04	10,74	63,11	49,07	104,69	56,45

Tabela C11. Tubo reto 12,4D 0°

700 rpm		950 rpm		1200 rpm	
Pitot (m <sup>3</sup> /h)	MUV (m <sup>3</sup> /h)	Pitot (m <sup>3</sup> /h)	MUV (m <sup>3</sup> /h)	Pitot (m <sup>3</sup> /h)	MUV (m <sup>3</sup> /h)
1384,15	943,15	1987,22	1561,42	2354,58	2063,49
1391,27	943,15	1991,77	1522,93	2354,58	2019,02
1320,17	934,87	1912,73	1502,04	2498,92	2027,02
1300,47	929,09	1873,87	1507,00	2500,03	2127,81
1300,47	929,09	1873,87	1494,92	2388,27	2098,22
1351,43	919,26	1956,17	1461,41	2388,27	2055,94
1360,77	940,40	1954,43	1530,09	2552,16	2044,56
1360,77	954,18	1954,43	1568,12	2448,05	2055,61
1389,05	954,18	1993,79	1498,65	2448,05	2055,46
1346,85	953,77	1960,90	1470,41	2461,25	2030,19
1308,24	940,73	1970,74	1525,60	2385,34	2052,36
<b>M</b>		<b>M</b>		<b>M</b>	
1346,69	940,17	1948,18	1512,96	2434,50	2057,24
<b>D</b>		<b>D</b>		<b>D</b>	
34,73	11,43	43,15	33,31	65,45	31,62



Tabela C12. Tubo reto 12,4D 45°

700 rpm		950 rpm		1200 rpm	
Pitot (m <sup>3</sup> /h)	MUV (m <sup>3</sup> /h)	Pitot (m <sup>3</sup> /h)	MUV (m <sup>3</sup> /h)	Pitot (m <sup>3</sup> /h)	MUV (m <sup>3</sup> /h)
1331,84	845,53	1927,09	1500,49	2418,72	2036,46
1312,40	920,61	1950,15	1348,03	2545,38	2015,78
1312,40	938,17	1950,15	1441,87	2546,80	1994,69
1331,77	938,17	1877,72	1514,17	2546,80	1970,68
1365,32	977,73	1836,32	1540,82	2535,40	1960,07
1304,93	932,91	1864,19	1555,81	2493,31	1963,72
1304,93	965,70	1864,19	1463,41	2544,17	2006,91
1367,58	965,70	1888,39	1477,73	2544,17	2076,27
1360,49	927,36	1810,01	1540,95	2471,11	2073,85
1360,49	969,28	1810,01	1449,77	2415,95	1975,82
1362,68	969,28	1786,77	1477,13	2415,95	1968,24
<b>M</b>		<b>M</b>		<b>M</b>	
1337,71	940,95	1869,54	1482,74	2497,98	2003,86
<b>D</b>		<b>D</b>		<b>D</b>	
26,11	37,37	56,42	58,94	57,59	42,57

Tabela C13. Tubo reto 12,4D 90°

700 rpm		950 rpm		1200 rpm	
Pitot (m <sup>3</sup> /h)	MUV (m <sup>3</sup> /h)	Pitot (m <sup>3</sup> /h)	MUV (m <sup>3</sup> /h)	Pitot (m <sup>3</sup> /h)	MUV (m <sup>3</sup> /h)
1373,26	916,65	1949,89	1577,88	2343,62	2081,62
1373,26	938,86	1920,30	1575,42	2428,29	2055,53
1335,52	938,86	1920,30	1492,89	2180,99	1987,80
1356,87	950,77	1956,46	1546,34	2180,99	1934,60
1347,31	909,95	1884,61	1472,52	2364,34	2054,49
1347,31	932,81	1884,61	1396,50	2554,38	2059,91
1363,96	932,81	1867,66	1499,89	2554,38	2058,37
1375,57	977,59	1935,00	1443,21	2513,51	2102,62
1375,57	953,63	1904,71	1472,26	2520,17	2101,74
1389,23	953,63	1904,71	1446,78	2574,24	2047,85
1245,54	920,42	1818,67	1360,74	2574,24	2065,31
<b>M</b>		<b>M</b>		<b>M</b>	
1353,04	938,72	1904,26	1480,40	2435,38	2049,99
<b>D</b>		<b>D</b>		<b>D</b>	
39,00	19,54	39,63	68,86	149,37	49,08

Tabela C14. Tubo reto 12,4D 135°

700 rpm		950 rpm		1200 rpm	
Pitot (m <sup>3</sup> /h)	MUV (m <sup>3</sup> /h)	Pitot (m <sup>3</sup> /h)	MUV (m <sup>3</sup> /h)	Pitot (m <sup>3</sup> /h)	MUV (m <sup>3</sup> /h)
1244,49	928,45	1966,00	1620,45	2428,61	1963,44
1314,61	939,84	1975,61	1626,18	2530,35	1924,45
1267,80	961,25	2006,21	1612,44	2498,61	2126,47
1267,80	943,68	2006,21	1583,32	2453,34	2005,28
1357,92	943,68	2006,10	1524,16	2453,34	1970,98
1277,66	933,65	1975,50	1603,80	2425,74	1908,53
1277,66	883,78	1975,50	1618,02	2432,27	1918,29
1319,52	883,78	1983,88	1598,17	2432,27	1895,42
1314,40	931,89	1983,78	1495,65	2369,61	1961,22
1367,10	909,85	1975,40	1551,09	2540,44	2036,35
1367,10	914,39	1975,40	1601,29	2395,30	2027,44
<b>M</b>		<b>M</b>		<b>M</b>	
1306,91	924,93	1984,51	1584,96	2450,90	1976,17
<b>D</b>		<b>D</b>		<b>D</b>	
43,35	24,71	14,69	42,93	53,05	68,72

Tabela C15. Tubo reto 12,4D 180°

700 rpm		950 rpm		1200 rpm	
Pitot (m <sup>3</sup> /h)	MUV (m <sup>3</sup> /h)	Pitot (m <sup>3</sup> /h)	MUV (m <sup>3</sup> /h)	Pitot (m <sup>3</sup> /h)	MUV (m <sup>3</sup> /h)
1386,29	975,88	2036,23	1640,86	2397,94	2078,80
1377,23	975,88	1998,00	1654,74	2510,10	2160,26
1386,50	931,79	1998,00	1683,07	2601,45	2117,74
1381,69	941,68	2006,04	1632,33	2585,57	2087,09
1381,69	995,71	2025,33	1651,14	2585,57	2108,19
1393,51	995,71	1966,08	1621,79	2458,51	1967,50
1379,46	999,74	1966,08	1534,11	2499,87	1993,31
1379,46	994,84	2012,74	1557,93	2499,87	2101,57
1379,32	994,84	1990,45	1562,82	2424,27	2109,62
1367,75	992,76	1990,45	1604,01	2508,88	2110,81
1353,43	1004,65	2009,79	1621,56	2538,34	2162,21
<b>M</b>		<b>M</b>		<b>M</b>	
1378,76	982,14	1999,93	1614,94	2510,03	2090,65
<b>D</b>		<b>D</b>		<b>D</b>	
10,57	24,23	21,77	46,07	65,84	60,57

Tabela C16. Tubo reto 4,1D 0°

700 rpm		950 rpm		1200 rpm	
Pitot (m <sup>3</sup> /h)	MUV (m <sup>3</sup> /h)	Pitot (m <sup>3</sup> /h)	MUV (m <sup>3</sup> /h)	Pitot (m <sup>3</sup> /h)	MUV (m <sup>3</sup> /h)
1358,43	927,00	1990,43	1510,65	2399,27	2024,94
1358,43	954,31	1942,98	1523,86	2527,10	2020,92
1418,44	954,31	1942,98	1499,13	2435,24	2012,23
1278,06	944,43	1967,61	1501,34	2435,24	2109,49
1278,06	963,22	1982,09	1510,72	2245,51	2114,94
1290,48	963,22	1982,09	1522,94	2597,39	2065,55
1346,64	973,82	2050,46	1503,83	2597,39	2063,98
1260,23	939,02	2072,53	1451,61	2588,66	2079,15
1260,23	963,49	2046,05	1503,39	2571,71	2049,67
1402,76	963,49	2046,05	1530,63	2459,17	2060,34
1383,94	937,55	2089,58	1502,17	2459,17	2095,86
<b>M</b>		<b>M</b>		<b>M</b>	
1330,52	953,08	2010,26	1505,48	2483,26	2063,37
<b>D</b>		<b>D</b>		<b>D</b>	
58,83	14,32	52,15	20,75	107,82	34,91

Tabela C17. Tubo reto 4,1D 45°

700 rpm		950 rpm		1200 rpm	
Pitot (m <sup>3</sup> /h)	MUV (m <sup>3</sup> /h)	Pitot (m <sup>3</sup> /h)	MUV (m <sup>3</sup> /h)	Pitot (m <sup>3</sup> /h)	MUV (m <sup>3</sup> /h)
1324,97	937,31	1934,59	1435,93	2564,03	2023,45
1295,52	896,59	1875,81	1538,02	2550,01	1999,37
1295,52	870,94	1875,81	1460,06	2473,06	2011,24
1312,81	870,94	1930,00	1508,18	2548,80	2013,13
1322,57	863,82	1929,70	1485,52	2548,80	2054,02
1322,57	863,01	1929,70	1579,73	2508,23	2018,41
1265,32	863,01	1993,79	1554,91	2611,16	2022,44
1257,57	838,27	1844,46	1531,93	2611,16	2022,45
1285,49	888,59	1901,32	1584,84	2614,62	2020,64
1285,49	939,92	1901,32	1569,75	2638,07	2031,05
1360,99	939,92	1904,57	1507,06	2597,39	2036,76
<b>M</b>		<b>M</b>		<b>M</b>	
1302,62	888,39	1911,01	1523,27	2569,57	2023,00
<b>D</b>		<b>D</b>		<b>D</b>	
29,86	35,76	39,50	48,96	50,31	14,27

Tabela C18. Tubo reto 4,1D 90°

700 rpm		950 rpm		1200 rpm	
Pitot (m <sup>3</sup> /h)	MUV (m <sup>3</sup> /h)	Pitot (m <sup>3</sup> /h)	MUV (m <sup>3</sup> /h)	Pitot (m <sup>3</sup> /h)	MUV (m <sup>3</sup> /h)
1275,72	961,15	1987,92	1609,32	2477,84	1976,11
1275,72	972,63	1987,92	1604,91	2590,22	1992,46
1275,92	972,63	1974,88	1598,70	2624,73	2079,68
1298,22	967,93	1974,88	1563,52	2600,49	2036,90
1298,22	964,55	1976,33	1501,79	2600,49	2037,30
1290,70	964,55	1945,40	1621,72	2615,09	2091,07
1280,80	964,03	1849,29	1582,99	2545,47	2077,02
1310,47	953,13	1849,29	1678,38	2627,13	2114,07
1310,47	907,18	2005,41	1629,76	2608,74	2102,83
1332,13	907,18	1968,49	1588,13	2608,74	2020,58
1365,57	945,82	1968,49	1546,56	2494,79	2051,85
<b>M</b>		<b>M</b>		<b>M</b>	
1301,27	952,80	1953,48	1593,25	2581,25	2052,72
<b>D</b>		<b>D</b>		<b>D</b>	
27,85	23,87	53,61	46,23	51,88	44,82

Tabela C19. Tubo reto 4,1D 135°

700 rpm		950 rpm		1200 rpm	
Pitot (m <sup>3</sup> /h)	MUV (m <sup>3</sup> /h)	Pitot (m <sup>3</sup> /h)	MUV (m <sup>3</sup> /h)	Pitot (m <sup>3</sup> /h)	MUV (m <sup>3</sup> /h)
1278,80	942,80	2038,27	1594,27	2622,39	2083,99
1327,99	956,73	2038,27	1588,34	2602,77	2116,51
1327,99	961,74	2058,45	1607,28	2602,77	2065,78
1358,92	961,74	1982,50	1595,61	2536,72	2095,27
1318,30	962,64	1963,00	1544,43	2605,46	2055,79
1325,35	985,74	1930,16	1550,85	2585,71	2061,03
1325,35	933,10	1930,16	1565,03	2585,71	2093,77
1323,10	933,10	1969,42	1585,72	2586,90	2123,09
1291,31	959,13	1954,78	1596,54	2589,41	2095,58
1291,31	1005,00	1954,78	1556,13	2589,41	2102,94
1342,35	1005,00	2006,47	1608,08	2591,98	2107,14
<b>M</b>		<b>M</b>		<b>M</b>	
1319,16	964,25	1984,20	1581,12	2590,84	2090,99
<b>D</b>		<b>D</b>		<b>D</b>	
23,55	25,07	44,83	22,92	21,20	22,26

Tabela C20. Tubo reto 4,1D 180°

700 rpm		950 rpm		1200 rpm	
Pitot (m <sup>3</sup> /h)	MUV (m <sup>3</sup> /h)	Pitot (m <sup>3</sup> /h)	MUV (m <sup>3</sup> /h)	Pitot (m <sup>3</sup> /h)	MUV (m <sup>3</sup> /h)
1269,53	975,42	1929,58	1690,24	2648,39	2104,30
1385,59	965,37	1949,33	1668,79	2669,19	2084,42
1385,59	965,37	1949,33	1633,37	2669,19	2075,95
1352,65	920,93	1926,18	1666,78	2594,53	2071,86
1369,33	925,62	1937,71	1605,20	2599,47	2081,71
1369,33	967,92	1937,71	1585,76	2599,47	2127,77
1369,26	967,92	1962,36	1602,35	2615,62	2111,95
1304,39	937,23	1955,91	1580,70	2648,39	2100,17
1241,30	922,30	1950,91	1591,03	2583,29	2069,32
1241,30	876,04	1950,91	1591,80	2583,29	2033,69
1328,83	876,04	2033,04	1644,30	2458,67	2010,16
<b>M</b>		<b>M</b>		<b>M</b>	
1328,83	936,38	1953,00	1623,67	2606,32	2079,21
<b>D</b>		<b>D</b>		<b>D</b>	
56,00	36,10	28,76	38,74	58,84	33,96

### 8.3.2. Uma Curva

Dados brutos referentes as vazões do tubo de Pitot e do MUV, na configuração de montagem 1 curva.

Tabela C21. 1 Curva 28D 0°

700 rpm		950 rpm		1200 rpm	
Pitot (m <sup>3</sup> /h)	MUV (m <sup>3</sup> /h)	Pitot (m <sup>3</sup> /h)	MUV (m <sup>3</sup> /h)	Pitot (m <sup>3</sup> /h)	MUV (m <sup>3</sup> /h)
1423,96	962,20	1976,42	1601,33	2384,55	2090,50
1412,71	982,91	1977,98	1600,68	2379,15	2063,31
1412,78	982,91	1977,98	1644,61	2379,15	2083,39
1347,49	962,50	1981,00	1626,93	2399,39	2107,08
1408,04	966,42	1981,00	1609,97	2522,27	2120,91
1408,04	966,42	1980,90	1603,11	2510,82	2119,91
1410,16	964,26	1974,65	1601,24	2510,69	2134,04
1421,58	972,08	1968,12	1618,67	2540,03	2094,02
1408,11	1001,05	1985,83	1589,51	2524,79	2101,48
1408,04	1001,05	1985,93	1582,66	2524,79	2075,34
1426,13	973,76	1986,03	1627,34	2523,36	2102,02
<b>M</b>		<b>M</b>		<b>M</b>	
1407,91	975,96	1979,62	1609,64	2472,64	2099,27
<b>D</b>		<b>D</b>		<b>D</b>	
21,16	14,37	5,45	18,20	69,66	20,97

Tabela C22. 1 Curva 28D 45°

700 rpm		950 rpm		1200 rpm	
Pitot (m <sup>3</sup> /h)	MUV (m <sup>3</sup> /h)	Pitot (m <sup>3</sup> /h)	MUV (m <sup>3</sup> /h)	Pitot (m <sup>3</sup> /h)	MUV (m <sup>3</sup> /h)
1422,85	965,83	1969,61	1627,57	2467,29	2112,71
1422,77	965,83	1969,51	1646,76	2456,86	2092,54
1388,40	991,58	1990,63	1630,61	2456,73	2126,09
1399,83	975,76	1989,08	1625,01	2435,73	2100,01
1399,83	975,76	1982,61	1632,56	2455,47	2121,49
1399,83	959,06	1982,51	1638,86	2467,16	2084,10
1417,99	974,60	1982,61	1588,59	2467,16	2083,02
1408,90	950,78	1976,22	1623,97	2514,93	2136,67
1408,83	950,78	1977,78	1609,20	2526,54	2120,75
1408,83	957,52	1977,78	1579,05	2526,54	2091,48
1399,68	939,47	1974,46	1628,65	2508,72	2110,70
<b>M</b>		<b>M</b>		<b>M</b>	
1407,07	964,27	1979,35	1620,99	2480,29	2107,23
<b>D</b>		<b>D</b>		<b>D</b>	
10,89	14,74	6,95	20,70	32,41	18,13

Tabela C23. 1 Curva 28D 90°

700 rpm		950 rpm		1200 rpm	
Pitot (m <sup>3</sup> /h)	MUV (m <sup>3</sup> /h)	Pitot (m <sup>3</sup> /h)	MUV (m <sup>3</sup> /h)	Pitot (m <sup>3</sup> /h)	MUV (m <sup>3</sup> /h)
1421,51	966,80	1960,48	1598,28	2417,19	2076,26
1421,51	965,48	1984,62	1564,08	2417,07	2067,13
1421,58	965,48	1979,60	1589,67	2398,32	2068,97
1426,05	966,66	1968,16	1576,04	2431,80	2014,27
1412,67	964,79	1968,16	1548,41	2521,09	2066,84
1412,60	964,79	1956,66	1544,04	2521,09	2093,97
1425,83	970,05	1960,07	1535,29	2526,31	2093,20
1410,27	957,66	1960,17	1552,45	2496,89	2063,28
1416,81	951,93	1968,37	1552,99	2496,89	2083,26
1416,88	951,93	1960,38	1572,03	2498,12	2054,06
1412,60	957,17	1963,51	1557,65	2499,35	2029,74
<b>M</b>		<b>M</b>		<b>M</b>	
1418,03	962,07	1966,38	1562,81	2474,92	2064,63
<b>D</b>		<b>D</b>		<b>D</b>	
5,59	6,28	8,77	19,47	48,38	24,61

Tabela C24. 1 Curva 28D 135°

700 rpm		950 rpm		1200 rpm	
Pitot (m <sup>3</sup> /h)	MUV (m <sup>3</sup> /h)	Pitot (m <sup>3</sup> /h)	MUV (m <sup>3</sup> /h)	Pitot (m <sup>3</sup> /h)	MUV (m <sup>3</sup> /h)
1393,51	974,23	1983,58	1582,39	2479,99	2051,85
1413,96	977,76	1978,67	1568,94	2443,56	2063,04
1413,96	977,76	1978,56	1575,53	2427,78	2055,49
1409,61	970,22	1972,18	1594,63	2427,91	2067,21
1400,41	973,31	1988,23	1585,66	2431,91	2069,75
1400,41	956,43	1980,22	1569,24	2528,84	2058,41
1400,48	956,43	1980,22	1586,76	2522,34	2077,70
1400,41	959,08	1975,19	1551,90	2522,34	2038,18
1404,80	979,82	1970,52	1568,05	2514,81	2073,94
1404,80	979,82	1970,52	1582,68	2521,12	2067,31
1404,94	970,48	1980,12	1580,11	2520,99	2093,34
<b>M</b>		<b>M</b>		<b>M</b>	
1404,30	970,49	1978,00	1576,90	2485,60	2065,11
<b>D</b>		<b>D</b>		<b>D</b>	
6,26	9,10	5,52	11,79	43,92	14,52

Tabela C25. 1 Curva 28D 180°

700 rpm		950 rpm		1200 rpm	
Pitot (m <sup>3</sup> /h)	MUV (m <sup>3</sup> /h)	Pitot (m <sup>3</sup> /h)	MUV (m <sup>3</sup> /h)	Pitot (m <sup>3</sup> /h)	MUV (m <sup>3</sup> /h)
1295,24	949,69	1939,68	1601,29	2314,98	2065,61
1277,66	926,91	1933,07	1609,09	2365,47	2032,78
1317,12	945,57	1933,07	1632,16	2365,47	1961,82
1317,05	945,57	1933,07	1609,31	2343,75	2056,39
1326,81	950,40	1927,93	1609,87	2373,46	2047,38
1319,52	956,06	1918,08	1582,13	2336,97	2055,24
1329,19	957,35	1918,08	1604,13	2337,22	2064,09
1329,19	957,35	1790,28	1625,98	2376,14	2048,23
1277,59	935,67	1775,92	1606,28	2361,24	2072,26
1321,71	954,71	1775,92	1617,85	2361,36	2074,41
1321,71	954,71	1761,36	1611,48	2342,44	2001,59
<b>M</b>		<b>M</b>		<b>M</b>	
1312,07	948,54	1873,32	1609,96	2352,59	2043,62
<b>D</b>		<b>D</b>		<b>D</b>	
19,37	9,71	77,79	13,09	18,84	34,03

Tabela C26. 1 Curva 16,5D 0°

700 rpm		950 rpm		1200 rpm	
Pitot (m <sup>3</sup> /h)	MUV (m <sup>3</sup> /h)	Pitot (m <sup>3</sup> /h)	MUV (m <sup>3</sup> /h)	Pitot (m <sup>3</sup> /h)	MUV (m <sup>3</sup> /h)
1363,17	919,53	1952,08	1561,52	2436,79	2043,08
1365,43	922,32	1948,87	1559,16	2511,90	2070,49
1365,43	921,67	1967,13	1550,72	2503,11	2029,36
1363,17	921,67	1967,13	1549,72	2518,21	2056,83
1363,10	931,10	1973,43	1555,65	2518,21	1999,05
1344,24	922,63	1933,88	1554,45	2511,90	2032,01
1344,24	922,16	1933,88	1564,87	2527,15	2032,98
1353,36	922,16	1974,88	1555,98	2527,15	2038,48
1353,29	915,70	1965,36	1547,84	2514,41	2005,57
1365,43	925,43	1949,07	1541,52	2523,37	1976,11
1365,43	925,43	1949,07	1544,55	2526,89	1986,81
<b>M</b>		<b>M</b>		<b>M</b>	
1358,75	922,71	1955,89	1553,27	2510,83	2024,61
<b>D</b>		<b>D</b>		<b>D</b>	
8,46	3,84	14,62	7,17	25,72	29,36



Tabela C27. 1 Curva 16,5D 45°

700 rpm		950 rpm		1200 rpm	
Pitot (m <sup>3</sup> /h)	MUV (m <sup>3</sup> /h)	Pitot (m <sup>3</sup> /h)	MUV (m <sup>3</sup> /h)	Pitot (m <sup>3</sup> /h)	MUV (m <sup>3</sup> /h)
1365,57	953,65	1968,90	1576,31	2371,61	2045,60
1374,92	953,65	1967,34	1582,54	2510,93	2023,83
1367,75	940,78	1972,28	1558,95	2510,93	2021,08
1365,43	942,44	1972,28	1593,31	2521,25	2029,63
1365,43	947,52	1973,84	1577,65	2517,52	2016,79
1358,28	947,52	1964,21	1560,36	2517,52	2001,69
1369,92	949,67	1959,14	1566,18	2530,18	2024,25
1369,92	945,80	1959,14	1577,57	2514,81	2021,51
1353,36	945,80	1972,18	1595,30	2524,85	2027,85
1322,41	936,25	1959,04	1583,73	2524,85	2023,15
1363,32	929,35	1959,04	1577,76	2530,05	2037,32
<b>M</b>		<b>M</b>		<b>M</b>	
1361,48	944,76	1966,13	1577,24	2506,77	2024,79
<b>D</b>		<b>D</b>		<b>D</b>	
14,20	7,29	6,19	11,82	45,34	11,18

Tabela C28. 1 Curva 16,5D 90°

700 rpm		950 rpm		1200 rpm	
Pitot (m <sup>3</sup> /h)	MUV (m <sup>3</sup> /h)	Pitot (m <sup>3</sup> /h)	MUV (m <sup>3</sup> /h)	Pitot (m <sup>3</sup> /h)	MUV (m <sup>3</sup> /h)
1449,26	947,15	2008,84	1557,24	2568,94	2042,52
1442,92	947,15	2035,85	1629,88	2568,94	2097,37
1393,36	957,36	2026,43	1603,07	2580,02	2035,59
1393,36	947,95	2026,43	1609,21	2588,82	2083,78
1440,53	947,95	2029,70	1594,32	2588,82	2066,06
1453,59	962,12	2015,13	1599,37	2541,65	2086,75
1451,41	968,98	2015,13	1571,70	2551,64	2076,21
1451,41	966,30	2033,89	1612,13	2566,70	2066,22
1442,62	966,30	2018,20	1593,81	2566,70	2071,06
1420,36	961,39	2029,27	1577,06	2586,46	2052,63
1420,36	959,48	2029,27	1554,21	2591,24	2097,66
<b>M</b>		<b>M</b>		<b>M</b>	
1432,65	957,46	2024,38	1591,09	2572,72	2070,53
<b>D</b>		<b>D</b>		<b>D</b>	
22,53	8,51	8,70	23,63	16,17	20,72

Tabela C29. 1 Curva 16,5D 135°

700 rpm		950 rpm		1200 rpm	
Pitot (m <sup>3</sup> /h)	MUV (m <sup>3</sup> /h)	Pitot (m <sup>3</sup> /h)	MUV (m <sup>3</sup> /h)	Pitot (m <sup>3</sup> /h)	MUV (m <sup>3</sup> /h)
1402,62	939,90	1952,96	1592,07	2376,75	2088,81
1445,11	939,90	1952,96	1553,70	2376,75	2075,91
1434,07	954,32	1952,96	1548,81	2552,45	2087,53
1434,07	959,29	2001,14	1569,65	2537,44	2069,13
1451,72	959,29	2005,86	1578,21	2537,44	2053,58
1436,20	972,05	2005,86	1584,03	2514,65	2024,57
1453,90	958,00	1997,98	1569,20	2549,86	2095,62
1453,90	950,80	2013,82	1578,67	2549,72	2074,00
1449,41	950,80	2015,34	1586,89	2549,72	2002,39
1427,38	958,18	2015,34	1580,27	2522,20	2033,97
1427,38	941,10	1913,44	1561,12	2543,66	2006,41
<b>M</b>		<b>M</b>		<b>M</b>	
1437,80	953,06	1984,33	1572,97	2510,06	2055,63
<b>D</b>		<b>D</b>		<b>D</b>	
15,45	9,95	34,88	13,84	66,98	33,68

Tabela C30. 1 Curva 16,5D 180°

700 rpm		950 rpm		1200 rpm	
Pitot (m <sup>3</sup> /h)	MUV (m <sup>3</sup> /h)	Pitot (m <sup>3</sup> /h)	MUV (m <sup>3</sup> /h)	Pitot (m <sup>3</sup> /h)	MUV (m <sup>3</sup> /h)
1455,93	947,22	2011,37	1541,39	2559,98	1981,84
1438,23	952,69	2008,41	1589,92	2582,01	2078,83
1438,08	952,69	2052,55	1563,59	2588,76	2099,00
1394,91	970,53	2052,55	1561,32	2583,81	2076,23
1446,81	960,78	2025,47	1555,93	2583,81	2069,06
1446,81	960,78	2019,14	1607,35	2576,13	2037,07
1440,14	977,50	2019,03	1591,56	2569,96	2099,27
1429,00	948,53	2019,03	1589,40	2569,96	2084,37
1431,15	964,13	2006,42	1574,20	2589,81	2079,61
1431,15	964,13	1995,16	1540,05	2593,70	2069,53
1415,32	943,97	1995,05	1536,35	2583,81	2046,55
<b>M</b>		<b>M</b>		<b>M</b>	
1433,41	958,45	2018,56	1568,28	2580,16	2065,58
<b>D</b>		<b>D</b>		<b>D</b>	
16,72	10,41	19,40	24,04	10,12	33,62

Tabela C31. 1 Curva 12,4D 0°

700 rpm		950 rpm		1200 rpm	
Pitot (m <sup>3</sup> /h)	MUV (m <sup>3</sup> /h)	Pitot (m <sup>3</sup> /h)	MUV (m <sup>3</sup> /h)	Pitot (m <sup>3</sup> /h)	MUV (m <sup>3</sup> /h)
1319,82	890,46	1995,23	1382,51	2346,60	1993,62
1429,84	895,15	1995,23	1381,29	2346,60	2008,53
1416,19	890,96	2006,29	1381,29	2551,48	1991,08
1416,19	902,58	2004,75	1370,87	2547,65	1965,45
1432,00	902,58	2001,56	1373,01	2545,36	1956,06
1429,77	892,50	2001,56	1383,21	2545,36	1984,19
1429,77	889,87	1988,46	1383,21	2552,83	1965,09
1423,00	889,87	2001,46	1387,35	2552,83	1939,29
1420,39	882,16	2001,46	1396,66	2552,83	1985,43
1429,92	886,82	1991,77	1396,66	2552,83	1994,89
1429,92	893,85	1995,02	1390,92	2552,83	1967,73
<b>M</b>		<b>M</b>		<b>M</b>	
1416,07	892,44	1998,44	1384,27	2513,38	1977,39
<b>D</b>		<b>D</b>		<b>D</b>	
32,46	6,09	5,62	8,31	82,51	20,32

Tabela C32. 1 Curva 12,4D 45°

700 rpm		950 rpm		1200 rpm	
Pitot (m <sup>3</sup> /h)	MUV (m <sup>3</sup> /h)	Pitot (m <sup>3</sup> /h)	MUV (m <sup>3</sup> /h)	Pitot (m <sup>3</sup> /h)	MUV (m <sup>3</sup> /h)
1408,55	893,29	1995,35	1398,85	2552,14	1951,00
1419,85	888,73	1992,10	1398,85	2552,14	2014,99
1419,85	891,67	2001,44	1378,78	2549,78	1990,85
1426,73	891,67	2001,44	1379,84	2553,62	1995,90
1417,52	893,28	1993,34	1379,84	2553,62	1996,99
1417,52	896,03	1993,44	1399,67	2540,87	1971,84
1428,74	896,03	2003,13	1393,41	2533,09	1995,85
1424,56	894,35	2003,13	1394,75	2539,52	1994,98
1422,02	898,27	1999,89	1394,75	2539,52	1989,10
1422,02	892,83	1995,46	1395,54	2520,50	2014,21
1417,52	892,83	1995,46	1391,95	2539,65	1959,12
<b>M</b>		<b>M</b>		<b>M</b>	
1420,44	893,54	1997,65	1391,48	2543,13	1988,62
<b>D</b>		<b>D</b>		<b>D</b>	
5,46	2,58	4,19	8,06	10,41	20,34

Tabela C33. 1 Curva 12,4D 90°

700 rpm		950 rpm		1200 rpm	
Pitot (m <sup>3</sup> /h)	MUV (m <sup>3</sup> /h)	Pitot (m <sup>3</sup> /h)	MUV (m <sup>3</sup> /h)	Pitot (m <sup>3</sup> /h)	MUV (m <sup>3</sup> /h)
1414,55	887,71	1967,70	1380,91	2393,01	1927,97
1402,83	887,71	1959,55	1365,31	2541,90	1931,45
1416,82	890,28	1959,55	1347,50	2542,04	2005,44
1416,82	898,02	1969,17	1347,50	2542,04	1967,41
1398,48	898,02	1986,03	1364,59	2542,17	1977,79
1407,60	878,54	1974,55	1379,30	2507,73	1989,32
1395,67	901,00	1974,55	1371,01	2538,51	1986,09
1395,67	861,40	1972,88	1371,01	2538,51	1999,70
1388,93	861,40	1971,11	1380,30	2515,28	1987,20
1377,29	877,89	1971,11	1395,87	2533,28	1976,54
1377,29	871,38	1984,00	1395,87	2533,28	1960,23
<b>M</b>		<b>M</b>		<b>M</b>	
1399,27	883,03	1971,84	1372,65	2520,70	1973,56
<b>D</b>		<b>D</b>		<b>D</b>	
14,25	14,10	8,32	16,24	43,90	25,27

Tabela C34. 1 Curva 12,4D 135°

700 rpm		950 rpm		1200 rpm	
Pitot (m <sup>3</sup> /h)	MUV (m <sup>3</sup> /h)	Pitot (m <sup>3</sup> /h)	MUV (m <sup>3</sup> /h)	Pitot (m <sup>3</sup> /h)	MUV (m <sup>3</sup> /h)
1400,44	887,12	1992,05	1386,85	2365,30	1958,64
1409,58	872,69	1992,05	1397,54	2545,87	2016,46
1409,58	922,17	1990,38	1397,54	2548,39	1990,03
1420,92	922,17	1993,76	1416,32	2548,39	2016,29
1413,98	909,69	1993,76	1522,59	2526,68	1997,02
1418,81	884,70	1985,54	1523,81	2532,96	1992,06
1418,81	895,22	1967,35	1528,81	2508,38	1949,29
1402,59	895,22	1965,77	1519,45	2508,38	1943,86
1402,66	914,26	1965,77	1492,73	2522,59	1954,76
1402,66	885,11	1977,33	1527,89	2513,54	1976,43
1404,95	885,11	1960,76	1486,97	2541,81	1987,88
<b>M</b>		<b>M</b>		<b>M</b>	
1409,54	897,59	1980,41	1472,77	2514,75	1980,25
<b>D</b>		<b>D</b>		<b>D</b>	
7,54	16,89	13,22	59,94	51,88	25,69

Tabela C35. 1 Curva 12,4D 180°

700 rpm		950 rpm		1200 rpm	
Pitot (m <sup>3</sup> /h)	MUV (m <sup>3</sup> /h)	Pitot (m <sup>3</sup> /h)	MUV (m <sup>3</sup> /h)	Pitot (m <sup>3</sup> /h)	MUV (m <sup>3</sup> /h)
1416,25	908,12	1815,51	1354,99	2345,64	1896,15
1418,46	908,12	1989,74	1351,61	2307,68	1941,03
1407,03	875,54	1989,74	1350,15	2326,24	1911,60
1407,03	863,18	1989,63	1350,15	2305,33	2005,14
1434,53	863,18	1991,31	1344,47	2305,33	1972,76
1421,10	880,85	1989,94	1346,14	2325,14	1927,22
1421,03	904,93	1989,94	1347,12	2537,92	1963,90
1421,03	880,64	1999,87	1347,12	2537,92	1954,24
1407,03	880,64	2002,89	1331,92	2537,92	1920,32
1409,17	857,00	2002,89	1367,40	2525,16	1914,11
1409,17	861,75	1996,37	1367,40	2522,60	1940,13
<b>M</b>		<b>M</b>		<b>M</b>	
1415,62	880,36	1977,98	1350,77	2416,08	1940,60
<b>D</b>		<b>D</b>		<b>D</b>	
8,71	19,11	54,16	10,08	111,97	31,68

Tabela C36. 1 Curva 4,1D 0°

700 rpm		950 rpm		1200 rpm	
Pitot (m <sup>3</sup> /h)	MUV (m <sup>3</sup> /h)	Pitot (m <sup>3</sup> /h)	MUV (m <sup>3</sup> /h)	Pitot (m <sup>3</sup> /h)	MUV (m <sup>3</sup> /h)
1440,60	852,42	2005,88	1316,27	2620,86	1922,92
1449,44	852,42	2005,88	1330,71	2612,28	1902,07
1416,00	843,67	2013,65	1330,71	2606,62	1937,55
1449,52	854,49	2031,40	1302,74	2601,72	1884,79
1449,52	861,86	2031,40	1325,92	2601,72	1887,76
1460,60	861,86	2012,55	1325,92	2594,44	1919,71
1454,10	889,49	2046,61	1316,76	2569,24	1935,80
1434,51	874,08	2023,02	1294,72	2569,24	1938,88
1434,51	851,05	2023,02	1308,64	2587,72	1944,05
1407,53	851,05	2043,37	1308,64	2521,55	1935,78
1436,57	859,33	2041,76	1325,38	2586,68	1896,82
<b>M</b>		<b>M</b>		<b>M</b>	
1439,35	859,25	2025,32	1316,95	2588,37	1918,74
<b>D</b>		<b>D</b>		<b>D</b>	
16,10	12,81	14,80	12,02	27,48	22,07

Tabela C37. 1 Curva 4,1D 45°

700 rpm		950 rpm		1200 rpm	
Pitot (m <sup>3</sup> /h)	MUV (m <sup>3</sup> /h)	Pitot (m <sup>3</sup> /h)	MUV (m <sup>3</sup> /h)	Pitot (m <sup>3</sup> /h)	MUV (m <sup>3</sup> /h)
1459,00	889,27	2044,55	1334,27	2447,35	1990,92
1461,45	889,27	2040,15	1334,27	2603,22	1998,27
1450,13	854,40	2046,41	1319,31	2603,22	1929,68
1445,89	859,91	2046,41	1349,32	2580,79	2006,53
1445,89	838,20	2038,40	1349,32	2599,21	1944,96
1458,92	838,20	2033,77	1351,31	2611,58	1978,34
1467,66	868,68	2047,69	1356,88	2611,58	1984,32
1467,66	865,61	2047,69	1354,40	2607,86	1970,56
1463,39	865,61	2043,16	1354,40	2607,86	1902,21
1366,10	870,74	2041,65	1341,86	2607,86	1909,71
1333,28	858,76	2041,65	1345,89	2590,74	1957,95
<b>M</b>		<b>M</b>		<b>M</b>	
1438,12	863,51	2042,87	1344,66	2588,30	1961,22
<b>D</b>		<b>D</b>		<b>D</b>	
44,99	16,78	4,33	11,38	47,67	35,53

Tabela C38. 1 Curva 4,1D 90°

700 rpm		950 rpm		1200 rpm	
Pitot (m <sup>3</sup> /h)	MUV (m <sup>3</sup> /h)	Pitot (m <sup>3</sup> /h)	MUV (m <sup>3</sup> /h)	Pitot (m <sup>3</sup> /h)	MUV (m <sup>3</sup> /h)
1390,20	934,46	2006,42	1456,57	2478,43	2036,59
1390,20	940,54	2027,13	1526,10	2554,84	2065,80
1457,74	940,54	2009,84	1495,73	2572,35	2100,36
1431,07	928,57	1974,47	1512,19	2572,35	2115,63
1413,07	922,90	1974,47	1490,68	2575,21	2120,29
1413,07	915,06	1958,32	1471,25	2588,76	2064,63
1417,41	915,06	2008,41	1490,17	2588,76	1869,74
1424,26	901,96	2008,41	1443,00	2568,90	2015,03
1424,26	960,35	1918,69	1480,96	2542,79	2080,03
1410,90	960,35	1940,19	1462,01	2588,76	2040,45
1305,15	969,42	1842,15	1440,20	2588,76	1988,68
<b>M</b>		<b>M</b>		<b>M</b>	
1407,03	935,38	1969,86	1478,99	2565,45	2045,20
<b>D</b>		<b>D</b>		<b>D</b>	
38,58	21,46	54,01	27,42	32,52	71,16

Tabela C39. 1 Curva 4,1D 135°

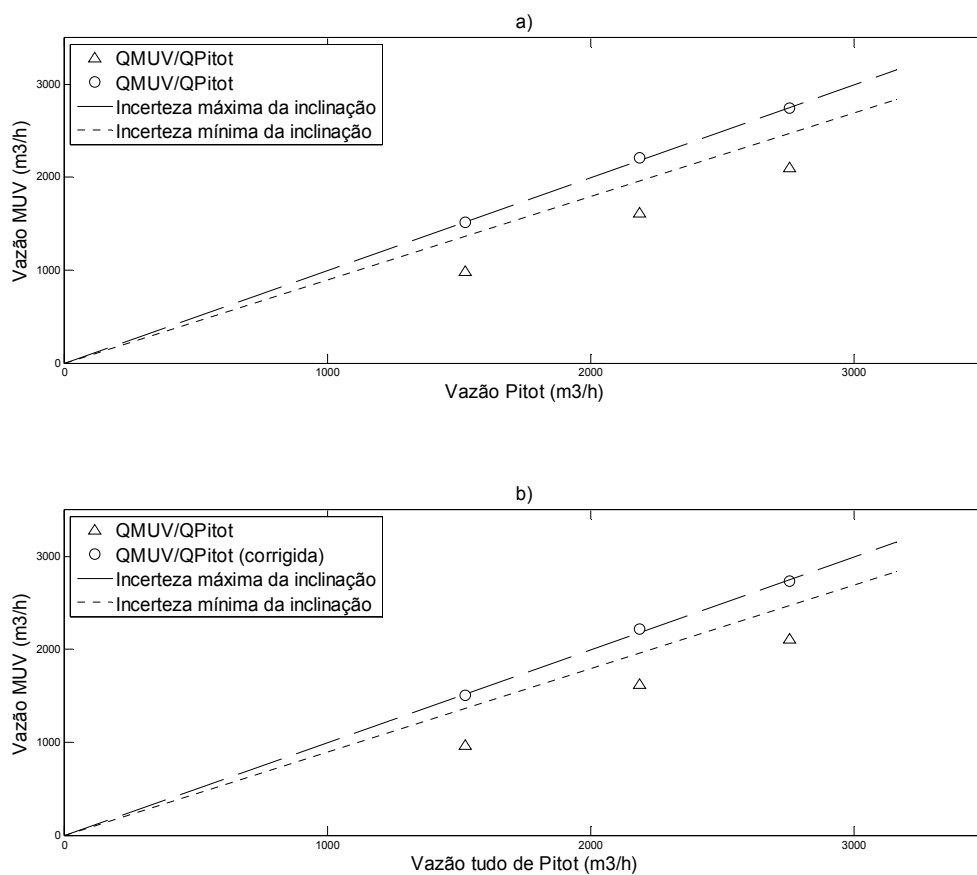
700 rpm		950 rpm		1200 rpm	
Pitot (m <sup>3</sup> /h)	MUV (m <sup>3</sup> /h)	Pitot (m <sup>3</sup> /h)	MUV (m <sup>3</sup> /h)	Pitot (m <sup>3</sup> /h)	MUV (m <sup>3</sup> /h)
1458,58	924,95	2045,20	1465,61	2470,49	2025,69
1451,88	924,95	2045,20	1505,97	2470,49	2087,20
1420,91	958,62	2043,69	1441,12	2459,24	2010,62
1420,91	922,04	2043,91	1537,36	2471,95	1984,91
1463,22	922,04	2048,67	1512,99	2471,95	2034,19
1429,90	994,29	2048,67	1485,65	2609,70	2049,87
1434,20	940,46	2053,42	1512,69	2604,78	2058,46
1434,20	926,64	2051,67	1592,77	2614,19	2026,89
1465,24	926,64	2051,67	1514,30	2614,19	1970,08
1456,39	900,55	2029,50	1493,47	2608,18	2040,08
1456,39	923,27	2051,56	1498,53	2592,36	1981,73
<b>M</b>		<b>M</b>		<b>M</b>	
1444,71	933,13	2046,65	1505,49	2544,32	2024,52
<b>D</b>		<b>D</b>		<b>D</b>	
16,89	24,63	6,66	38,91	72,59	35,53

Tabela C40. 1 Curva 4,1D 180°

700 rpm		950 rpm		1200 rpm	
Pitot (m <sup>3</sup> /h)	MUV (m <sup>3</sup> /h)	Pitot (m <sup>3</sup> /h)	MUV (m <sup>3</sup> /h)	Pitot (m <sup>3</sup> /h)	MUV (m <sup>3</sup> /h)
1452,72	899,15	2038,54	1322,84	2459,86	1928,79
1452,72	867,98	2043,28	1316,86	2459,86	1822,04
1448,15	867,98	2043,28	1312,36	2380,83	1925,23
1445,95	857,75	2032,27	1312,36	2592,53	1957,47
1445,95	854,13	2037,04	1325,84	2603,38	1827,22
1443,76	854,13	2035,28	1298,63	2603,38	1882,41
1434,90	881,57	2035,28	1297,02	2584,90	1767,74
1403,36	898,11	2041,64	1297,02	2590,10	1949,31
1403,36	891,88	2037,14	1320,81	2590,10	1913,94
1439,24	891,88	2037,14	1322,35	2587,74	1889,51
1443,84	936,36	2038,54	1322,35	2582,47	1921,15
<b>M</b>		<b>M</b>		<b>M</b>	
1437,63	881,90	2038,13	1313,50	2548,65	1889,53
<b>D</b>		<b>D</b>		<b>D</b>	
17,72	24,98	3,46	11,08	76,99	59,94

#### 8.4. Anexo D: Correção de Zero e de ganho

Nas Figuras D1a-e, D2a-e, D3a-e e D4a-e estão ilustradas as correções de zero e de ganho efetuadas na configuração de montagem 1 curva a 28D, 16,5D, 12,4D e 4,1D nas diferentes rotações do soprador, 700, 950 e 1200 rpm, abordando todos os ângulos de emissão do MUV estudados nesse trabalho, conforme mencionado na secção 5.3.2.





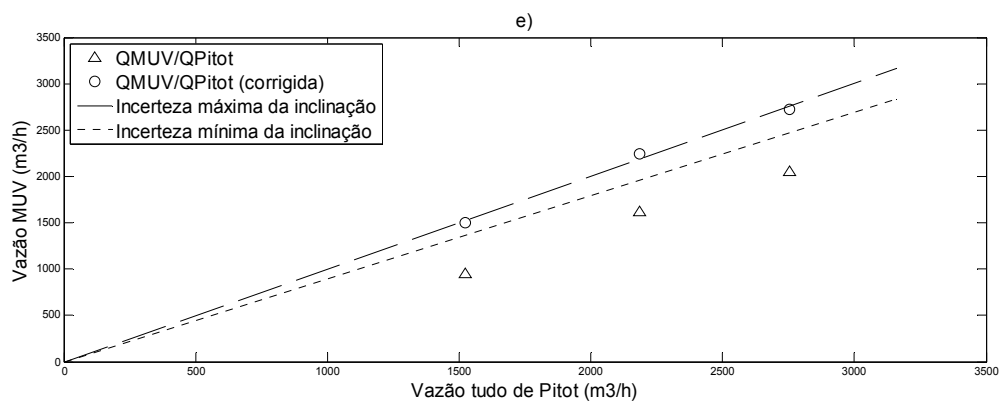
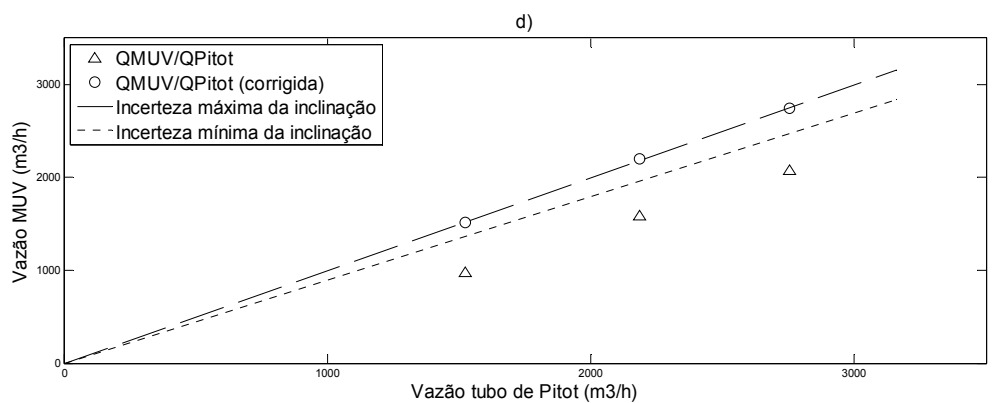
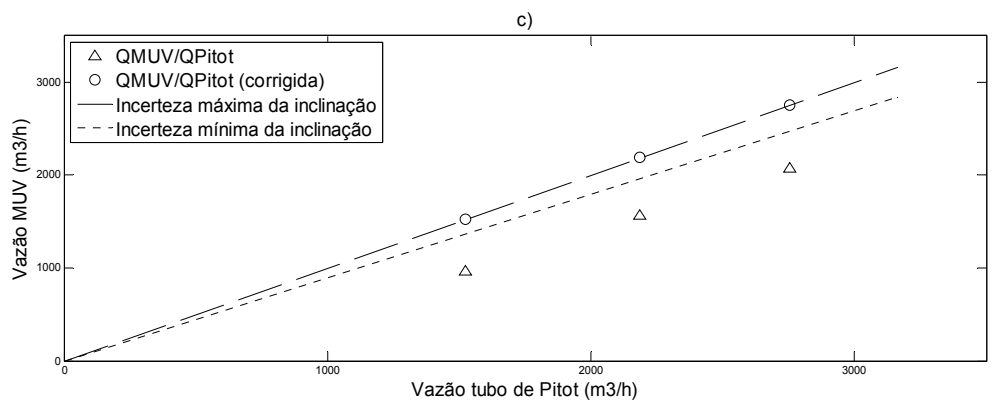
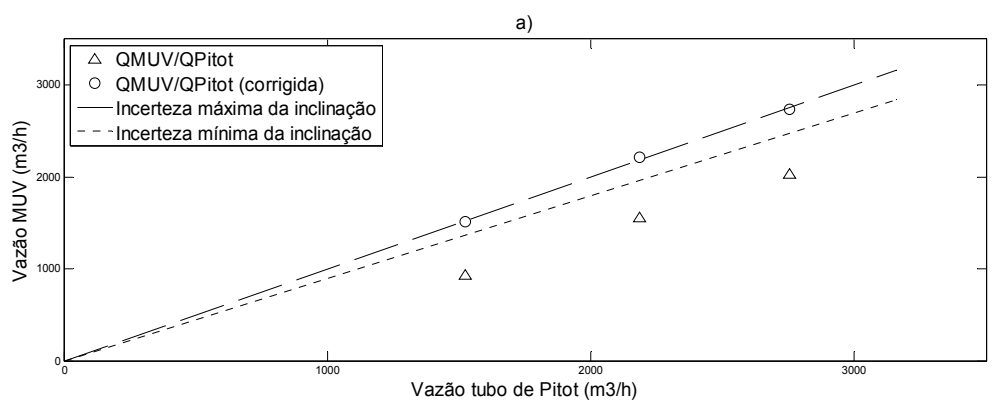


Figura D1a-e: a) 28D a 0°, b) 28D a 45°, c) 28D a 90°, d) 28D a 135°, e) 28D a 180°



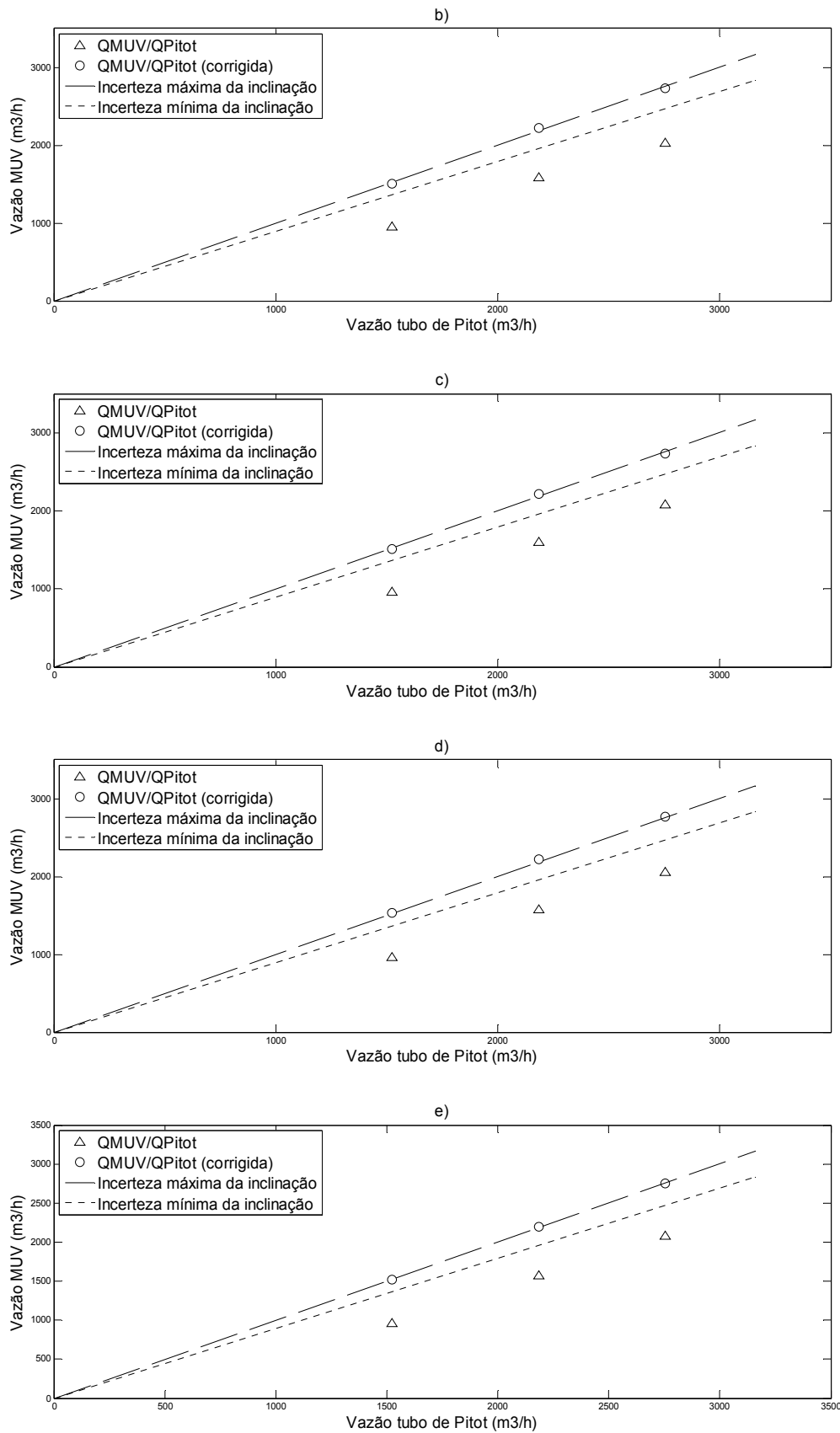
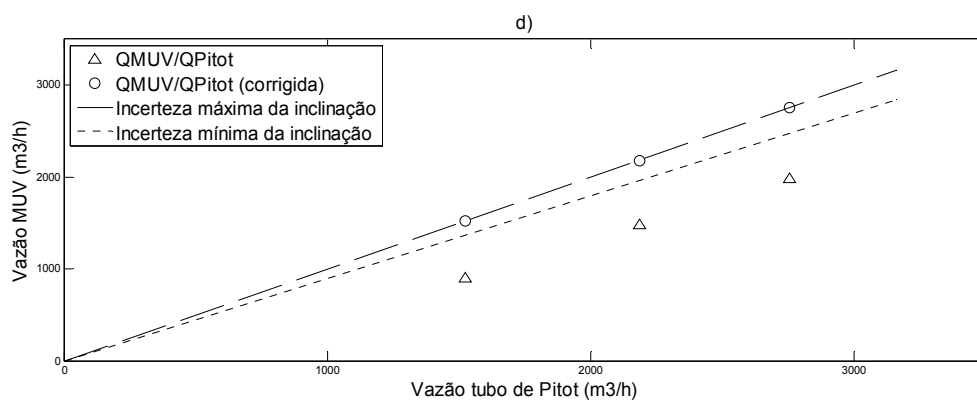
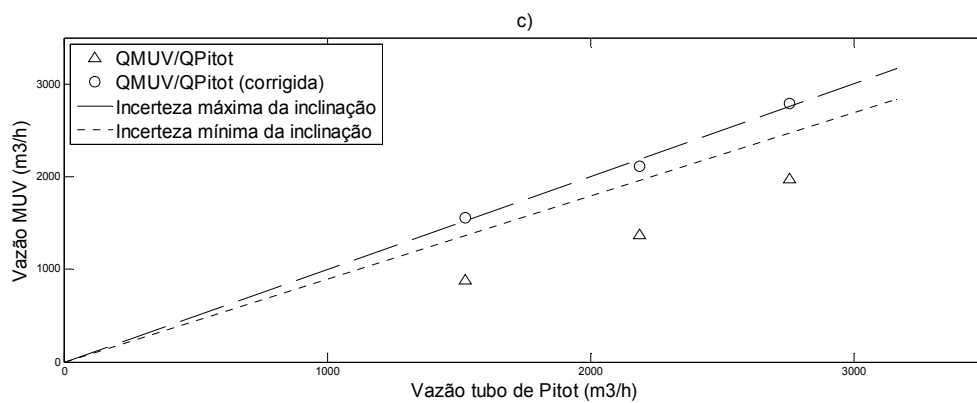
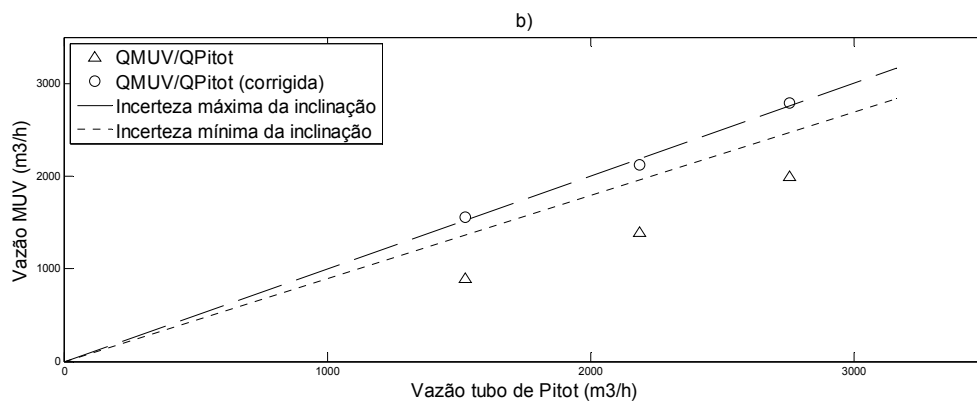
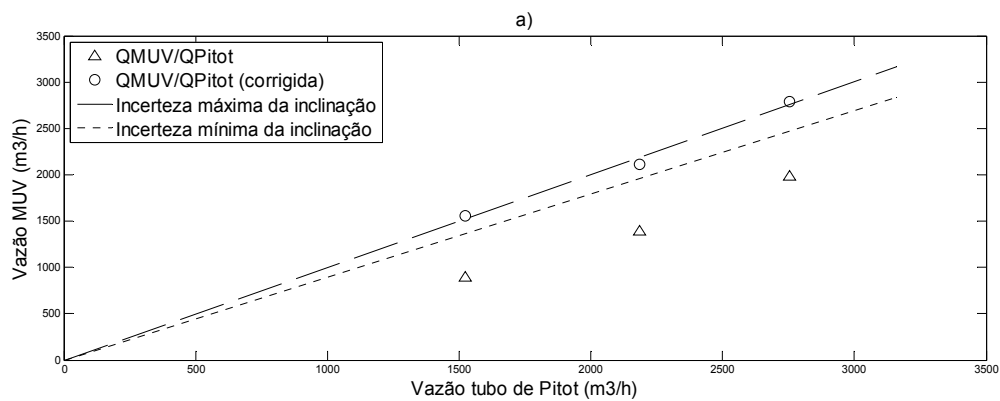


Figura D2a-e: a) 16,5D a 0°, b) 16,5D a 45°, c) 16,5D a 90°, d) 16,5D a 135°, e) 16,5D a 180°



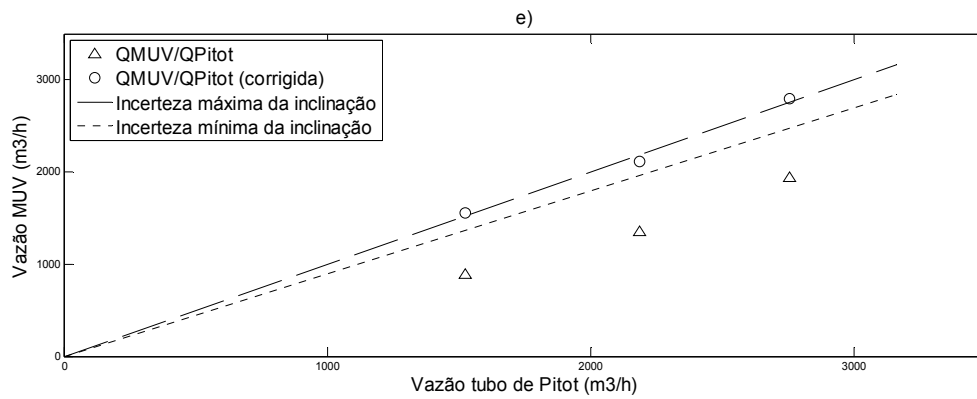
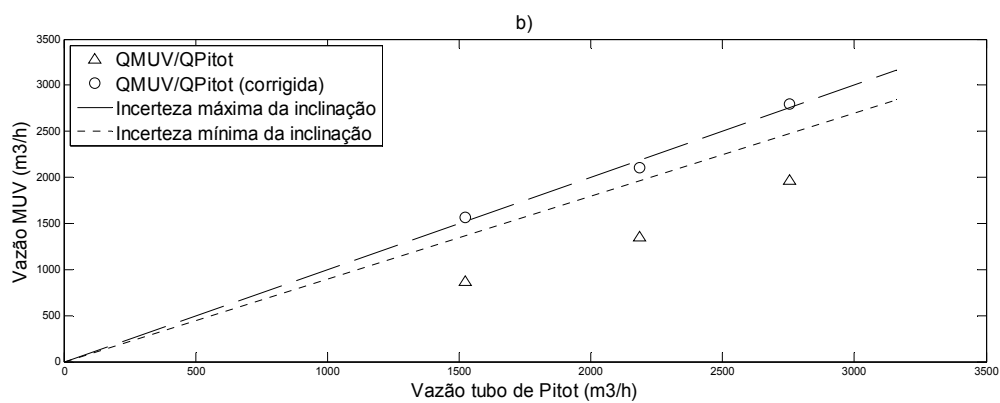
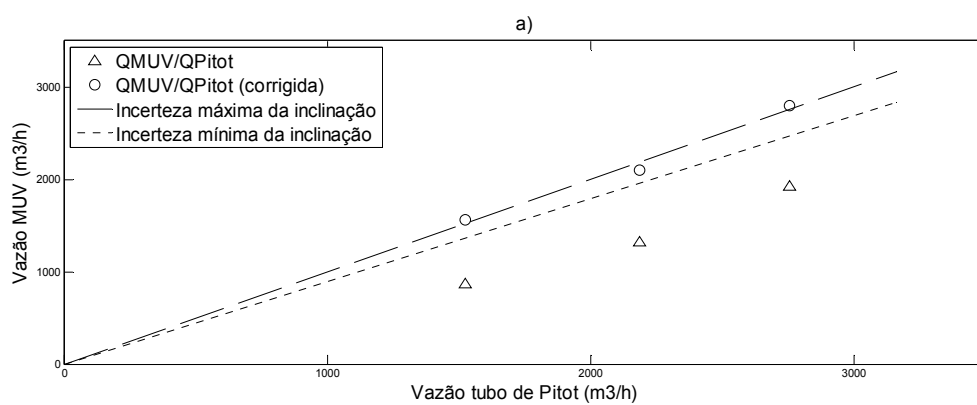


Figura D3a-e: a) 12,4D a 0°, b) 12,4D a 45°, c) 12,4D a 90°, d) 12,4D a 135°, e) 12,4D a 180°



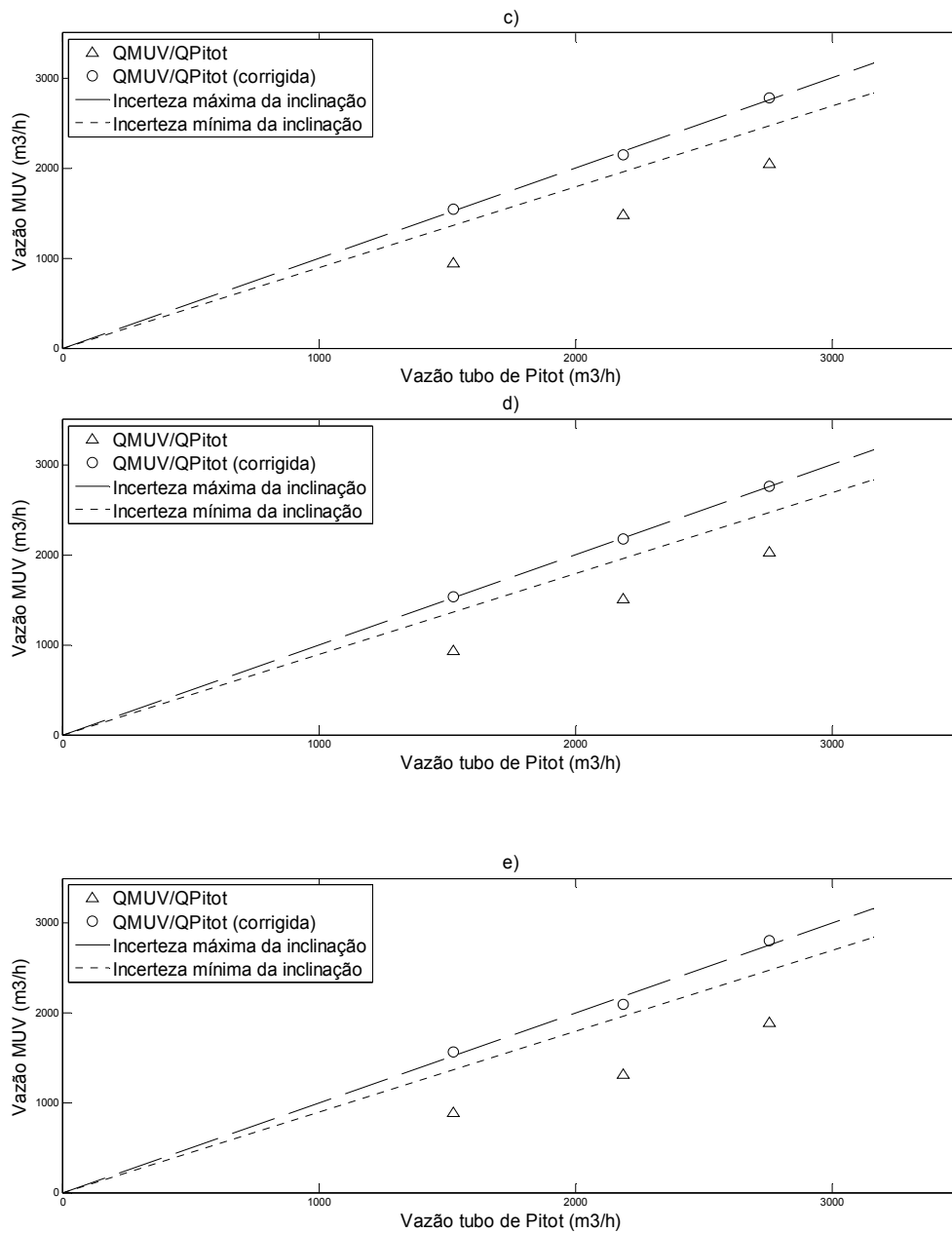


Figura D4a-e: a) 4,1D a 0°, b) 4,1D a 45°, c) 4,1D a 90°, d) 4,1D a 135°, e) 4,1D a 180°