

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

CENTRO TECNOLÓGICO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

TÁSSIO FIGUEIRA SANTANA

**PROCEDIMENTO PARA CALIBRAÇÃO DE TUBO DE PITOT NÃO
NORMATIZADO**

VITÓRIA

2014

TÁSSIO FIGUEIRA SANTANA

**PROCEDIMENTO PARA CALIBRAÇÃO DE TUBO DE PITOT NÃO
NORMATIZADO**

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Rogério Ramos

VITÓRIA

2014

TÁSSIO FIGUEIRA SANTANA

**PROCEDIMENTO PARA CALIBRAÇÃO DE TUBO DE PITOT NÃO
NORMATIZADO**

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovada em 18 de dezembro de 2014.

COMISSÃO EXAMINADORA

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

Prof. Me. Marcelo Aiolfi Barone
Universidade Federal do Espírito Santo

Eng. Weverton Ferreira Barros
Universidade Federal do Espírito Santo

RESUMO

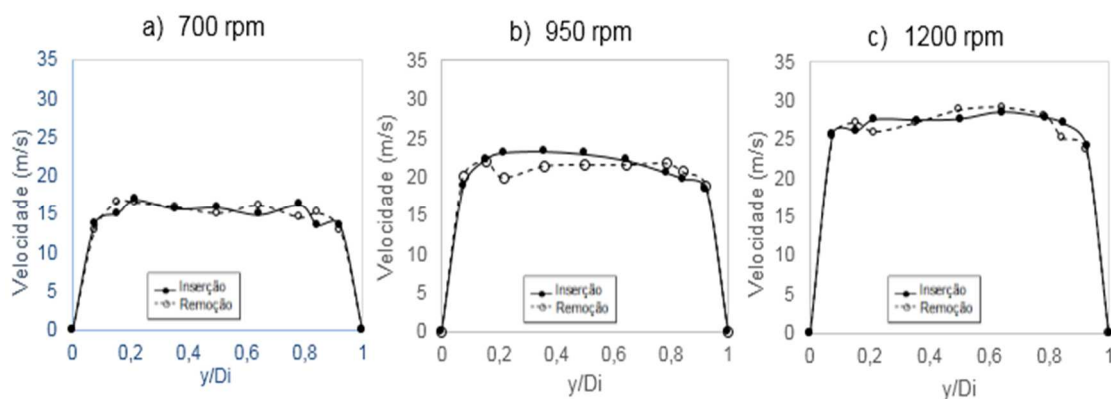
O desenvolvimento da tecnologia de medição de vazão tem aprimorado e desenvolvido os instrumentos de medição com o intuito de atender às diversas aplicações com máxima confiabilidade. Com esta evolução, os tubos de Pitot também se desenvolveram e assumiram diversas configurações diferentes, aumentando sua aplicabilidade. Porém para obtenção de confiabilidade nos resultados do instrumento de medição é necessário a calibração do medidor. O estudo apresentado se dedica à realização de um procedimento para calibração do tubo de Pitot Industrial, variação do tubo de Pitot original. Para isto foi utilizado como referência um tubo de Pitot estático normatizado em série na linha de testes do túnel de vento. Inicialmente foi caracterizado o perfil de velocidade, obtido pelo medidor de referência, pela comparação com o perfil teórico um sétimo, onde verificou-se a compatibilidade entre os perfis, visto as condições do experimento. Além disso foi avaliado o efeito intrusivo do tubo de Pitot Industrial nas leituras simultâneas do medidor de referência, onde percebe-se que as diferenças percentuais estão dentro da faixa de variação do processo sem o Pitot Industrial inserido na tubulação. Estes resultados permitem a calibração do medidor, obtendo assim, o coeficiente de descarga associada aos três números de Reynolds propostos.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Medidas Geométricas do Tubo de Pitot ITMP 120 [9].....	28
Tabela 2 Verificação de conformidade geométrica do tubo de Pitot ITMP 120 da KIMO, à ISO 3966/2008 [9]	29
Tabela 3. Medidas dos instrumentos de medição	32
Tabela 4. Dimensões da montagem utilizada nos ensaios	35
Tabela 5. Metodologia Log Linear [norma]	36
Tabela 6. Pontos de medição.....	37
Tabela 7. Parâmetros para experimento 1, (Exp. 1).....	38
Tabela 8. Limites de rejeição de Chauvenet	41
Tabela 9. Diferenças percentuais entre perfil teórico e experimental.....	44
Tabela 10. Taxa de variação da velocidade e área.....	45
Tabela 11. Diferenças percentuais entre a inserção e remoção do tubo de Pitot Industrial.....	47
Tabela 12. Taxa de variação de velocidade e área do Pitot Industrial	52
Tabela 13. Valores de velocidade média e Reynolds dos ensaios.....	53
Tabela 14. Velocidade média aferida pelo tubo de Pitot Industrial.....	53
Tabela 15. Posição associadas à velocidade média - tubo de Pitot Normalizado	53
Tabela 16. Posição associadas à velocidade média- tubo de Pitot Industrial	53
Tabela 17. Velocidades pontuais para velocidade de 700 rpm	54
Tabela 18. Velocidades pontuais para a velocidade de 950 rpm	54
Tabela 19. Velocidades pontuais para a velocidade de 1200 rpm	54
Tabela 20. Velocidades médias calculadas.....	54
Tabela 21- Vazões e coeficiente de descarga aferidos.....	55

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama esquemático de um medidor volumétrico, utilizando-se o método de medição estática.	15
Figura 2. Diagrama esquemático de um medidor volumétrico, utilizando-se método de medição dinâmica.	15
Figura 3. Diagrama de uma instalação para calibragem, por pesagem, pelo método estático. a) Através de um tanque de nível constante. b) Bombeamento direto.	16
Figura 4 Diagrama de calibração de uma instalação para calibração por pesagem pelo método dinâmico	17
Figura 5 Tipos de tubos de Pitot a) Tubo de Pitot de média ou Annubar b) Tubo de Pitot Cole c) Tubo de Pitot estático.	18
Figura 6 Esquema canônico representando corte central a um tubo de Pitot de Estático.	19
Figura 7. Desenho tubo de Pitot industrial	21
Figura 8. Representação das zonas de pressão e vórtices no tubo Pitot Industrial ..	21
Figura 9. Perfil Bullet Shape, trecho inicial do medidor do tubo de Pitot Industrial....	22
Figura 10. Conexões entre partes constituintes do túnel de vento a partir de flanges tipo macho-fêmea.....	23
Figura 11. Bocal de entrada (bell mouth) em fibra de vidro.....	24
Figura 12. Configurações do túnel de vento: (a) Tubo Reto; (b) Uma curva; (c) Duas curvas em planos ortogonais.....	24
Figura 13 Plenum.	25
Figura 14. Interface de controle do túnel de vento e aquisição de dados.	26
Figura 15. Geometria e detalhes de um tubo de Pitot de nariz elipsóidal, conforme a ISO 3966	27
Figura 16. Legenda da geometria e detalhes de um tubo de Pitot de nariz elipsoidal	28
Figura 17. Interface controle de posição do tubo de Pitot de referência.	30
Figura 18. Croqui do conjunto da instalação do tubo de Pitot Industrial.....	31
Figura 19. Buchas de redução projetadas.....	32
Figura 20. Posicionamento do tubo de Pitot Industrial	33
Figura 21. Tubo de Pitot Industrial inserido na tubulação anteriormente ao teste.....	33
Figura 22. Instalação do medidor de pressão utilizado, manômetro em U.....	34
Figura 23. Croqui da configuração utilizada para calibração do medidor. a) tubo de Pitot Industrial. b) tubo de Pitot normatizado.....	35
Figura 24. Referencial dos pontos de varredura dos tubos de Pitot.....	38
Figura 25. Comparação entre perfis de velocidade experimentais e os teóricos de referência.	44
Figura 26. Diferenças percentuais entre pontos simétricos.....	46



Figura

27. Teste de repetitividade nas rotações de teste.....	47
Figura 28. Diferença percentual entre tubo de Pitot normalizado e Industrial, a 700 rpm. Pontos a) P1, P2 e P7. b) P4, P5 e P6. c) P7, P8 e P9.	49
Figura 29. Diferença percentual entre tubo de Pitot normalizado e Industrial, a 950 rpm. Pontos a) P1, P2 e P7. b) P4, P5 e P6. c) P7, P8 e P9.	50
Figura 30. Diferença percentual entre tubo de Pitot normalizado e Industrial, a 1200 rpm. Pontos a) P1, P2 e P7. b) P4, P5 e P6. c) P7, P8 e P9.	51
Figura 31. Exp. 3. Perfis de velocidade dos medidores em a) 700 rpm b) 950 rpm..	52
Figura 32- Relação coeficiente de descarga e Reynolds	55

LISTA DE SÍMBOLOS

C_d	Coeficiente de descarga
Q_{real}	Vazão real aferida através das leituras do medidor de referência
$Q_{teórica}$	Vazão teórica aferida através das leituras do medidor sob calibração
Δp	Pressão diferencial gerada no tubo de Pitot (Pa);
ρ	Massa específica do fluido - ar atmosférico (kg/m ³);
r	Posição radial (m)
R	Raio interno do duto (m)
N	Função do número de Reynolds (adimensional)
$v(r)$	Perfil de velocidades (m/s)
d_i	Módulo da diferença entre x_i e $\bar{x}$
x_i	Medição
$\bar{x}$	Valor da média
d_{ch}	Limite de rejeição de Chauvenet

V_n	<i>Velocidade local do escoamento em um ponto de medição dado pela norma;</i>
V_{di}	Velocidade média de acordo com a norma
V_{mi}	Velocidade média obtidas por meio dos testes 1, 2, 3 e 4, do Exp. 4.
y_P	Referência de varredura do tubo de Pitot normatizado
y_{PI}	Referência de varredura do tubo de Pitot Industrial
D_i	Diâmetro da tubulação
$(y/D_i)_m$	Posição que representa a velocidade média dos perfis de velocidade
Re	Número adimensional de Reynolds
$Dif-P_i$	Diferença porcentual entre o perfil de escoamento obtido pelo medidor de referência com o Pitot Industrial na posição P_i e sem o Pitot de industrial inserido
A_{esc}	Área de escoamento transversal a tubulação
k	Coeficiente de velocidade

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
1.1	MOTIVAÇÃO	9
1.2	OBJETIVOS DO TRABALHO	12
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	13
2.1	CALIBRAÇÃO.....	13
2.2	MÉTODOS DE CALIBRAÇÃO PARA MEDIDORES DE VAZÃO.	14
2.3	FUNDAMENTOS DA PITOMETRIA	18
2.4	TUBO DE PITOT INDUSTRIAL	20
3	MONTAGENS EXPERIMENTAIS.....	23
3.1	CONFIGURAÇÃO DO TÚNEL DE VENTO	23
3.2	O TÚNEL DE VENTO.....	25
3.3	CONTROLE DA OPERAÇÃO DO TÚNEL DE VENTO	26
3.4	TUBO PITOT	27
3.4.1	CARACTERÍSTICAS DO TUBO DE PITOT	27
3.4.2	CONTROLE DO PITOT	30
3.5	TUBO DE PITOT INDUSTRIAL	31
3.5.1	CONEXÕES.....	32
3.5.2	MONTAGEM E AQUISIÇÃO DE DADOS	33
3.6	DESCRIÇÃO DA MONTAGEM DO EXPERIMENTO NO TÚNEL DE VENTO.....	34
4	METODOLOGIA DOS ENSAIOS	36
4.1	CARACTERIZAÇÃO DO PERFIL DO ESCOAMENTO DO TÚNEL.....	36
4.2	PERFIL DE VELOCIDADE	38
4.3	ANÁLISE DE INFLUENCIA DO PITOT INDUSTRIAL	39
4.4	CALIBRAÇÃO.....	39
4.5	ANÁLISE DOS DADOS	41
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	43
5.1	PERFIL DE VELOCIDADES	43

5.2	ANÁLISE DE ASSIMETRIA.....	45
5.3	TESTE DE REPETITIVIDADE	46
5.4	INFLUÊNCIA DA INSERÇÃO DO PITOT INDUSTRIAL NA LINHA DE TESTE.....	48
5.5	CALIBRAÇÃO.....	51
6	CONCLUSÃO	56
7	REFERÊNCIAS	58
8	ANEXO A.....	61
8.1	Conexões.....	61

1 INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO

A necessidade de se medir vazão surgiu quando, depois de se canalizar a água para o consumo doméstico, a administração pública descobriu uma fonte de arrecadação e estabeleceu taxas para o consumo do líquido. Isso aconteceu há muitos séculos. Segundo consta, as primeiras medições de água teriam sido executadas por egípcios e romanos, povos cujas obras de adução de água fazem parte, hoje, das ruínas turísticas de vários países europeus e do norte da África [1].

No século XX a demanda de medição de vazão de fluídos tornou-se mais presente devido ao crescimento das aplicações dos processos contínuos na indústria. Em consequência disto, foram desenvolvidos outros medidores também baseados em princípios e resultados de estudos físicos. [1]

O desenvolvimento do mercado de medição de vazão tem sido impulsionado por duas áreas em especial, indústria de processos e órgãos fiscalizadores. No contexto industrial, a maior competitividade do mercado tem levado as indústrias de processos a dispor maior investimento no controle de seus produtos de maneira a garantir máxima qualidade. Com outra perspectiva, os órgãos reguladores vêm adotando leis e medidas mais rígidas de forma que as indústrias em geral adotem medidas com a finalidade de reduzir os danos ambientais e sociais ocasionados pelo trabalho irresponsável.

Neste cenário, as tecnologias de medição de vazão tem se aprimorado a cada ano, e novos medidores de vazão tem sido criados para atender as várias condições de aplicação, como exemplo medição de gases a alta temperatura, óleos pesados, misturas bifásicas e outras. Além de novos medidores, as empresas fabricantes destes instrumentos vem desenvolvendo os seus

produtos com intuito de diminuir as incertezas de medição, devido as exigências de conhecer e melhorar as incertezas dos medidores.

Para garantir a exatidão dos medidores é necessário sua calibração. A calibração é extremamente importante, pois geralmente estão associados a transações comerciais, direta ou indiretamente. É necessário que novos medidores desenvolvidos sejam calibrados de maneira adequada, permitindo a confiabilidade das medições do instrumento.

.

1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

Desta forma, é proposto para este trabalho a realização da calibração do tubo de Pitot Industrial a partir das medições de um medidor padrão, tubo de Pitot normatizado. Além disso são listados abaixo os seguintes objetivos secundários:

- A) Usando a técnica de pitometria, caracterizar os perfis de velocidades obtido pelo tubo de Pitot de referência em cada nível de rotação, através da comparação com o perfil teórico um sétimo.
- B) Analisar a repetitividade dos ensaios, e a assimetria dos perfis de velocidade obtidos pelo tubo de Pitot normatizado.
- C) Avaliar a influência da inserção do tubo de Pitot Industrial na tubulação, no perfil de velocidade encontrado pelo medidor de referência.
- D) Analisar características do perfil de velocidade encontrado pelo tubo de Pitot Industrial.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No início da revisão bibliográfica é introduzido o conceito de calibração e suas características em um contexto geral de equipamentos para medição, e em seguida no contexto de abrangência do trabalho, medidores de vazão;

Em um segundo momento são apresentados os métodos utilizados para calibração de medidores de vazão, sua metodologia de ensaio e normas reguladoras;

Depois, é apresentado o histórico relacionado a medição de vazão, funcionamento e principais características relacionadas a tubos de Pitot;

Por fim, são descritos as características principais do tubo de Pitot Industrial, suas vantagens e desvantagens.

2.1 CALIBRAÇÃO

De acordo com o Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia (aprovado pela Portaria INMETRO Nº 029/95), calibração representa o conjunto de operações que estabelece, sob condições específicas, a relação entre os valores indicados por um instrumento de medição, sistema de medição ou valores representados por uma medida materializada ou material de referência, e os valores correspondentes às grandezas estabelecidas por padrões.

Simplificadamente, a calibração determina as características de performance de um equipamento, ou seja, a análise dos resultados de uma calibração realizada periodicamente permite conhecer as reais condições de funcionamento de um equipamento e verificar se o mesmo atende as especificações ou parâmetros estabelecidos para o uso pretendido, consequentemente, determinando sua confiabilidade.

Ao estabelecer a relação entre valores indicados pelo equipamento e os valores dos padrões tidos como valores verdadeiros convencionais, o resultado de uma calibração quantifica o erro do equipamento e permite tanto o estabelecimento dos valores do mensurando para as indicações como a determinação das correções a serem aplicadas. O resultado de uma calibração, nada mais é que o resultado de uma medição ou um conjunto destas.

No contexto de medição de vazão, a calibração visa a obtenção do grau de concordância entre a vazão real e a vazão aferida pelo medidor a ser calibrado, permitindo ao equipamento sob calibração medir com precisão conhecida. O coeficiente de descarga é um número adimensional que determina a correlação entre a vazão real calibrado e a vazão.

$$C_d = \frac{Q_{real}}{Q_{teórico}} \quad (2.0)$$

Onde, C_d representa o coeficiente de descarga, Q_{real} a vazão real obtida através das medições do medidor de referência e $Q_{teórico}$ a vazão obtida através das medições do medidor a ser calibrado.

2.2 MÉTODOS DE CALIBRAÇÃO PARA MEDIDORES DE VAZÃO.

Para a realização de calibração de medidores de vazão podem ser utilizados 3 tipos de ensaios.

a) Método Volumétrico

O método de coleta de líquido, em tanque volumétrico, pode ser dinâmico ou estático. No modo estático, a vazão é medida, para um intervalo de tempo especificado, através da subtração do volume de líquido final, do volume de líquido inicial, respectivamente, após o fechamento da válvula e antes da abertura da mesma, Figura 1. No modo dinâmico, Figura 2, o líquido escoar continuamente para o tanque, quando esse atinge um nível predeterminado o cronômetro é disparado. Quando o líquido atinge o segundo nível, e

consequentemente um determinado volume, o cronômetro é paralisado. A vazão dada pela diferença entre volumes predeterminados dividido pelo tempo indicado no cronometro. [2]

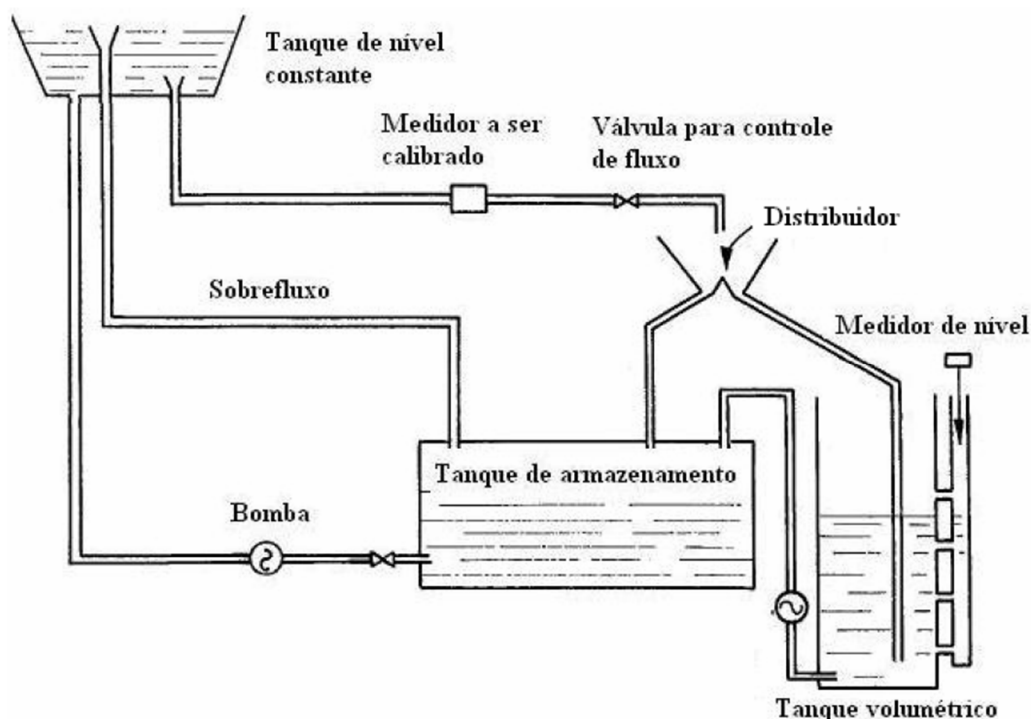


Figura 1. Diagrama esquemático de um medidor volumétrico, utilizando-se o método de medição estática.

Fonte: Norma ISSO 8316 [3].

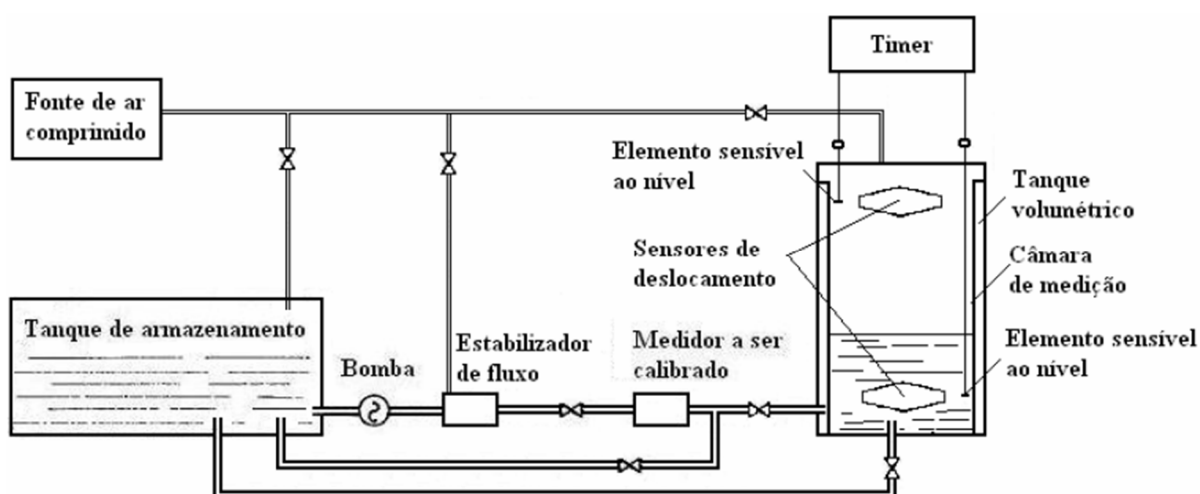


Figura 2. Diagrama esquemático de um medidor volumétrico, utilizando-se método de medição dinâmica.

Fonte: norma ISO 8316 [3]

b) Método Gravimétrico

O método gravimétrico pode ser dividido em estático e dinâmico. O método estático apresenta a opção de dois tipos de configuração, uma por reservatório de nível constante e outra por bombeamento representados na figura 3, e seu funcionamento consiste em determinar a massa do tanque mais a massa de algum líquido que restou dentro do tanque, desviar-se o fluxo, para dentro do tanque, até que a massa de líquido seja suficiente para se atingir a exatidão requerida. Operando-se a válvula de controle de fluxo, controla-se o tempo de enchimento. Obtém-se a vazão, através da massa coletada, do tempo de enchimento e da densidade do líquido, em função da temperatura. [2]

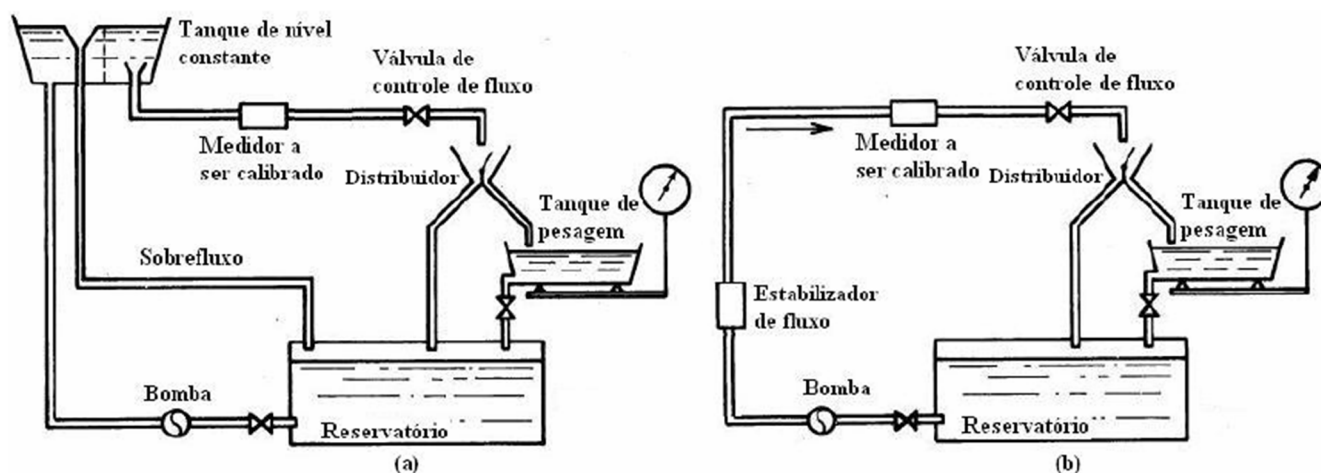


Figura 3. Diagrama de uma instalação para calibração, por pesagem, pelo método estático. a) Através de um tanque de nível constante. b) Bombeamento direto.

Fonte: Norma ISO 4185 [4]

O método dinâmico, Figura 4, consiste em se deixar o líquido ser coletado no tanque, até que se atinja uma massa pré-determinada, quando se dará o acionamento do cronômetro e em se parar o cronômetro, quando uma massa final coletada, pré-determinada, for atingida. Obtém-se a vazão, através da massa coletada, do tempo de enchimento e da densidade do líquido, em função da temperatura.

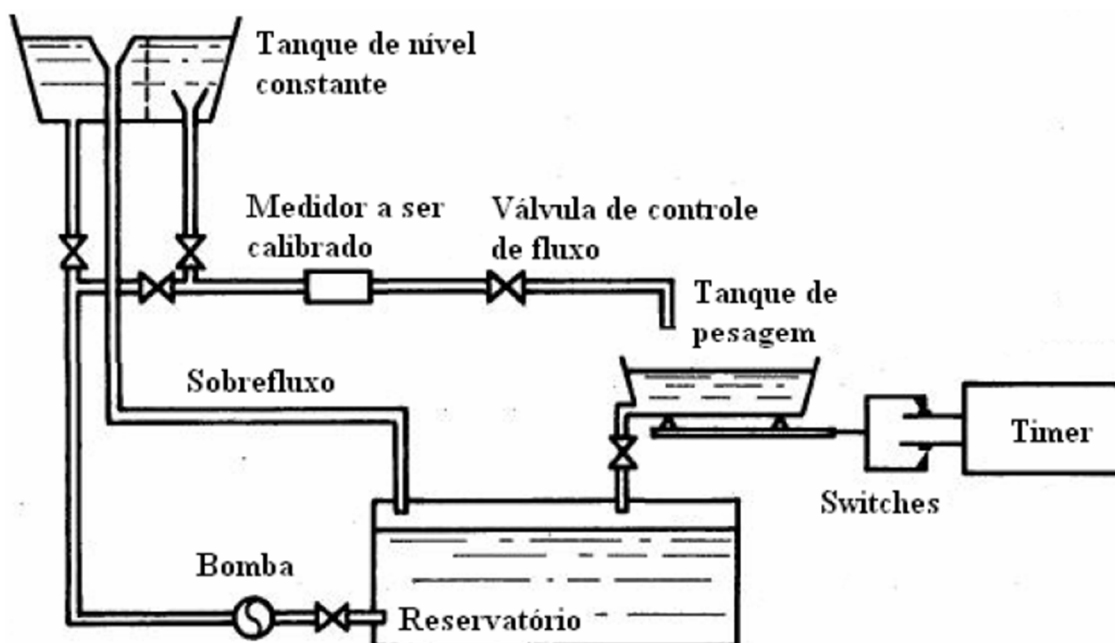


Figura 4 Diagrama de calibração de uma instalação para calibração por pesagem pelo método dinâmico

Fonte: Norma ISO 4185 [4]

c) Método do Medidor Padrão.

Nesta método é utilizado um medidor calibrado com exatidão maior do que o medidor sob calibração. O medidor sob calibração é utilizado em série afim de que a mesma vazão passe pelos dois medidores, e o medidor de referência é responsável por apresentar a vazão real.

A medição de vazão utilizando medidor calibrado deve ser realizada de acordo com métodos de escolha de pontos de medição (Log-Linear, Chebyshev, Cotas de Newton, etc.). Aplicando as velocidades medidas a princípios físicos matemáticos deduz-se a velocidade média do escoamento, e em seguida a vazão. O método para calibração utilizado neste trabalho será o método Medidor Padrão.

2.3 FUNDAMENTOS DA PITOMETRIA

Em 1732, Henri Pitot, engenheiro francês especializado em hidráulica, apresentou como solução à necessidade de medir a velocidade da água do rio Sena, um instrumento que ficou conhecido como tubo de Pitot.

O tubo de Pitot daquela época era bastante rudimentar [1]: era composto basicamente de um tubo de vidro curvado em um ângulo reto cujo sua parte vertical era mantido fora d'água, enquanto a horizontal, provido de uma geometria em forma de funil era colocado dentro da corrente d'água.

Com o avanço da tecnologia, a medição de vazão através do tubo de Pitot foi aperfeiçoada assumindo diversos tipos de configurações, Figura 5 a-c, sempre com intuito de aumentar as condições de aplicação e rangeabilidade com o máximo de exatidão. Desta forma a pitometria alcançou aplicações, como medições de correntes de líquidos ou gases, tubos fechados ou escoamentos externos, em áreas da tecnologia, como na hidráulica, aeronáutica e na indústria de petróleo e gás.

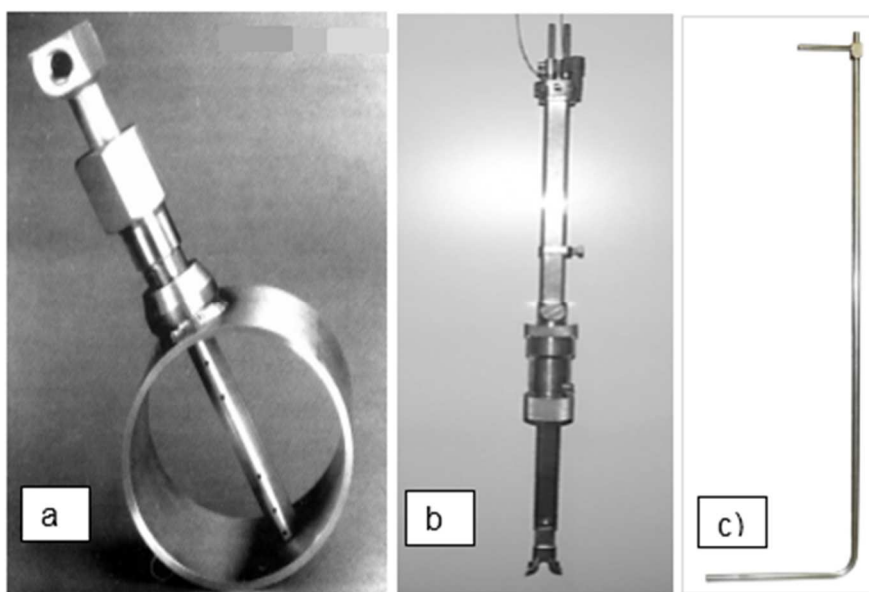


Figura 5 Tipos de tubos de Pitot a) Tubo de Pitot de média ou Annubar b) Tubo de Pitot Cole c) Tubo de Pitot estático.

Fonte: a) b) [6] c)

O Pitot que foi utilizado como referência é do tipo tradicional, denominado tubo de Pitot estático, Figura 5-c. Este instrumento possui tomadas de pressão total

e estática combinadas num só instrumento. É um instrumento constituído por dois tubos coaxiais, formando uma peça em formato de L, conforme Figura 6. [2]

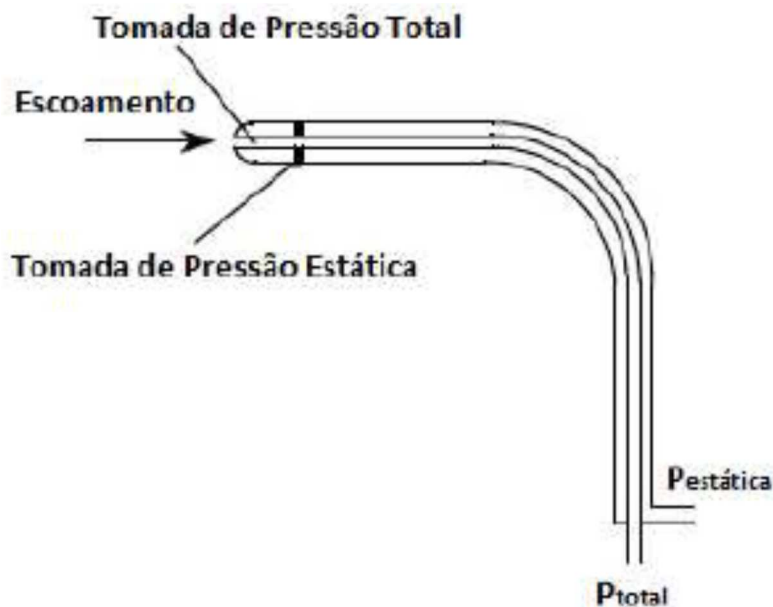


Figura 6 Esquema canônico representando corte central a um tubo de Pitot de Estático.

Fonte: [7]

A extremidade do tubo interno, colocada face à corrente, mede a pressão total, enquanto a pressão estática é medida através dos pequenos orifícios da parede do tubo externo, distantes da ponta do tubo. A pressão diferencial resultante (diferença entre a pressão total e a pressão estática) é chamada pressão dinâmica, a partir da qual é possível relacionar com a velocidade local no escoamento, equação 2.0, oriunda da equação de Bernoulli.

$$V = k \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\gamma}}$$

(2.0)

Onde, V é a velocidade local do escoamento, Δp é a diferença entre pressão total, pressão estática e γ peso específico do fluído e k o coeficiente de velocidade.

A normatização internacional ISO/FDIS 3966/2008 [8], descreve os requisitos do sensor e da metodologia para medição de vazão de fluidos em dutos fechados visando alcançar, a nível de confiança de 95%, uma incerteza na vazão não superior a $\pm 2\%$. [9]

2.4 TUBO DE PITOT INDUSTRIAL

O tubo de Pitot industrial é uma variação do tubo de Pitot estático. Possui três orifícios para tomadas de pressão sendo dois em sua lateral, para tomada de pressão estática, e um orifício frontal à corrente, para tomada da pressão total.

As características construtivas do tubo de Pitot são similares ao tubo de Pitot de média, também conhecido como Annubar, figura 5 a. Os dois medidores são compostos por uma secção reta com geometria aerodinâmica e podem ser inseridos ao longo de toda a tubulação. Porém o Annubar foi projetado com orifícios ao longo da secção de forma a fornecer a velocidade média do escoamento. Por este motivo o Annubar deve estar totalmente inserido na tubulação.

Em contra partida, o tubo de Pitot Industrial possui apenas pontos em apenas uma parte da secção do medidor, esta característica permite apenas a medição da diferença de pressão pontualmente. Na figura 7 é apresentado o desenho do tubo de Pitot Industrial onde é observado a presença de um manivela que é utilizada para inserção do medidor na tubulação

.



Figura 7. Desenho tubo de Pitot industrial

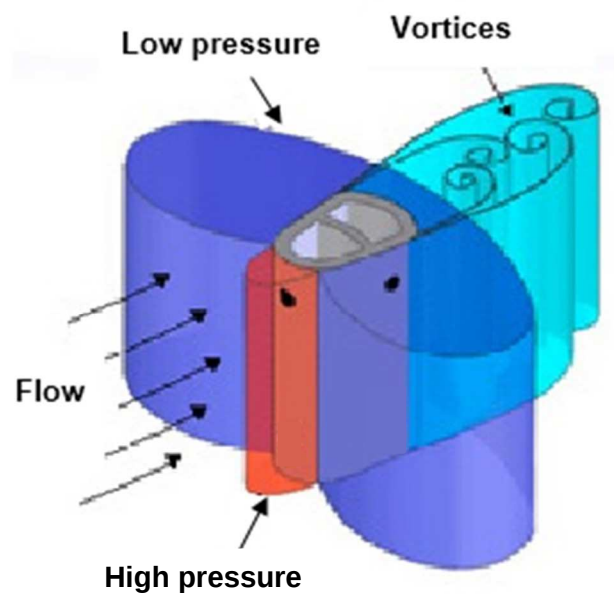


Figura 8. Representação das zonas de pressão e vórtices no tubo Pitot Industrial

Fonte: [10] modificada

O tubo de Pitot Industrial possui um formato aerodinâmico que foi desenvolvido pela indústria aeroespacial, denominado Bullet shape. Os efeitos da utilização desta geometria reduz o coeficiente de arrasto, e por consequência a sua força de arrasto e a vibração induzida, e também reduz a interferência da variação

do número de Reynolds no coeficiente de descarga, que é apresentada em medidores com outros formatos, como o cilíndrico.

Estudos vem sendo desenvolvidos para analisar a influência da mudança de geometria em tubos de Pitot em aplicações específicas.

Wecel [11], apresenta um estudo onde é realizado um estudo experimental e numérico de tubos de Pitot de média, e a influência no coeficiente de descarga. No artigo o autor analisa a influência da variação da geometria do tubo de Pitot de média na diferença de pressão gerada, e analisa qual a geometria mais apropriada para medições em baixas vazões com elevada precisão.

Kabacinski e Pospolita [12], também apresenta um estudo experimental e numérico de tubos de Pitot de média com o intuito de otimizar uma geometria com base em resultados teóricos.

No caso do tubo de Pitot Industrial utilizado o formato Bullet shape compõe os 62 mm iniciais da secção, o restante do comprimento possui geometria circular.

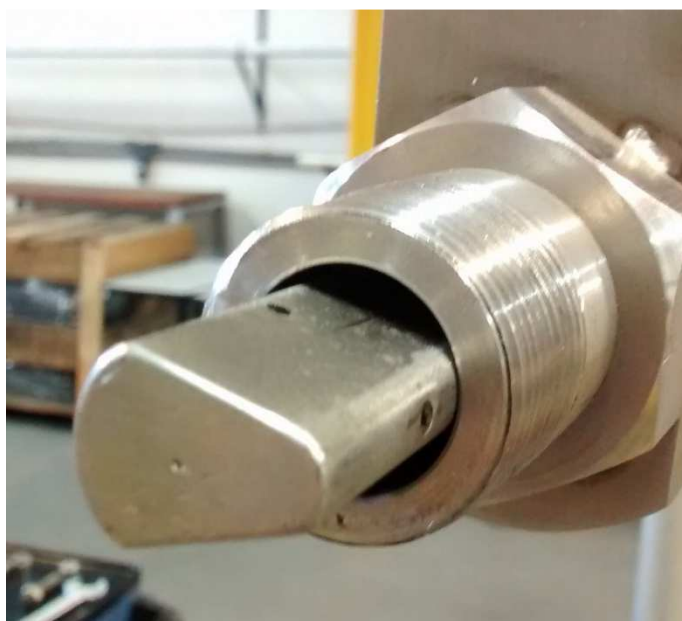


Figura 9. Perfil Bullet Shape, trecho inicial do medidor do tubo de Pitot Industrial
A aplicabilidade do tubo de Pitot Industrial se dá pelo fato do medidor possuir vantagens como a fácil instalação em linhas de tubulações quando comparado com outros medidores de vazão, o relativo baixo custo, a capacidade de operar em condições de altas temperaturas e pressão, relativa facilidade de instalação

e desinstalação do medidor da tubulação. Porém possui algumas desvantagens como aumento das incertezas com em baixos diferenciais de pressão.

3 MONTAGENS EXPERIMENTAIS

3.1 CONFIGURAÇÃO DO TÚNEL DE VENTO

O túnel de vento do Laboratório de Máquinas de Fluxo da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) é composto por um conjunto de dutos de propileno, com diferentes comprimentos, diâmetros uniformes, e curvas com diâmetro compatível com os dutos.

Em cada extremidade de tubulações encontram-se flanges de nylon com encaixe tipo macho-fêmea, Figura 10, de forma a garantir a centralização e o bom alinhamento das paredes internas, buscando eliminar a possibilidade de desalinhamentos e/ou vazamentos.



Figura 10. Conexões entre partes constituintes do túnel de vento a partir de flanges tipo macho-fêmea.

Fonte: [13]

À montante dos tubos está instalado um bocal em fibra de vidro, Figura 10, que tem como intuito de reduzir as turbulências causada pela aspiração de ar para os dutos de teste do túnel de vento. O bocal de entrada é caracterizado por uma contração do diâmetro, de 462 mm para 182 mm. Em simulações numéricas realizadas por Rebello, B., Caroni F., [14] foi constatado que o bocal de entrada atingi o objetivo de uniformizar o perfil de entrada.



Figura 11. Bocal de entrada (bell mouth) em fibra de vidro.

Fonte: [13]

O conjunto destes componentes, tubos, flanges e bocal de entrada, permite a fácil mudança na configuração para diferentes tipos de montagens, demonstrada segundo a Figura 12.

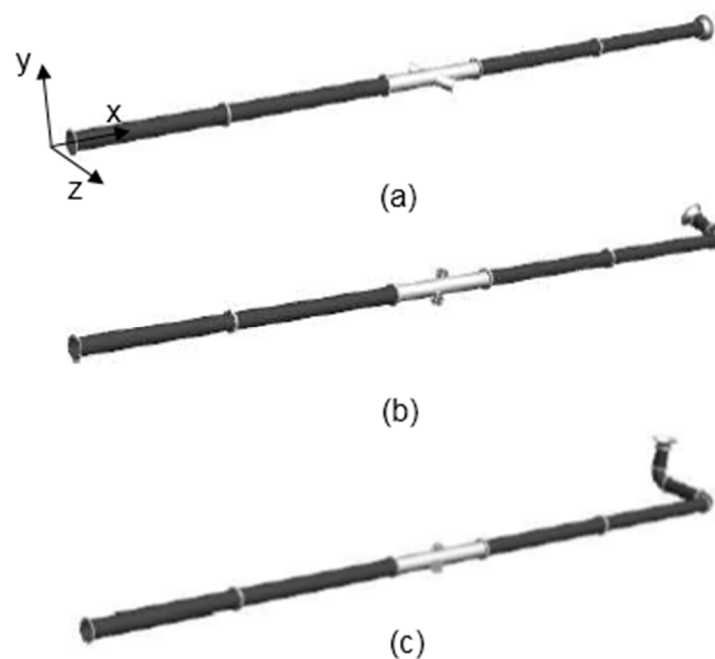


Figura 12. Configurações do túnel de vento: (a) Tubo Reto; (b) Uma curva; (c) Duas curvas em planos ortogonais

Fonte: [13]

3.2 O TÚNEL DE VENTO

O escoamento interno no túnel de vento é promovido por meio de um soprador do tipo *limit load*, de 15 HP de potência, instalado a jusante dos tubos após o *plenum*. O soprador é composto por um motor elétrico de indução e um rotor, e seu controle de rotação é realizado por um inversor de frequência, WEG modelo CFW 09.

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 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% [13].

A jusante da tubulação está instalado um colarinho de lona hermeticamente vedado que faz a conexão com o *plenum*, que por sua vez, é conectado ao soprado, Figura 13. Outra função do *plenum* é reduzir o comportamento helicoidal do escoamento promovido pelo rotor do soprador no interior dos tubos.



Figura 13 Plenum.

Fonte: [13]

3.3 CONTROLE DA OPERAÇÃO DO TÚNEL DE VENTO

O controle do túnel de vento é realizado por intermédio do *software* de projeto gráfico de sistemas *LabView®* que possui ferramentas necessárias para criar e implementar sistemas de medição e controle por meio de uma integração entre *hardware* e *software* [15]. Os parâmetros de entrada da interface de controle são visualizados na Figura 14. Com a automatização do túnel de vento, o controle da rotação pode ser feito utilizando a configuração manual, ou automática.

Na operação com a seleção de controle manual do túnel de vento, o parâmetro de controle é a rotação do motor de acionamento do soprador. Já quando a operação é no modo automático o parâmetro de controle é a velocidade aferida pelo Pitot ITPM 120. Para modo automático, o Pitot de referência deve estar na posição central do tubo.

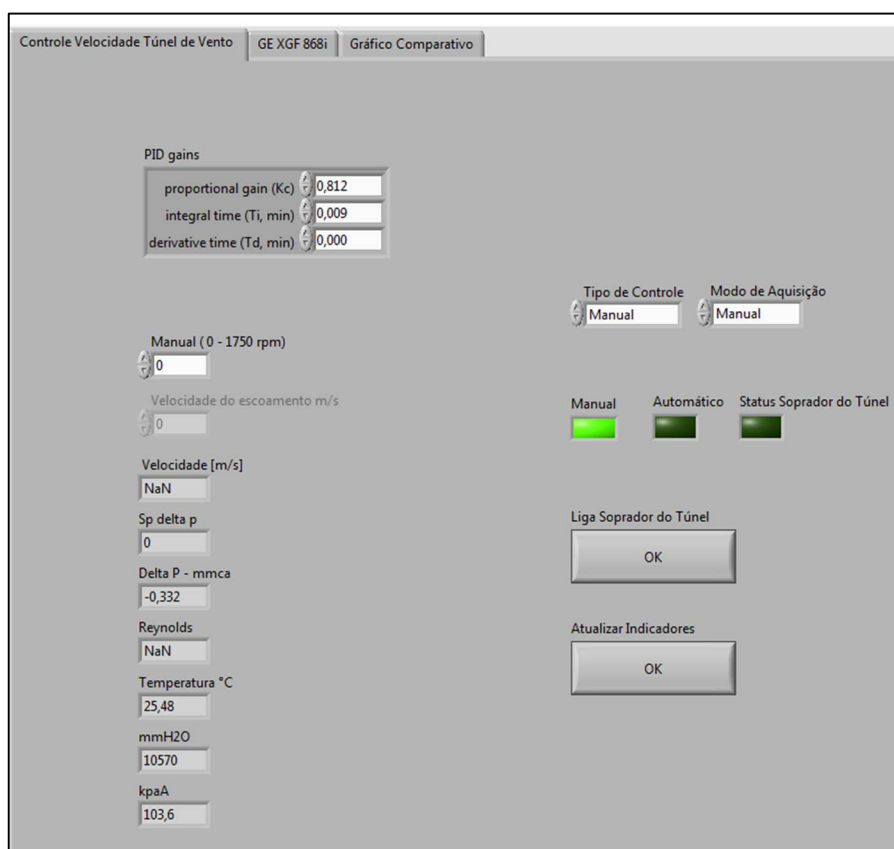


Figura 14. Interface de controle do túnel de vento e aquisição de dados.

3.4 TUBO PITOT

3.4.1 CARACTERÍSTICAS DO TUBO DE PITOT

Para atender a necessidade da utilização de um medidor de referência nos testes, foi utilizado um tubo de Pitot, conforme a Figura 15.

A norma ISO 3966 de 2008 [8] 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 figura 15, que corresponde à Figura A.2 da norma. [9]

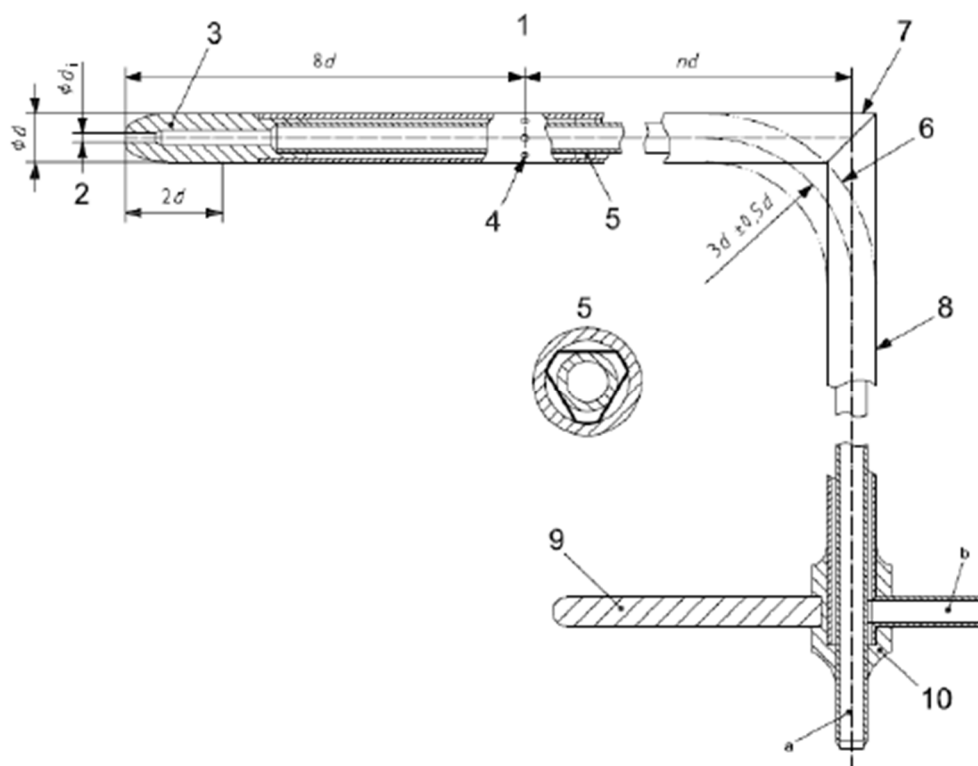


Figura 15. Geometria e detalhes de um tubo de Pitot de nariz elipsóidal, conforme a ISO 3966

Fonte: Norma ISO 3966 [8]

Onde a legenda correspondente está descrita na Figura 16 de acordo com a norma [8]:

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 16. Legenda da geometria e detalhes de um tubo de Pitot de nariz elipsoidal

Fonte. [8]

Um levantamento dimensional do Pitot, efetuado no Laboratório de Metrologia da UFES, está listado na tabela 1 e a verificação de conformidade dimensional com a norma ISO 3966 encontra-se na Tabela 2 [9].

Tabela 1. Medidas Geométricas do Tubo de Pitot ITMP 120 [9]

	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 _{haste}
4	Extensão da cabeça	86,00	L _{cabeça}
5	Extensão do nariz	15,00	L _{nariz}
6	Furos de pressão estática:		
6.1	Diâmetro dos furos	1,04	D _{furo}
6.2	Quantidade	6	N _{furo}
6.3	Distância do topo do nariz	35,85	
6.4	Distância até o eixo da haste	47,15	
7	Raio entre cabeça e haste	15,97	R
8	Braço de alinhamento	Não-existe	
9	Ângulo entre haste e nariz (em graus)	90,018°	

Tabela 2 Verificação de conformidade geométrica do tubo de Pitot ITMP 120 da KIMO, à ISO 3966/2008 [9]

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

De acordo com a norma ISO3966/2008 [8], 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). [1].

O coeficiente de descarga do Tubo de Pitot nos experimentos puderam ser considerados igual a 1 (um) pois, em todos os experimentos, foram obedecidos 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 ($Ma_{max} = 0,25$).

Sendo assim, após atestado a adequação do Pito ITPM 120 com a norma ISO 3966 de 2008, escolheu-se o tubo de Pitot como um medidor de referência, 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.

3.4.2 CONTROLE DO PITOT

O Pitot ITPM 120 tem seu posicionamento automatizado por dispositivo de controle devidamente acoplado ao Pitot. O dispositivo de controle possui interface *touchscreen*, apresentada na Figura 17, e permite ao usuário a utilização das configurações semiautomático e automática.

Na escolha de operação semiautomática permite ao usuário apenas a determinação de um posicionamento em específico, já na operação automática o usuário tem a opção de escolher o modo de varredura de vários pontos, filtros de testes, número de ciclos de medição e outros parâmetros.

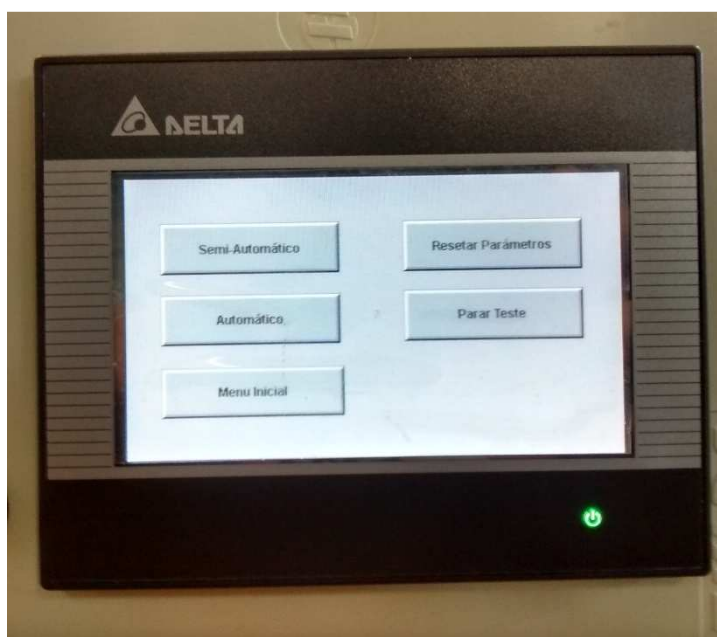


Figura 17. Interface controle de posição do tubo de Pitot de referência.

3.5 TUBO DE PITOT INDUSTRIAL

O conjunto que compõe o tubo de Pitot Industrial consiste no tubo de secção reta e na estrutura que é responsável pela a movimentação do medidor ao longo do tubo.

Em conjunto com a estrutura própria do tubo de Pitot Industrial, foi construído um conjunto para elevação do medidor até o ponto de inserção na tubulação. Os equipamentos para elevação são constituídos por um tripé e um suporte de fixação. O suporte de fixação faz a união entre medidor entre a estrutura de movimentação do tubo de Pitot Industrial e o tripé.

O suporte de fixação foi construído a partir de uma cantoneira de alumínio, 4 parafusos M-8 e duas abraçadeiras de 1". As medidas do dispositivo de fixação pode ser visualizada na Figura 18, mais específico no corte B.

A Figura 18 apresenta todos os elementos que compõe a fixação movimentação e a medição no tubo de Pito Industrial.

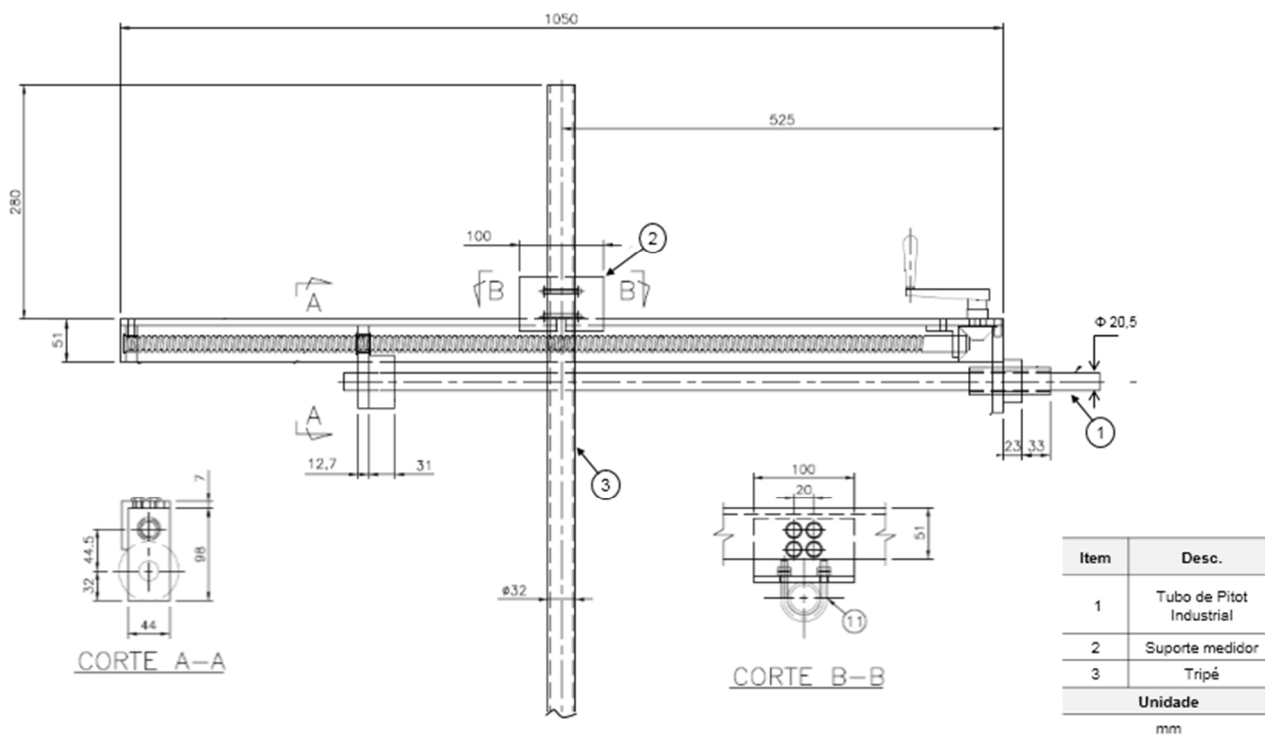


Figura 18. Croqui do conjunto da instalação do tubo de Pitot Industrial.

3.5.1 CONEXÕES

Para inserção do tubo de Pitot industrial na linha de teste do túnel de vento fez-se necessário a realização de furo com diâmetro do tubo Pitot industrial. Aproveitando esta necessidade, foi realizado o projeto e construção, de um conjunto de conexões de redução que visa atender a três medidores de vazão utilizados nos experimentos no túnel de vento, Termal, Pitot industrial e Phóton, assim obtendo melhor aproveitamento dos tubos.

As medidas das conexões de redução adotam como parâmetros principais os diâmetros dos medidores, Tabela 3, e seu projeto pode ser visto no anexo A.

Tabela 3. Medidas dos instrumentos de medição

Diâmetro dos medidores	Φ [mm]
Φ Termal	28
Φ Pitot industrial	21,5
Φ Phóton	19,1



Figura 19. Buchas de redução projetadas.

Ao final da construção das conexões todas foram ajustadas de modo a oferecer continuidade interna na secção dos tubos, e assim reduzir a perda de carga gerada pela descontinuidade inserida na tubulação.

3.5.2 MONTAGEM E AQUISIÇÃO DE DADOS

O tubo de Pitot industrial foi instalado em mesmo ponto anteriormente utilizado por Silva, F. C. [2] para o experimento com o medidor Phóton. A instalação do medidor foi realizada mantendo seu alinhamento de maneira que a inserção do Pitot industrial seja horizontalmente no tubo.



Figura 20. Posicionamento do tubo de Pitot Industrial



Figura 21. Tubo de Pitot Industrial inserido na tubulação anteriormente ao teste.

Diferentemente do tubo de Pitot de referência, os valores de diferença de pressão obtidos pelo tubo de Pitot Industrial foram obtidos através da utilização de um manômetro em U, e lidos visualmente, conforme Figura 22.



Figura 22. Instalação do medidor de pressão utilizado, manômetro em U.

3.6 DESCRIÇÃO DA MONTAGEM DO EXPERIMENTO NO TÚNEL DE VENTO

A montagem da bancada para calibração contou com a instalação de dois medidores de vazão em série, de forma que permita a comparação de dados do escoamento aferidos pelo medidor não calibrado, Pitot industrial, e o medidor de referência, Pitot ITMP 120.

As dimensões dos dutos que integram a construção do túnel de vento, a sua posição de montagem e organização estão dispostas na Tabela 4 e mostradas na Figura 23. Para a calibração do medidor faz-se necessário, apenas, a utilização da tubulação organizada em trecho reto.

Tabela 4. Dimensões da montagem utilizada nos ensaios

	D _{ext}	e	D _{int}	Massa Específica	L _{Difusor}	Le	L1	L2	L3	L3	L4
Tubo 8"	198	8	182	4,5	184,6	2250	2250	2250	1500	2235	1800

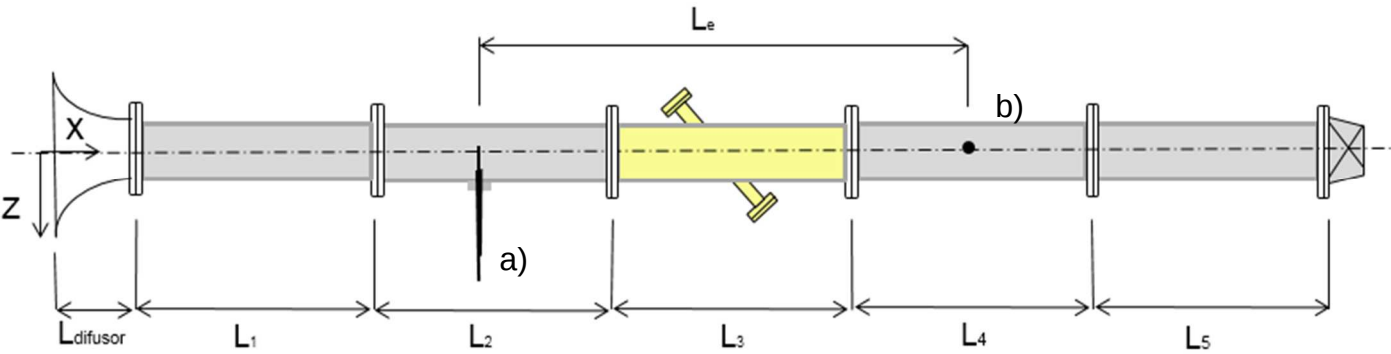


Figura 23. Croqui da configuração utilizada para calibração do medidor. a) tubo de Pitot Industrial. b) tubo de Pitot normatizado.

4 METODOLOGIA DOS ENSAIOS

Para realização dos ensaios foi assumido como premissa principal a adequação com a norma ISO 3966 [8] descrita no tópico 3.4.1. Considerando as limitações descritas acima, foi realizado os testes em três níveis de velocidade rotação, 700 rpm, 950 rpm e 1200 rpm, visto que de acordo Silva, F. C. [9] e Lima, E. S. M. [13] estes níveis de velocidade rotação atendem às limitações da norma.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DO PERFIL DO ESCOAMENTO DO TÚNEL

Como descrito no tópico 2, é necessário a utilização de métodos de escolha de pontos de medição, para a obtenção do perfil de velocidades e em seguida, a vazão no túnel.

Foi escolhido para os ensaios a metodologia Log Linear, descrita na norma [3], para 5 pontos de medição por raio, Tabela 5.

Tabela 5. Metodologia Log Linear [norma]

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	$0,2776 \pm 0,0100$	$0,3612 \pm 0,0050$
	$0,5658 \pm 0,0100$	$0,2171 \pm 0,0050$
	$0,6950 \pm 0,0100$	$0,1525 \pm 0,0050$
	$0,8470 \pm 0,0760$	$0,0765 \pm 0,0038$
	$0,9622 \pm 0,0018$	$0,0189 \pm 0,0009$

Os pontos utilizados no trabalho podem ser referidos no trabalho das maneiras descritas na Tabela 6.

Tabela 6. Pontos de medição

Pontos	y/D_i	y (mm)
P1	0,076	14
P2	0,155	28
P3	0,215	39
P4	0,357	65
P5	0,5	91
P6	0,643	117
P7	0,785	143
P8	0,845	154
P9	0,924	168

Na Figura 24 é apresentado o referencial de varredura dos pontos, onde as setas indicam os sentidos de medição do tubo de Pitot de referência, y_p , e do tubo de Pitot Industrial, y_{PI} . Desta forma fica evidente que a referência de tomada de pontos adotado para o medidor de referência é oposto a seu deslocamento, diferente do tubo de Pitot Industrial onde foi adotado um sistema de referência no mesmo sentido que o seu deslocamento.

O referencial de varredura dos medidores será importante para as análises futuras que serão realizadas.

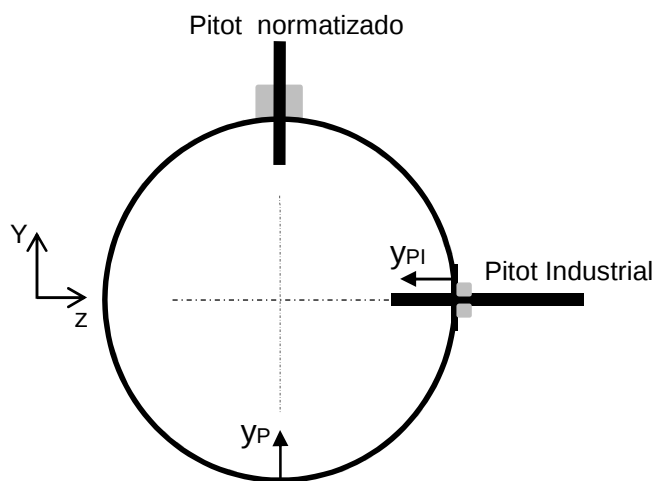


Figura 24. Referencial dos pontos de varredura dos tubos de Pitot.

4.2 PERFIL DE VELOCIDADE

Com o intuito de caracterizar o perfil de velocidade do escoamento do túnel de vento realizou-se medições de pressões diferenciais locais com o tubo de Pitot de referência, em posições normalizadas já descritas, somente com o medidor de referência na linha de teste.

O perfil de velocidade foi caracterizado no Experimento 1, (Exp. 1). Para este ensaio foi utilizado o modo de varredura automática e aquisição automática. Os parâmetros para varredura automática estão listados na tabela 2.

Tabela 7. Parâmetros para experimento 1, (Exp. 1).

Número de Ciclos	1
Pontos de medição	14, 28, 39, 65, 91, 117, 142, 154, 168.
Filtros de medição	Sem Filtros
Tempo de estabilização da medida	10 s
Tempo de medição em cada posição	5 s

4.3 ANÁLISE DE INFLUENCIA DO PITOT INDUSTRIAL

No Experimento 2, (Exp. 2), foi realizado com os dois medidores inseridos na tubulação de teste, como observado na figura 22, com o objetivo de avaliar a influência da inserção do Tubo de Pitot industrial nas medições do Tubo de Pitot de referência.

O teste seguiu posicionando o tubo de Pitot Industrial em cada uma das posição normatizada, descritas na tabela 6, e para cada um destes posicionamentos foi realizado a varredura do tubo de Pitot de referência com os mesmos parâmetros do Exp. 1. Desta maneira é possível obter o perfil de velocidade do tubo de Pitot de referência com a inserção do tubo de Pitot Industrial em várias posições, e avaliar a influência da inserção gradual do tubo de Pitot industrial nas leituras do tubo de Pitot normatizado.

4.4 CALIBRAÇÃO

Os testes para calibração do tubo de Pitot Industrial foram divididos em duas etapas, Experimento 3, (Exp. 3) e Experimento 4 (Exp. 4). Os dois experimentos foram realizados com o tubo de Pitot normatizado no modo de operação semiautomático e com aquisição de dados no modo manual, e determinado um tempo de aquisição de 120 s por posição. Para um tratamento uniforme entre os testes foi pré-estabelecido um número de pontos por varredura, 100 tomadas de dados para o Pitot de referência e 50 tomadas de dados para o Pitot Industrial, no mesmo período de tempo.

O Experimento 3, foi realizado com intuito de obter o perfil de velocidade dos dois tubos de Pitot. O teste seguiu posicionando os tubos de Pitot em posições diametralmente iguais, segundo o método de escolha de pontos já apresentado. A partir do perfis de velocidade dos dois tubos de Pitot que forma obtidos, é calculado as velocidades médias utilizando a equação 4.0, da norma [8] secção 10.1, sendo V_0 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):

$$V_D = V_0 \left(-\frac{1}{12} r_2^2 + \frac{5}{12} r_1^2 + \frac{1}{12} \frac{r_2^3}{r_2} \right) r_2^3 + V_1 \left(\frac{1}{6} r_1^2 + \frac{2}{3} r_2^2 - \frac{1}{12} r_3^2 \right) - V_2 \left(\frac{r_1^3}{12 r_2} \right) +$$

$$\sum_{i=2}^{i=n-2} V_i \left[-\frac{1}{12} r^{1(i+2)} + \frac{2}{3} r^{2(i+1)} - \frac{2}{3} r^{2(i-1)} + \frac{1}{12} r^{2(i-2)} \right] + V(n_n - 1) \left[\frac{1}{2} r^{2 n_n} + \frac{1}{12} r^{2(n_n-1)} - \right. \\ \left. \frac{2}{3} r^{2(n_n-1)} + \frac{1}{12} r^{2(n_n-3)} \right] + (1)$$

$$V_{n_n} \left\{ \frac{m}{m+1} (1 - r^{2 n_n}) + \frac{[r^{2 n_n} - r^{2(n_n-1)}]^2}{12m(1 - r^{2 n_n})} + \frac{7}{12} r^{2 n_n} - \frac{2}{3} r^{2(n_n-1)} + \frac{1}{12} r^{2(n_n-2)} \right\}$$

Onde n_n é o número de pontos por raio, assim, neste trabalho assume-se $n_n = 4$. 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) [17]. Neste trabalho foi adotado $m=7$, valor médio entre 4 e 10.

Obtendo as velocidades médias em cada nível de rotação, 700 rpm, 950 rpm e 1200 rpm, é possível encontrar as posição que representam as velocidades médias dos perfis de velocidade encontrados nos níveis de rotação.

O Experimento 4, (Exp. 4), foi realizado a partir da obtenção do ponto em que é representado a velocidade média. Para cada rotação, foram posicionados os tubos de Pitot nas posições encontradas no Exp. 3, e obtido as velocidades destes pontos. Esse teste foi repetido 4 vezes por nível de rotação, 700 rpm, 950 rpm e 1200 rpm. As velocidades obtidas nos testes representam a variação da velocidade média do escoamento.

A partir da média das velocidades obtidas pelo tubo de Pitot normatizado e pela média das velocidades obtidas pelo tubo de Pitot Industrial, calcula-se as vazões real e teórica utilizando a equação 4.1.

$$Q = V_D \cdot A_{esc} \quad (4.1)$$

Onde Q representa a vazão calculada, V_D a velocidade média e A_{esc} a área de escoamento transversal a tubulação. É importante ressaltar que a área de

escoamento, A_{esc} , representa a área da secção circular do tubo subtraindo a área da secção transversal do medidor inserida na tubulação. A inserção do tubo de Pitot, gera uma obstrução de até 14,34%, enquanto o medidor de referência produz obstrução máxima de 4,2% na áreaa de escoamento

4.5 ANÁLISE DOS DADOS

Todos os dados obtidos, tanto da aquisição de dados do tubo de Pitot de referência ou as leituras do tubo de Pitot Industrial, foram analisados estatisticamente através da utilização do critério de rejeição de Chauvenet.

Este critério tem como finalidade a rejeição de valores espúrios ou duvidosos. Determina que se o módulo do desvio d_i de uma determinada medição x_i em relação à média $\bar{x}$, quando dividido por seu desvio padrão, σ , for maior que um valor d_{ch} (limite de rejeição de *Chauvenet*), a medição deve ser rejeitada.

$$\frac{|d_i|}{\sigma} = \frac{|x_i - \bar{x}|}{\sigma} > d_{ch} \quad (4.2)$$

Tabela 8. Limites de rejeição de Chauvenet

Nº de medidas	d_{ch}
3	1,38
5	1,65
7	1,80
8	1,87
10	1,96
30	2,39
50	2,57
100	2,81

Como já descrito, foram analisados 50 tomadas de dados por posição do tubo de Pitot Industrial e 100 tomadas de dados por de posição do tubo de Pitot de referência, o que representa, respectivamente, um de $d_{ch}=2,57$ e $d_{ch}=2,81$.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 PERFIL DE VELOCIDADES

Com o intuito de caracterizar e validar os perfis de velocidade obtidos pelas leituras pontuais do tubo de Pitot de referência foi realizado a comparação com uma referência de perfil teórico, *perfil da lei de potência*, que é representado pela equação 5.0.

$$v(r) = V_{\max} \left(1 - \frac{r}{R} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (5.0)$$

Onde,

r Posição radial (m)

R Raio interno do duto (m)

n Função do número de Reynolds (adimensional)

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

O parâmetro n é uma função do nº de Reynolds – Re , além da rugosidade interna da parede do duto na forma da equação 5.1. Para tubos lisos a equação de Prandtl (*universal law of friction for smooth pipes*) se aplica (Schlichting, 1968) [13].

$$n = 2 \log_{10} \left(\frac{Re}{n} \right) - 0,8 \quad (5.1)$$

Em tubos lisos, se Re for conhecido, n pode ser estimado e o perfil de velocidades pode ser obtido em condição de regime permanente [13]. Como o número de Reynolds abordados nos experimentos são da ordem de 10^5 , calcula-se: $n=7,455$. Assim o perfil de velocidade utilizado como referência teórica é conhecido como perfil *exponencial um sétimo*.

Na Figura 1 estão apresentados os perfis de velocidade medidos e teóricos para os valores de rotação determinados nos experimentos, 700 rpm, 950 rpm e 1200 rpm.

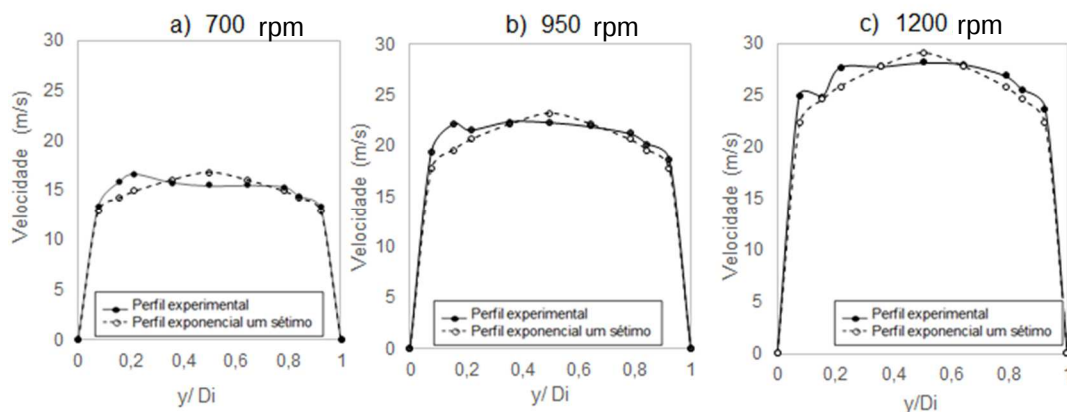


Figura 25. Comparação entre perfis de velocidade experimentais e os teóricos de referência.

Na Tabela 9 estão listados os valores das diferenças percentuais entre o perfil de velocidade proveniente das leituras do tubo de Pitot de referência e o perfil exponencial um sétimo, referência teórica.

Tabela 9. Diferenças percentuais entre perfil teórico e experimental.

Velocidade do soprador			
y/Di	700 rpm	950 rpm	1200 rpm
0,076	1,75	7,61	10,56
0,155	10,12	11,87	0,12
0,215	10,64	3,71	6,23
0,357	-2,13	0,65	-0,46
0,5	-8,30	-4,04	-3,40
0,643	-3,91	-1,61	0,34
0,785	1,92	1,93	3,19
0,845	-0,19	1,85	2,80
0,924	0,81	3,38	4,93

Analisando a Tabela 9, observa-se que as diferenças percentuais máximas nos três níveis de velocidade 700 rpm, 950 rpm e 1200 rpm, são respectivamente, 10,64%, 11,87% e 10,56%, e se encontram, segundo a referência de varredura do tubo de Pitot normatizado, nos pontos de maior inserção no tubo, ou seja, em regiões de menor área de escoamento. Este fenômeno pode estar relacionado ao aumento da velocidade devido à diminuição de área de escoamento. A avaliação desta proposição pode ser realizada através da comparação da taxa de variação da velocidade e da taxa de variação. Descrita na Tabela 10.

Tabela 10. Taxa de variação da velocidade e área

	700 rpm	950 rpm	1200 rpm
Taxa de variação Velocidade	0,79	4,95	8,28
Taxa de variação Área	-0,01	-0,01	-0,01

A proposição seria validada se as taxas de variação fossem iguais em módulo e em sentidos diferentes. Conforme apresentado na Tabela 10, a relação entre as taxas de variação não seguem a proposição esperada. Desta forma, não se pode associar o fenômeno unicamente a redução da área, como proposto inicialmente. Além disso é verificado que as diferenças entre taxas de variação de velocidade e área aumentam ao longo do aumento dos níveis de rotação, sugerindo que o efeito da variação da área é menos significante com o aumento do Reynolds.

5.2 ANÁLISE DE ASSIMETRIA

Na figura 26 a-c, foi analisado a diferença percentual da velocidade entre pontos simétricos na seção de realização dos testes. A máxima assimetria é encontrada na rotação de 700 rpm, numa amplitude de 9,67%. Os testes sem retificadores de fluxo de Silva, F.C., [9] obtiveram limite de assimetria máximo próximo de 10%, compatível com o valor máximo encontrado, 9,67%.

É observada uma diminuição na tendência das amplitudes das assimetrias com o aumento da vazão, diferentemente dos resultados apresentados por Silva, F.C., [9] onde o nível de velocidade de 1200 rpm apresentava a maior assimetria. Esta característica pode ser atribuída a aquisição ser realizada manualmente no trabalho de Silva, F.C., [9] o que seria fonte de imprecisão, principalmente em 1200 rpm.

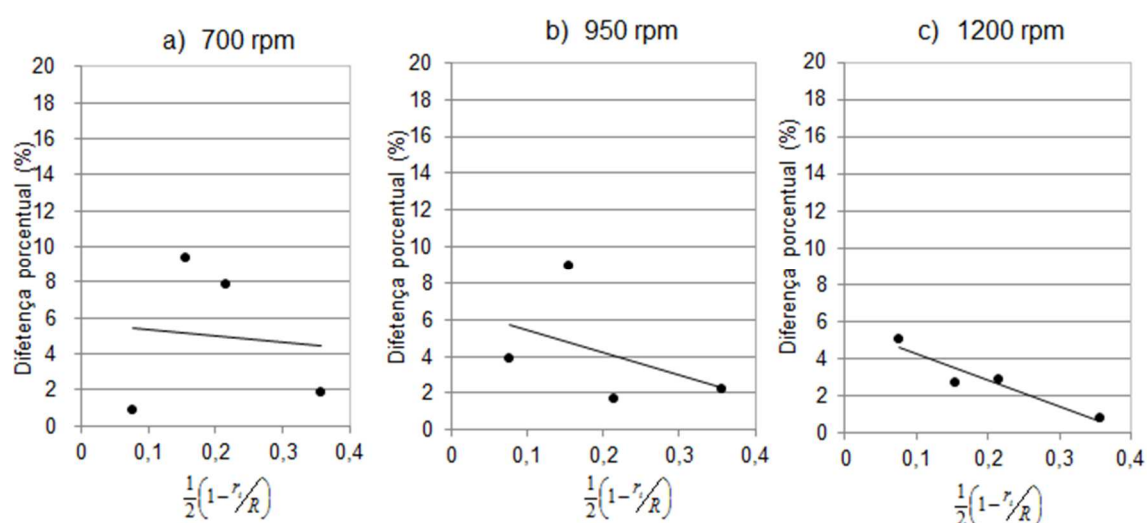


Figura 26. Diferenças percentuais entre pontos simétricos

5.3 TESTE DE REPETITIVIDADE

Nas Figuras 27 a-c, e Tabela 11, apresentam os resultados da análise de repetitividade e as diferenças percentuais entre o perfil de velocidade do tubo.

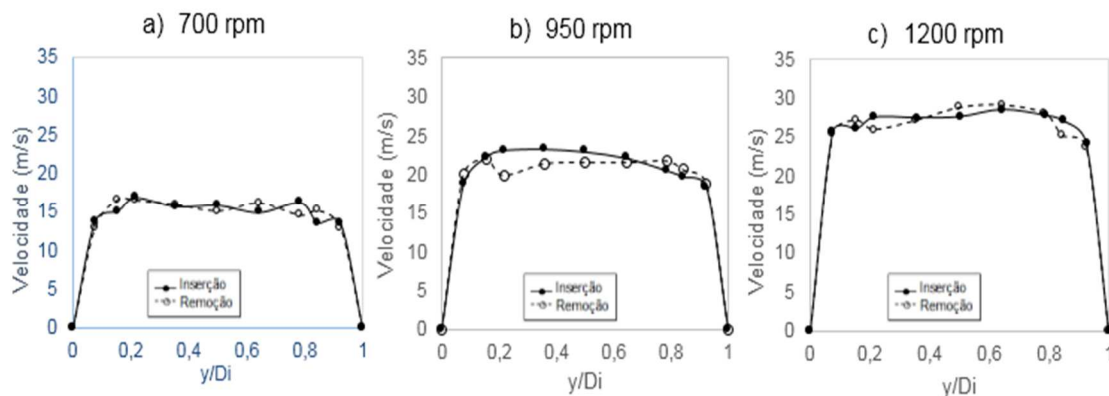


Figura 27. Teste de repetitividade nas rotações de teste.

Tabela 11. Diferenças percentuais entre a inserção e remoção do tubo de Pitot Industrial.

Velocidade do soprador			
y/Di	700 rpm	950 rpm	1200 rpm
0,076	6,32	-7,15	-2,66
0,155	-9,84	1,00	-10,18
0,215	2,42	10,35	-10,82
0,357	-1,39	8,03	-1,56
0,5	5,09	5,87	5,31
0,643	-8,01	2,53	-0,04
0,785	10,67	-5,89	-9,31
0,845	-11,41	-4,48	-8,06
0,924	4,56	-2,31	8,56

O processo não pode ser considerado repetitivo devido às diferenças entre inserção e remoção do tubo de Pitot Industrial. Nos três níveis de velocidade foram encontradas diferenças percentuais máximas nos valores de, respectivamente, -11,41 %, 10,35 % e -10,82 %.

5.4 INFLUÊNCIA DA INSERÇÃO DO PITOT INDUSTRIAL NA LINHA DE TESTE

Na Figura 28, 29 e 30, estão apresentados os resultados do Exp. 2 como diferenças percentuais entre o perfil de velocidade obtido pelo tubo de Pitot normalizado com e sem o tubo de Pitot Industrial inserido na tubulação. Desta forma é analisada a influência da inserção do tubo de Pitot normalizado em cada ponto do método Log Linear no perfil de velocidade obtido pelo tubo de Pitot normalizado.

Para esta análise foi considerado como a máxima diferença percentual aceitável a maior diferença obtida entre os entre leituras do tubo de Pitot normalizado, sem a presença do tubo de Pitot Industrial inserido na linha de teste. Desta forma, desvios dentro do intervalo delimitado são considerados aceitáveis, pois podem ser associados a desvios inerentes ao processo.

As figuras foram separadas a cada 3 posições do tubo de Pitot Industrial para melhor análise.

a) Velocidade do soprador, 700 rpm.

Os limites de aceitação para este nível de velocidade foi de $\pm 11,40 \%$. A maior diferença percentual observada na comparação entre os perfis de velocidade foi de $-11,69\%$, apresentada na figura 28-c, posição do tubo de Pito industrial na posição P7 ($y_{pi}/Di = 0,785$).

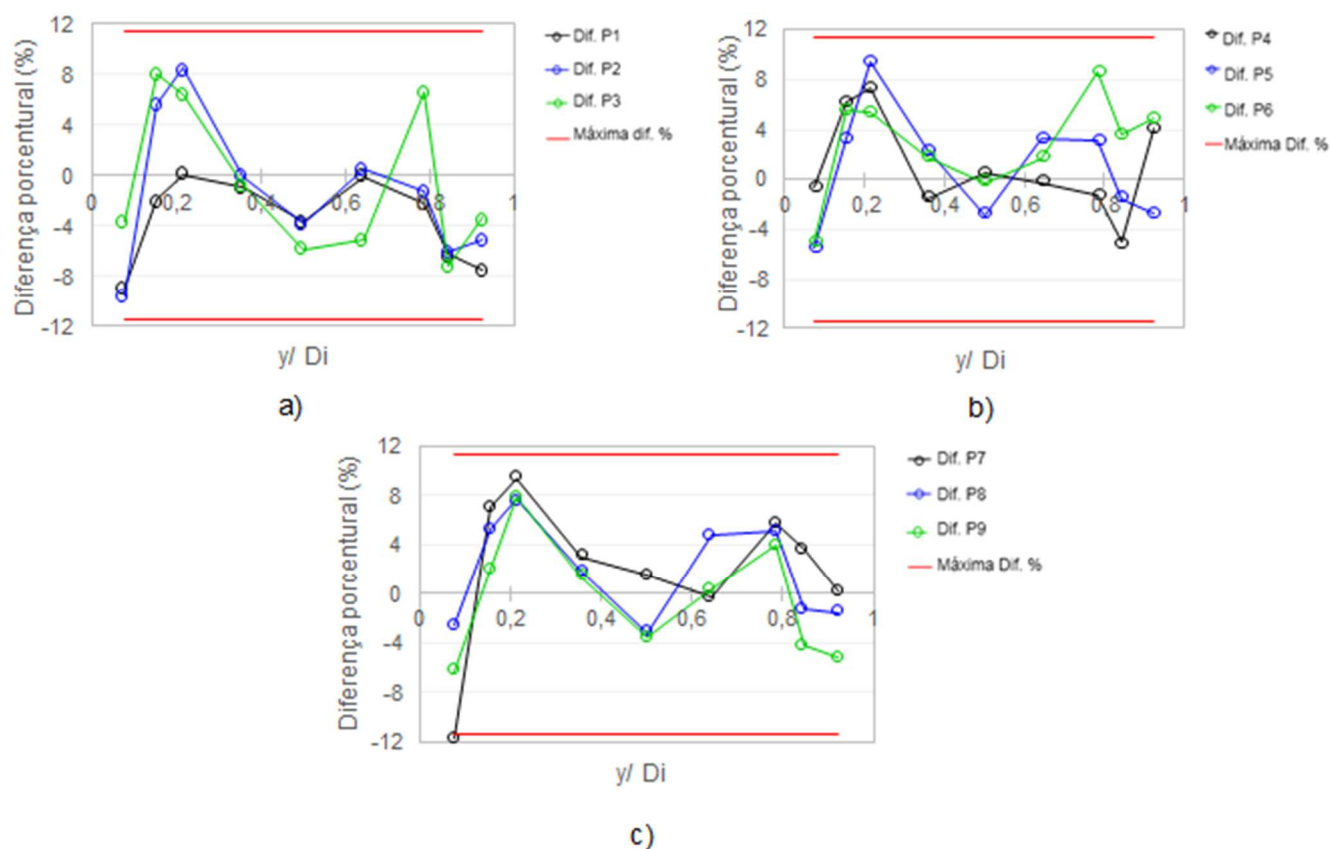


Figura 28. Diferença porcentual entre tubo de Pitot normalizado e Industrial, a 700 rpm. Pontos a) P1, P2 e P7. b) P4, P5 e P6. c) P7, P8 e P9.

b) Velocidade do soprador, 950 rpm

Os limites de aceitação para este nível de velocidade foram de $\pm 10,35\%$. A maior diferença porcentual observada na comparação entre os perfis de velocidade foi de $-10,85\%$, apresentada na Figura 29-c, com o tubo de pitot industrial na posição P7 ($y_{pi}/D_i = 0,785$).

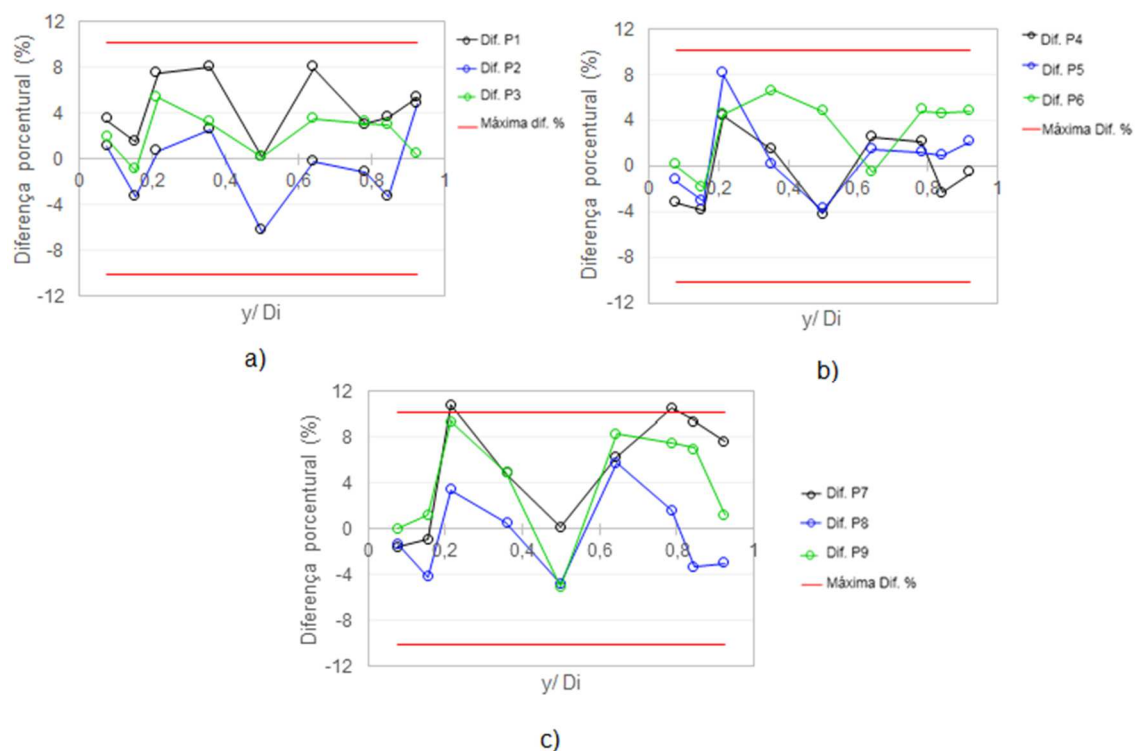


Figura 29. Diferença percentual entre tubo de Pitot normalizado e Industrial, a 950 rpm. Pontos a) P1, P2 e P7. b) P4, P5 e P6. c) P7, P8 e P9.

c) Velocidade do soprador, 1200 rpm.

Os limites de aceitação para este nível de velocidade foram de $\pm 10,82\%$. A maior diferença percentual observada na comparação entre os perfis de velocidade foi de $+10,24\%$, apresentada na Figura 30-a, com o Pitot Industrial na posição P2 ($y_{pi}/Di = 0,155$). Porém novamente o perfil de velocidade quando o Pitot industrial está na posição P7 tem diferença percentual próxima da máxima aceitável.

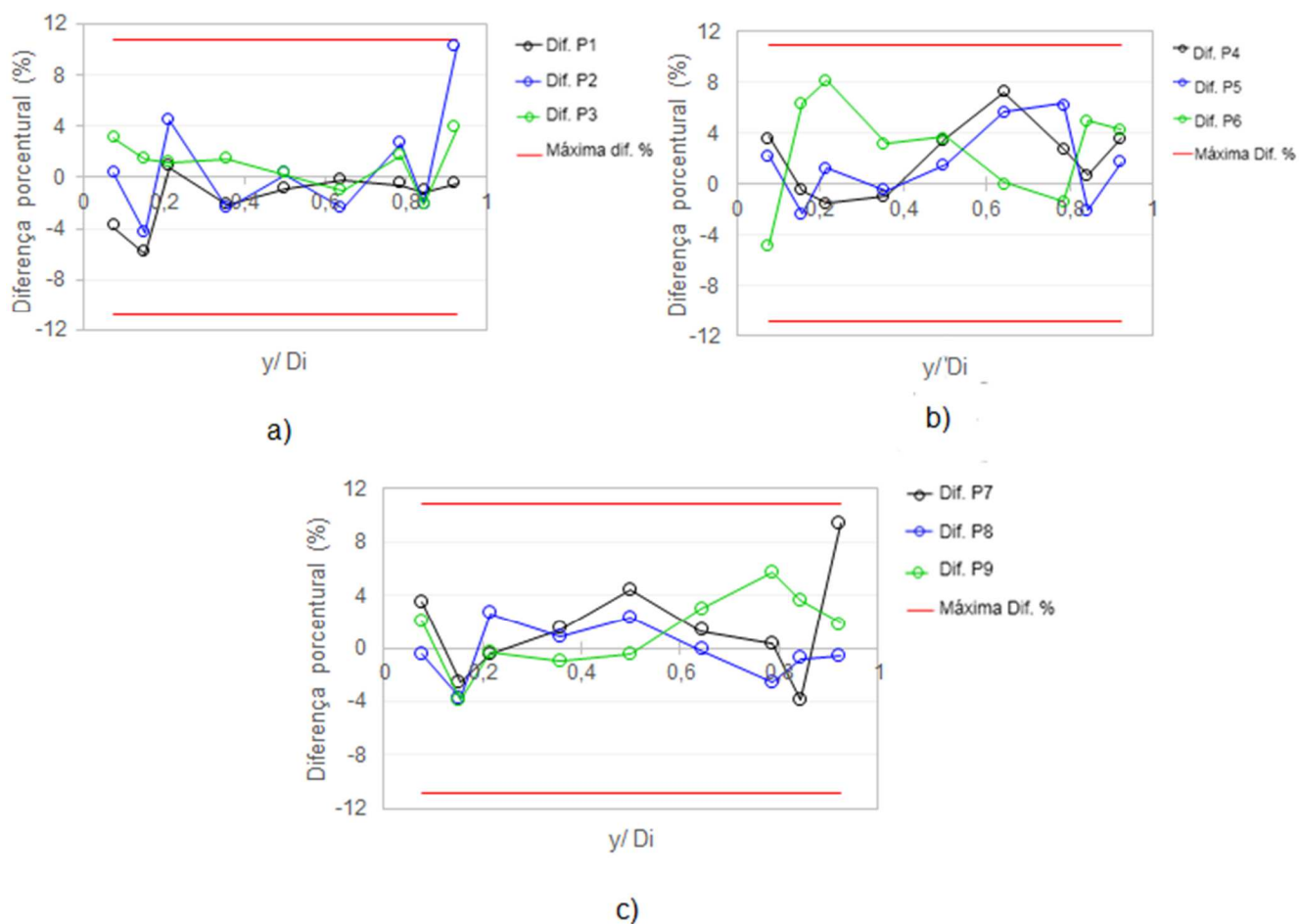


Figura 30. Diferença percentual entre tubo de Pitot normalizado e Industrial, a 1200 rpm. Pontos a) P1, P2 e P7. b) P4, P5 e P6. c) P7, P8 e P9.

5.5 CALIBRAÇÃO

Na Figura 31 a-c são apresentados os perfis de velocidade do tubo de Pitot normalizado e do tubo de Pitot de referência, como resultado do Exp. 3.

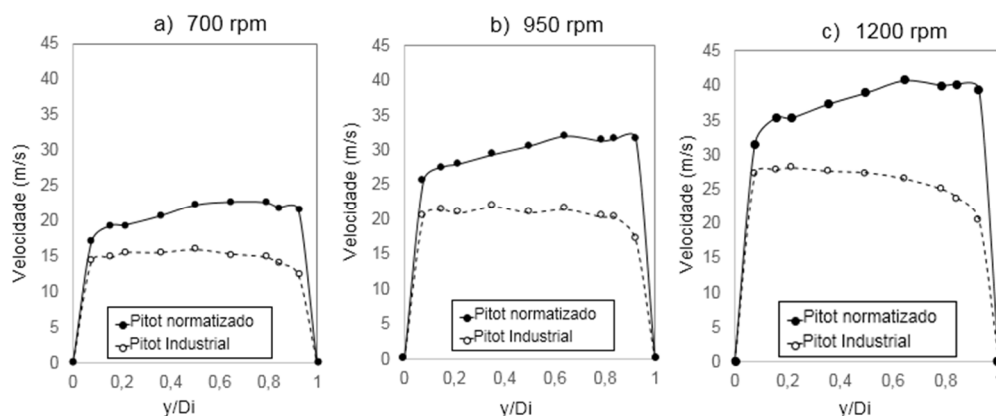


Figura 31. Exp. 3. Perfis de velocidade dos medidores em a) 700 rpm b) 950 rpm
1200 rpm

Nos perfis de velocidade obtidos pelo tubo de Pitot Industrial é observado o caráter ascendente do perfil de acordo com o aumento da inserção do Pitot na tubulação. Da mesma forma que avaliado na secção 5.1, foi encontrado a taxa de variação da velocidade e área, demonstrado na Tabela 12.

Tabela 12. Taxa de variação de velocidade e área do Pitot Industrial

	700 rpm	950 rpm	1200 rpm
Taxa de variação Velocidade	29,45	39,61	51,50
Taxa de variação Área	-0,02	-0,02	-0,02

A partir da Tabela 12 conclui-se que o efeito da obstrução não é o único fator para o desenvolvimento da característica ascendente dos perfis de velocidade do tubo de Pitot Industrial.

A partir da obtenção dos perfis de velocidade calculou-se a velocidade média do escoamento, como já descrito no tópico 4.4. Os resultados das velocidades médias são apresentados na Tabela 13 e 14.

Tabela 13. Valores de velocidade média e Reynolds dos ensaios.

Pitot normatizado (Referência)					
700 rpm		950 rpm		1200 rpm	
V_D	Re	V_D	Re	V_D	Re
16,36	1,83E+05	22,61	2,54E+05	28,17	3,16E+05

Tabela 14. Velocidade média aferida pelo tubo de Pitot Industrial

Pitot Industrial		
700 rpm	950 rpm	1200 rpm
V_D	V_D	V_D
20,46	29,36	37,3

A determinação das velocidades médias permite a obtenção do ponto que representa a velocidade média nos dois perfis de velocidade. Estes valores estão apresentados na Tabela 15 e 16.

Tabela 15. Posição associadas à velocidade média - tubo de Pitot Normatizado

Tubo de Pitot normatizado					
700 rpm		950 rpm		1200 rpm	
V_D	$(y_p/D_i)_m$	V_D	$(y_p/D_i)_m$	V_D	$(y_p/D_i)_m$
16,36	0,215	22,61	0,357	28,17	0,5

Tabela 16. Posição associadas à velocidade média- tubo de Pitot Industrial

Tubo de Pitot Industrial					
700 rpm		950 rpm		1200 rpm	
V_D	$(y_{pi}/D_i)_m$	V_D	$(y_{pi}/D_i)_m$	V_D	$(y_{pi}/D_i)_m$
20,46	0,357	29,36	0,357	37,3	0,357

Para início do Exp. 4 foram posicionados os tubos de Pitot segundo os pontos que representam as medições de velocidade média do escoamento, apresentados na Tabela 5, e aferido a velocidade do escoamento pontualmente, como descrito no

tópico 4.4. Nas Tabelas 17, 18 e 19, estão apresentadas as velocidades medidas, e posteriormente na Tabela 20 a média da velocidade nos pontos especificados.

Tabela 17. Velocidades pontuais para velocidade de 700 rpm

		700 rpm			
		Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4
	y/Di	V ₁ (m/s)	V ₂ (m/s)	V ₃ (m/s)	V ₄ (m/s)
Pitot referência	0,215	16,84	16,44	15,63	15,30
Pitot Industrial	0,357	20,46	20,78	20,75	20,23

Tabela 18. Velocidades pontuais para a velocidade de 950 rpm

		950 rpm			
		Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4
	y/Di	V ₁ (m/s)	V ₂ (m/s)	V ₃ (m/s)	V ₄ (m/s)
Pitot referência	0,357	21,90	21,07	22,17	22,24
Pitot Industrial	0,357	29,61	28,95	29,06	29,14

Tabela 19. Velocidades pontuais para a velocidade de 1200 rpm

		1200 rpm			
		Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4
	y/Di	V ₁ (m/s)	V ₂ (m/s)	V ₃ (m/s)	V ₄ (m/s)
Pitot referência	0,5	28,16	27,18	26,26	27,95
Pitot Industrial	0,357	36,84	37,72	37,51	36,41

Tabela 20. Velocidades médias calculadas.

	700 rpm (Re = 1,83.10 ⁵)	950 rpm (Re= 2,54.10 ⁵)	1200 rpm (Re = 4,08.10 ⁵)
	V _{m1}	V _{m2}	V _{m3}
Pitot referência	16,05	22,1	27,64
Pitot Industrial	20,56	29,2	37,12

Após obtido como resultado o comportamento da velocidade do escoamento nos pontos determinados em cada rotação e em seguida a velocidade média dos pontos

Com as velocidades médias determinadas, a vazão volumétrica é obtida a partir da equação 4.1 e em seguida calculado o coeficiente de descarga por meio da equação 2.0, valores descritos na Tabela 21 .

Tabela 21- Vazões e coeficiente de descarga aferidos.

	Vazão real (m ³ /s)	Vazão teórica (m ³ /s)	C _d
700 rpm (Re = 1,83.10⁵)	0,414	0,507	0,82 0,04 -0,03
950 rpm (Re= 2,54.10⁵)	0,566	0,720	0,79 0,01 -0,02
1200 rpm (Re = 3,16.10⁵)	0,704	0,916	0,77 0,02 -0,02

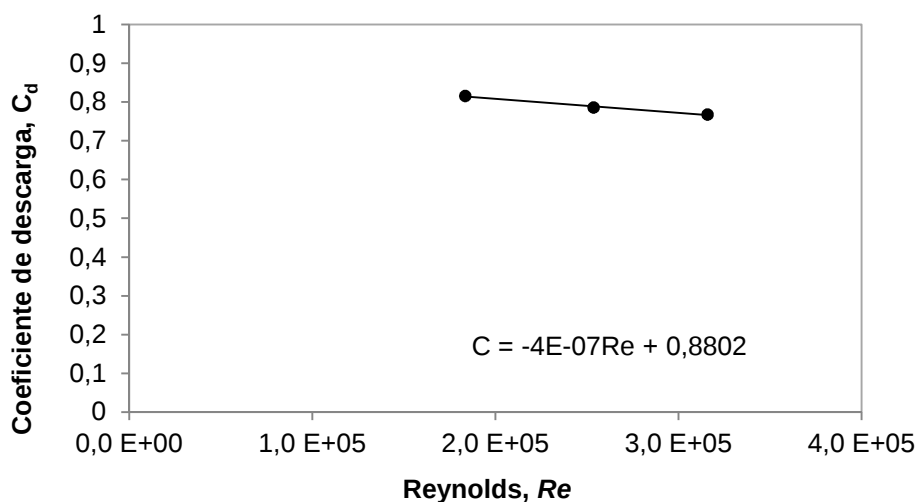


Figura 32- Relação coeficiente de descarga e Reynolds

Assim, o coeficiente de descarga foi encontrado de acordo com os números de Reynolds avaliados. É observado que o coeficiente de descarga obteve maior variação com o menor número de Reynolds, $Re = 1,83.10^5$.

Além disso a máxima diferença entre o coeficientes de descarga em Reynolds diferentes foi de 13,93%.

6 CONCLUSÃO

Mediante aos objetivos propostos inicialmente e os resultados obtidos, pode-se fazer as seguintes considerações:

- A automatização do túnel de vento mostrou-se uma ferramenta importante para análises experimentais mais robustas, reduzindo erros devido à leituras e posicionamento dos medidores.
- Durante a caracterização do escoamento do túnel de vento observou-se compatibilidade entre os perfis obtidos pelo medidor de referência e o perfil teórico um sétimo, pois a máxima diferença percentual entre os perfis foi de 10,64%, sendo considerada aceitável visto a ausência de retificador de fluxo.
- Foram encontradas relações entre assimetrias máxima de 9,67%. Os valores de diferenças percentuais obtidos estão entre as faixas de valores encontrados no trabalho de Silva, F.C., [1]. Porém na rotação de 1200 rpm os valores encontrados foram até 30% abaixo do valores encontrados por Silva, F.C., [1]. Esta constatação pode ser causada pela diferença de aquisição de dados com software, apresentada neste trabalho, e manualmente no trabalho de Silva, F.C., [1].
- Os experimentos não apresentaram repetitividade com diferenças percentuais de até 11,82%. Este resultado pode ser atribuído à falta de retificador de fluxo utilizado e avaliado em Silva, F.C., [1], e às oscilações operacionais no motor e soprador, como também constatado por Lima, E. S. M. [17].
- Constatou-se que em relação ao efeito intrusivo do tubo de Pitot Industrial nas medições do tubo de Pitot normatizado, não se pode atribuir os desvios obtidos na realização do Exp.2 a inserção do Pitot Industrial. Os desvios encontrados estão dentro da faixa de variação dos testes na ausência do Pitot Industrial.
- O procedimento de calibração foi realizado com sucesso obtendo os coeficientes de descarga para os três níveis de rotação propostos e suas variações durante os testes.

Para trabalhos futuros sugere-se:

1. Avaliar a influência da inserção do retificador de fluxo no processo de calibração proposto.
2. Avaliar os efeitos no escoamento da dissimilaridade geométrica, formatos Bullet shape e cilíndrico, do tubo de Pitot Industrial através de simulação numérica.

7 REFERÊNCIAS

- [1] G. J. Delmée, *Manual de Medição de Vazão*. São Paulo, Brazil: Edgard Blücher Ltda 3rd ed., 2003.
- [2] Paula, T. T., “Avaliação metrológica da medição de vazão com laser Doppler Anemométrico” Programa Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.
- [3] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION – ISO. *ISO-8316: Measurement of liquid flow in closed conduits – Method by collection of the liquid in a volumetric tank*, 1987.
- [4] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION – ISO. *ISO-4185: Measurement of liquid flow in closed – Weighing method*, Switzerland, 1980.
- [6] ANDRADE, Luiz Augusto de. *Calibração de tubo de pitot cole para a medição de grandes vazões utilizando anemometria LASER*. 2002. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- [7] CUSTOM HVAC. < Acessado em 12 de dezembro de 2014> <http://customhvaconline.com/>
- [8] International organization for standardization. *ISO/FDIS 3966: Mesurement of fluid flow in closed conduits – Velocity area method using Pitot static tubes*, 2008.
- [9] 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.
- [9] Verabar, Flow test report, Disponível em < www.veris-inc.com > Acesso em 12 dezembro 2014.

[11] Weceel D., “*Experimental and numerical investigations of the averaging Pitot tube and analysis of installation effects on the flow coefficient*”, 2008.

[12] Kabacinski, M. “*Numerical and experimental research on new cross-sections of averaging Pitot tubes*”, 2008.

[13] Lima. E. S. M., “*ANÁLISE EXPERIMENTAL DA SENSIBILIDADE DA TECNOLOGIA ULTRASSÔNICA PARA MEDICÃO DE GÁS DE QUEIMA SOB O EFEITO DE CURVA*” Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2013.

[14] Rebello, B., Caroni F., “*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

[15] <http://brasil.ni.com>

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

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

[18] *Wikipedia*. [Acessado em: 12 de dezembro de 2014.] <http://pt.wikipedia.org/>

[19] Martinez, B. C., Andrade, L.A., Aguirre, L.A. e Viana, E. M. F. *Metodologia para Calibração de Tubo de Pitot Cole Utilizando Anemometria LASER*.

[20] Veris Verabar, “*Velocity Averaging Flow Sensors*”, Disponível em < www.veris-inc.com > Acesso em 12 dezembro 2014.

[21] Queiroz, M. C., “*Análise de escoamento em uma estação de calibração de tubos de Pitot usando as técnicas de Pitometria e anemometria térmica*”, Programa Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

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

[22] < mingas.ru/2012/01/rasxodomery-annubar-annubar-2/ > Acessado em 12 de dezembro de 2014

[23] < confor.com.br/produtos/detalhes/tubos-de-pitot-medicao-de-velocidades-do-ar-e-pressao > Acessado em 12 de dezembro de 2014

8 ANEXO A

8.1 Conexões

