

UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS

UNIDADE ACADÊMICA DE GRADUAÇÃO

CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

JONES AUGUSTO KASPARY

ESTUDO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM ANEMÔMETRO A FIO QUENTE

SÃO LEOPOLDO

2018

JONES AUGUSTO KASPARY

ESTUDO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM ANEMÔMETRO A FIO QUENTE

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica, pelo Curso de Engenharia Elétrica da Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS.

Orientador: Prof. Ms. Leonel Augusto Calliari Poltosi

São Leopoldo

2018

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço ao meu orientador, prof. Leonel Augusto Calliari Poltosi, por todas as sugestões e pelo tempo dedicado a revisar o relatório e tirar minhas dúvidas.

Em segundo lugar, agradeço ao prof. Conrad Lee, do Curso de Engenharia Mecânica da UNISINOS, por todo o apoio para a liberação dos materiais da maquetaria e do espaço físico no Laboratório de Usinagem, bem como pelas sugestões para a montagem do túnel de vento utilizado no decorrer do projeto.

Agradeço ao diretor da empresa onde trabalho, Gustavo Vieira Pereira, pela sugestão do tema do trabalho e pela disposição em me conceder horas extras de laboratório, que ao final se mostraram importantes.

Sou igualmente grato aos meus pais, João e Mara, pela compreensão e apoio no decorrer do último ano, dedicado em grande parte a este trabalho.

Por fim, agradeço aos meus amigos e colegas de trabalho, que sempre me incentivaram a persistir frente às dificuldades e imprevistos.

RESUMO

A anemometria térmica permite a medição da velocidade de fluidos, tendo como diferencial a possibilidade de mapear escoamentos turbulentos. Isso a torna uma importante área da Instrumentação Eletrônica. O presente trabalho trata da modelagem, implementação e calibração de um anemômetro de fio quente operando em temperatura constante. Na modelagem, é determinado o comportamento dinâmico do sistema com base em conceitos de diversas áreas, como Eletricidade e Transferência de Calor. Foi feita uma análise em termos de tempo de resposta, linearidade e custo dos sensores comerciais, e assim optou-se pela confecção dos sensores de velocidade e temperatura. Após o levantamento prático da curva de velocidade por meio de um túnel de vento e de temperatura por meio de um calibrador, foi feita a calibração do sistema segundo a norma GUM. A partir das incertezas de medição inferiores a 0,2 m/s obtidas para a segunda metade da faixa de 0 a 10,3 m/s, foi possível validar o sistema como um todo. Na energização, o tempo de estabilização da medida de velocidade, sendo esta nula, foi de 31ms. Com isso, foi possível confirmar as previsões teóricas acerca do funcionamento do sistema.

Palavras Chave: Anemometria Térmica. Anemômetro de Fio Quente. Anemômetro a Temperatura Constante. Calibração. Instrumentação Eletrônica.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diferentes combinações de precisão e exatidão.....	21
Figura 2 - Anemômetros (a) rotativo de conchas; (b) de Savonius; (c) de hélice em duto; (d) em escoamento livre	26
Figura 3 - Tubo de Pitot.....	26
Figura 4 - Circuito básico do anemômetro de fio ou filme metálico aquecido	28
Figura 5 - Circuito proposto para o acionamento por PWM	29
Figura 6 - Circuito proposto para a compensação de temperatura	30
Figura 7 - Distribuição espacial dos sensores de fio	31
Figura 8 - Resistência relativa frente à temperatura para diversos metais.....	34
Figura 9 - Diagrama de fluxo de energia para a modelagem	35
Figura 10 - Curva característica de tensão x velocidade.....	42
Figura 11 – Dimensões da moldura dos sensores	45
Figura 12 - Padrão das ilhas cortadas na moldura dos sensores.....	45
Figura 13 – Sensor de velocidade finalizado.....	46
Figura 14 – Sensor de temperatura finalizado.....	46
Figura 15 - Circuito de tratamento do sinal de velocidade	49
Figura 16 - Circuito de tratamento do sinal de temperatura	50
Figura 17 – Circuito de geração de alimentação simétrica.....	51
Figura 18 - Parte traseira do túnel de vento	52
Figura 19 – Parte interna da seção com a resistência de aquecimento	52
Figura 20 – Túnel de vento montado.....	53
Figura 21 – Disposição dos elementos na seção de medição	54
Figura 22 - Tensão Vo2_U na energização do sistema	56
Figura 23 – Gráfico da velocidade em função de Vo2_U com ajuste polinomial para temperatura média de 15 °C	57
Figura 24 – Gráfico da velocidade em função de Vo2_U com ajuste por curva de potências para temperatura média de 15 °C	57
Figura 25 - Moldura de madeira da resistência após os testes	59
Figura 26 - Posicionamento da resistência e do papelão na seção de PVC	59
Figura 27 – Resposta do sensor a um degrau de -28°C com ar estagnado.....	60
Figura 28 – Resposta do sensor a um degrau de -28 °C com ar a 4 m/s.....	61

Figura 29 – Gráfico de temperatura x Vo2_T	62
Figura 30 – Fluxograma do firmware	63
Figura 31 - Anemômetro montado.....	64
Figura 32 – Escala deslizante utilizada para determinar a velocidade do ar	65

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Medições de temperatura do fio x corrente aplicada	47
Quadro 2 – Caracterização do sensor de temperatura	48
Quadro 3 – Tensão V_{o2_U} em função da velocidade	56
Quadro 4 – Medições do circuito de tratamento do sinal de temperatura	61
Quadro 5 – Medições realizadas para a calibração de velocidade, com ajuste por curva de potências	66
Quadro 6 - Medições realizadas para a calibração de velocidade, com ajuste polinomial	67
Quadro 7 – Medições realizadas para a calibração de temperatura	68
Quadro 8 - Incerteza, graus de liberdade e fator de correção para a medição de velocidade com ajuste por curva de potências.....	71
Quadro 9 – Incerteza combinada, graus de liberdade efetivos e incerteza expandida para a medição de velocidade com ajuste por curva de potências	72
Quadro 10 - Quadro-resumo para $U=1,04$ m/s e ajuste por curva de potências	72
Quadro 11 - Quadro-resumo para $U=5$ m/s e ajuste por curva de potências	73
Quadro 12 - Quadro-resumo para $U=9,14$ m/s e ajuste por curva de potências	73
Quadro 13 - Incerteza, graus de liberdade e fator de correção para a medição de velocidade com ajuste polinomial.....	73
Quadro 14 – Incerteza combinada, graus de liberdade efetivos e incerteza expandida para a medição de velocidade com ajuste polinomial	74
Quadro 15 - Quadro-resumo para $U=1,04$ m/s e ajuste polinomial	74
Quadro 16 - Quadro-resumo para $U=4,97$ m/s e ajuste polinomial	75
Quadro 17 - Quadro-resumo para $U=9,11$ m/s e ajuste polinomial	75
Quadro 18 - Incerteza, graus de liberdade e fator de correção para a medição de temperatura.....	75
Quadro 19 – Incerteza combinada, graus de liberdade efetivos e incerteza expandida para a medição de temperatura	76
Quadro 20 - Quadro-resumo para $T= -4,01$ °C.....	76
Quadro 21 - Quadro-resumo para $T=19,99$ °C.....	77
Quadro 22 - Quadro-resumo para $T=44$ °C.....	77
Quadro 23 - Quadro de custos do projeto	79

LISTA DE VARIÁVEIS

A	Coeficiente de calibração
a_{fv}	Faixa de variação considerada para uma fonte de incerteza de medição
B	Coeficiente de calibração
C_C	Correção combinada de uma medição
C_{MED}	Fator de correção para incertezas do tipo A
C_{MED_T}	Fator de correção para a incerteza da medida de temperatura
C_{MED_U}	Fator de correção para a incerteza da medida de velocidade
C_p	Calor específico sob pressão constante
DP	Desvio-padrão de um conjunto de medições
d_F	Diâmetro de um fio com seção transversal circular
h	Coeficiente de transferência de calor por convecção
i	Corrente elétrica
I_F	Corrente no fio quente
K	Constante da solução homogênea da EDO de 1ª ordem
k	Condutividade térmica
M	Valor utilizado para calcular a constante K da solução homogênea da EDO de 1ª ordem
md	Número de medições de uma mesma grandeza
m	Massa do sensor
n	Expoente da velocidade U
Nu	Número de Nusselt
P_A	Potência acumulada no sensor
P_G	Potência gerada para alimentar o sensor
P_T	Potência transferida do sensor ao fluido
Pr	Número de Prandtl
\dot{Q}_{cf}	Taxa de transmissão de calor por convecção forçada
\dot{Q}_{cn}	Taxa de transmissão de calor por convecção natural
\dot{Q}_{cond}	Taxa de transmissão de calor por condução
\dot{Q}_r	Taxa de transmissão de calor por radiação
Re	Número de Reynolds
RESAD_T	Resolução da medida de temperatura pelo conversor A/D

RESAD_U	Resolução da medida de velocidade pelo conversor A/D
R _F	Resistência do fio quente
R _G	Resistência do fio quente em uma temperatura de referência
S	Área normal à direção da transferência de calor
T	Temperatura
T ₀	Temperatura de referência
T _F	Temperatura do fio quente
T _G	Temperatura do fio quente em uma temperatura de referência
T _M	Temperatura do meio com o qual ocorrerá a troca de calor por convecção
t	Tempo
t _{ST}	Coeficiente da distribuição t de Student
U	Velocidade linear
U _{exp}	Incerteza expandida
U _{med}	Velocidade medida na calibração
UAD_T	Incerteza-padrão relacionada à leitura de temperatura pelo conversor A/D
UAD_U	Incerteza-padrão relacionada à leitura de velocidade pelo conversor A/D
U _C	Incerteza combinada
U _{C_T1}	Incerteza combinada da medição de temperatura
U _{C_U1}	Incerteza combinada da medição de velocidade
ULCD	Incerteza-padrão relacionada à resolução da medida mostrada no LCD
UMED_T	Incerteza-padrão relacionada à medida de temperatura
UMED_U	Incerteza-padrão relacionada à medida de velocidade
U _P	Incerteza-padrão da média
USMP1	Incerteza-padrão do anemômetro de referência com hélice
USMP2	Incerteza-padrão do anemômetro de referência com tubo de Pitot
USMP3	Incerteza-padrão do banho utilizado para calibração de temperatura
V	Tensão elétrica
V _{ef}	Número de graus de liberdade efetivos
V _{ef_T1}	Número de graus de liberdade efetivos da medição de temperatura
V _{ef_U1}	Número de graus de liberdade efetivos da medição de velocidade
V _F	Tensão sobre o sensor de fio quente
V _{LIB}	Número de graus de liberdade de uma medida
V _{MED_T}	Número de graus de liberdade relacionados à medição de temperatura

V_{MED_U}	Número de graus de liberdade relacionados à medição de velocidade
V_o	Tensão de saída do amplificador que realimenta a ponte de Wheatstone
V_{o2_T}	Tensão de saída do circuito de tratamento do sinal de temperatura
V_{o2_U}	Tensão de saída do circuito de tratamento do sinal de velocidade
X	Constante obtida a partir de parâmetros físicos do sensor e do fluido
Y	Constante obtida a partir de parâmetros físicos do sensor e do fluido
y	Variável de saída de uma equação diferencial de 1ª ordem
y_c	Solução completa de uma equação diferencial de 1ª ordem
y_h	Solução homogênea de uma equação diferencial de 1ª ordem
y_p	Solução particular de uma equação diferencial de 1ª ordem
Z	Condição inicial de uma equação diferencial de 1ª ordem
α_r	Coefficiente de temperatura da resistividade
ΔT	Variação de temperatura
μ_G	Viscosidade dinâmica do fluido
ρ	Resistividade
ρ_e	Massa específica do fluido
ρ_0	Resistividade em uma temperatura de referência
τ	Constante de tempo

LISTA DE SIGLAS

A/D	Analógico/Digital
DC	<i>Direct Current</i> (Corrente Contínua)
EDO	Equação Diferencial Ordinária
GUM	<i>Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement</i> (Guia para a Expressão da Incerteza de Medição)
HP	<i>Horse-Power</i> ou Cavalo-Vapor, unidade de medida de potência
Inmetro	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
I/O	Entrada/saída
LCD	<i>Liquid Crystal Display</i> (Display de Cristal Líquido)
NTC	<i>Negative Temperature Coefficient</i> (Coeficiente Negativo de Temperatura)
PTC	<i>Positive Temperature Coefficient</i> (Coeficiente Positivo de Temperatura)
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i> (Modulação por Largura de Pulso)
rpm	Rotações por minuto, unidade de medida de velocidade angular
RTD	<i>Resistive Temperature Detector</i> (Detector Resistivo de Temperatura)
SI	Sistema Internacional de Unidades
SMC	Sistema de Medição sob Calibração
SMP	Sistema de Medição Padrão
VIM	Vocabulário Internacional de Metrologia

SUMÁRIO

SUMÁRIO	12
1 INTRODUÇÃO	15
1.1 PROBLEMA	15
1.2 JUSTIFICATIVA	15
1.3 OBJETIVOS.....	16
1.3.1 Objetivo geral	16
1.3.2 Objetivos específicos	16
1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	17
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1 CONCEITOS FUNDAMENTAIS	18
2.1.1 Transferência de calor	18
2.1.2 Grandezas elétricas	18
2.1.2.1 Resistividade e resistência elétrica	18
2.1.2.2 Potência elétrica	19
2.1.3 Metrologia	19
2.1.3.1 Sensor	20
2.1.3.2 Instrumento de medição	20
2.1.3.3 Tipos de erro de medição	20
2.1.3.4 Incerteza de medição	21
2.1.3.5 Exatidão	21
2.1.3.6 Precisão	21
2.1.3.7 Resolução	22
2.1.3.8 Sensibilidade	22
2.1.3.9 Linearidade.....	22
2.1.3.10 Faixa nominal	22
2.1.3.11 Calibração de um instrumento de medição	23

2.2 MÉTODOS DE MEDIÇÃO DE VELOCIDADE	25
2.2.1 Rotativos	25
2.2.2 Pressão.....	26
2.2.3 Ultrassom	27
2.2.4 Medição a laser	27
2.2.5 Térmicos.....	27
2.3 MÉTODOS DE MEDIÇÃO DE TEMPERATURA.....	32
2.4 MODELAGEM DO FILAMENTO E DO FLUIDO	34
3 METODOLOGIA.....	40
3.1 ESCOLHA E CARACTERIZAÇÃO DOS SENSORES	40
3.2 IMPLEMENTAÇÃO E MONTAGEM DO PROTÓTIPO	40
3.3 TESTES E CALIBRAÇÃO	41
3.4 VALIDAÇÃO.....	43
4 IMPLEMENTAÇÃO.....	44
4.1 ESCOLHA DOS SENSORES.....	44
4.2 CONFECÇÃO DOS SENSORES.....	45
4.3 CARACTERIZAÇÃO DOS SENSORES.....	47
4.3.1 Sensor de velocidade.....	47
4.3.2 Sensor de temperatura	48
4.4 CIRCUITOS DE TRATAMENTO DE SINAL.....	48
4.4.1 Circuito para velocidade.....	49
4.4.2 Circuito para temperatura.....	50
4.5. MONTAGEM DO TÚNEL DE VENTO.....	51
4.6. DETERMINAÇÃO DAS EQUAÇÕES.....	54
4.6.1 Velocidade	54
4.6.2 Temperatura.....	60
4.7 IMPLEMENTAÇÃO DO INSTRUMENTO.....	62

4.7.1 Microcontrolador escolhido	62
4.7.2 Firmware	62
4.7.3 Montagem prática do instrumento	64
4.8 CALIBRAÇÃO	65
4.8.1 Medições realizadas	65
4.8.2 Determinação das incertezas de medição	69
4.8.2.1 Determinação das fontes de incerteza para velocidade e temperatura.....	69
4.8.2.2 Determinação da incerteza de medição da velocidade	71
4.8.2.3 Determinação da incerteza de medição da temperatura	75
4.9 ANÁLISE DE RESULTADOS	77
4.10 ANÁLISE DE CUSTOS	78
5 CONCLUSÃO	80
5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS	80
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	82
REFERÊNCIAS	83

1 INTRODUÇÃO

A medição exata da velocidade de um fluido é uma tarefa complexa, pois tal grandeza pode sofrer rápidas variações em magnitude e direção. Ao longo da História, diversos métodos de medição foram desenvolvidos, cada um com sua própria gama de aplicações.

Em qualquer aplicação prática, busca-se um ponto de equilíbrio entre a exatidão da medida e a simplicidade do instrumento de medição. Para isso, é preciso escolher com cuidado quais variáveis ambientais podem ter sua influência menosprezada ou ignorada no processo de modelagem do sistema, sob pena de introduzir erros significativos nos valores práticos obtidos.

A anemometria térmica é um entre vários métodos possíveis para a medição de velocidade de um fluido líquido ou gasoso. Foi introduzida na primeira metade do século XX, sendo que a topologia empregada nos dias de hoje foi tornada viável comercialmente na década de 50. Tem como grande diferencial a possibilidade de se obter tempos de resposta muito baixos, o que permite medir velocidade em escoamentos turbulentos sem que isso exija um instrumento demasiadamente complexo e caro.

1.1 PROBLEMA

Implementar um sistema de medição de velocidade do ar em uma dimensão que tenha incerteza de medição máxima de 5% em toda a faixa e tempo de resposta na ordem de segundos. Essa solução deve ter custo comparável ao adotado nos instrumentos já existentes para essa finalidade.

1.2 JUSTIFICATIVA

O anemômetro de fio quente permite a obtenção de um tempo de resposta inferior a outros tipos de medidores de velocidade, como o anemômetro de filme, o que o torna mais indicado para detectar rápidas variações de velocidade sem comprometer em termos de exatidão. Além disso, as dimensões reduzidas do fio permitem medir a velocidade do ar em regiões de dimensões reduzidas e/ou de difícil

acesso. Somada a isso, há a possibilidade de se medir a velocidade do ar em mais de uma dimensão.

Portanto, o anemômetro de fio quente, sendo devidamente dimensionado e implementado, pode atender aos requisitos desejados para o projeto. Além disso, terá baixa necessidade de manutenção e complexidade coerente com a necessidade de se manter custos compatíveis com os equipamentos já disponíveis no mercado.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo geral

Desenvolver e implementar um anemômetro a fio quente para medição da velocidade do ar numa determinada direção.

1.3.2 Objetivos específicos

- a) modelar o comportamento físico de um fio condutor quando submetido a uma corrente elétrica, estando exposto ao ar atmosférico;
- b) implementar as equações que relacionam a velocidade do ar à variação correspondente de uma grandeza elétrica;
- c) calibrar o instrumento de acordo com os métodos de determinação de incerteza previstos na norma GUM do Inmetro;
- d) validar a modelagem matemática utilizada através de um conjunto de medições práticas;
- e) verificar se o instrumento desenvolvido atende simultaneamente às seguintes especificações: incerteza de medição máxima de 5% em toda a faixa de velocidade; faixa de temperatura de 0 a 50 °C para o ar cuja velocidade será medida; resolução de 0,1 m/s; tempo de resposta na ordem de segundos;

- f) realizar uma análise de custos para o instrumento desenvolvido, de modo que se possa compará-lo nesse quesito aos produtos disponíveis no mercado.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

No capítulo 1, é feita uma breve introdução ao tema da anemometria térmica. Em segundo lugar, são detalhados os objetivos a serem alcançados no decorrer do trabalho, tanto em termos gerais quanto em termos específicos. Por fim, é descrita a estrutura do trabalho. No capítulo 2, são reunidos conceitos de Transferência de Calor, Eletricidade e Instrumentação. Com base nesses conceitos, é demonstrada a modelagem matemática do comportamento do fio quente a ser utilizado como sensor de velocidade e da interação deste com o ar atmosférico no qual estará imerso. No capítulo 3, são descritos os procedimentos de projeto, montagem, teste e calibração do protótipo do anemômetro a fio quente. No capítulo 4, é detalhada a implementação prática dos passos descritos no capítulo 3. Além disso, é feita uma análise dos resultados obtidos e dos custos envolvidos no projeto. No capítulo 5, são tecidas as considerações finais referentes ao trabalho sob todos os aspectos, especialmente em relação ao cumprimento dos objetivos traçados. São sugeridas possíveis melhorias e caminhos a serem seguidos em futuros trabalhos. Por fim, no capítulo 6 serão listadas as referências utilizadas no decorrer da pesquisa que embasa este projeto.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, será apresentado o referencial teórico utilizado para o desenvolvimento do trabalho.

2.1 CONCEITOS FUNDAMENTAIS

Nesta seção, serão apresentados os conceitos fundamentais utilizados no trabalho, que são os relacionados à transferência de calor, grandezas elétricas e metrologia.

2.1.1 Transferência de calor

A energia transferida entre uma substância e outra, se esse processo ocorre devido a uma diferença de temperatura existente entre elas, é denominada de calor. No SI (Sistema Internacional de Unidades), o calor é medido em Joules (J), a mesma unidade de medida da energia, mas outras unidades são eventualmente utilizadas, como a caloria (cal) e a unidade térmica inglesa (Btu, da sigla em inglês).

A transferência de calor pode ocorrer de três formas: por condução, convecção e radiação, porém esta última será omitida por não ser relevante para o projeto. Na condução, o calor é transferido átomo a átomo dentro do material, da região mais quente, que contém mais energia cinética a nível atômico, para a mais fria. Já na convecção, a transferência de calor ocorre entre uma superfície sólida e o fluido (líquido ou gás) em movimento adjacente à superfície. Quando o fluido for forçado a escoar sobre uma superfície por meios externos, a convecção será denominada forçada. Do contrário, ela será livre ou natural (YOUNG, 2008).

2.1.2 Grandezas elétricas

Nesta seção, serão apresentados os conceitos de resistividade, resistência e potência elétrica.

2.1.2.1 Resistividade e resistência elétrica

A resistividade ρ de um material, dada em $\Omega \cdot m$, é a razão entre o campo elétrico E , dado em V/m , e a densidade de corrente J , dada em Amperes por metro quadrado.

A resistividade varia com a temperatura. Em uma temperatura de referência T_0 , a resistividade será ρ_0 . O coeficiente de temperatura da resistividade α_r se relaciona com esses parâmetros a partir da equação 1 (AGUIRRE, 2013).

$$\rho = \rho_0[1 + \alpha_r(T - T_0)] \quad (1)$$

A resistência elétrica é a oposição de um elemento à passagem de corrente elétrica, e sua unidade é o Ohm (Ω). A resistência elétrica, por ser uma propriedade física do material, pode variar quando condições internas ou externas se alteram, como a temperatura.

2.1.2.2 Potência elétrica

Potência é a taxa de absorção ou consumo de energia, e sua unidade é o Watt (W). É dada pelo produto da tensão v pela corrente i , ou pela razão entre o quadrado da tensão e a resistência elétrica. Se a potência tem sinal positivo, ela está sendo entregue a um elemento. Se ela tiver sinal negativo, estará sendo fornecida pelo elemento (ALEXANDER, 2013).

2.1.3 Metrologia

No Vocabulário Internacional de Metrologia (VIM), uma grandeza é definida como “propriedade de um fenômeno, de um corpo ou de uma substância que se pode expressar quantitativamente sob a forma de um número e de uma referência”. As grandezas físicas geralmente tem um valor associado a uma unidade de medida (VIM, 2012).

Uma medição pode ser direta ou indireta. No primeiro caso, a grandeza desejada é medida diretamente, com um instrumento próprio para este fim. Um exemplo é a medição de comprimento de uma peça utilizando um paquímetro. Já no segundo caso, a determinação da grandeza desejada é realizada depois da medição de uma ou mais grandezas associadas a ela. Um exemplo é a obtenção da massa específica de um objeto a partir da medição da sua massa e do seu volume (BALBINOT, 2010).

2.1.3.1 Sensor

Sensor é um elemento de um sistema de medição que é diretamente afetado por um fenômeno, corpo ou substância que contém a grandeza a ser medida (VIM, 2012).

2.1.3.2 Instrumento de medição

Um instrumento de medição é um dispositivo eletrônico, eletromecânico ou mecânico que integra um ou mais sensores e/ou transdutores a um sistema de processamento do valor da variável sendo medida. Um instrumento analógico fornece uma saída que é função contínua da entrada, já um instrumento digital gera uma indicação digital na sua saída (BALBINOT, 2010).

2.1.3.3 Tipos de erro de medição

A diferença entre o valor medido de uma variável e um valor de referência é denominada de erro de medição. Existem dois tipos de erro: aleatório e sistemático (VIM, 2012). O erro aleatório é o valor medido menos o valor médio que resultaria de infinitas medições do mesmo mensurando sob condições ambientais e experimentais iguais. Como somente um número finito de medições é possível de ser realizado, pode-se obter apenas uma estimativa do erro aleatório. Este erro é fruto de variações imprevisíveis em quaisquer grandezas que influenciam na medição, logo não pode ser eliminado, somente atenuado com um maior número de repetições da mesma medição.

O erro sistemático resulta do erro menos o erro aleatório, ou ainda da média de infinitas medições do mesmo mensurando menos o valor verdadeiro deste. Este erro pode ter seu valor estimado a partir do erro médio encontrado após um certo número de medições repetidas. Para um instrumento de medição, o erro sistemático é conhecido como tendência. Esse erro não varia com o número de medições e não pode ser eliminado, mas pode ser minimizado aplicando um fator de correção durante o processo de calibração (BALBINOT, 2010).

2.1.3.4 Incerteza de medição

A incerteza de medição é um parâmetro não-negativo que expressa a faixa de valores dentro da qual o valor verdadeiro estará, com uma certa probabilidade, contido. Pode ser expressa na forma de um desvio-padrão. A incerteza não pode ser usada, portanto, para corrigir um resultado, mas sim para representá-lo dentro de uma faixa provável de localização.

2.1.3.5 Exatidão

A exatidão de medição é um conceito qualitativo que pode ser definido como o valor absoluto da diferença entre o valor medido e o valor verdadeiro do mensurando, não podendo ser representada por um valor numérico. Geralmente, a exatidão é expressa em forma de classes, com o objetivo de assegurar que o instrumento mantenha a sua incerteza de medição dentro de limites especificados. Uma medição será mais exata quanto menor for a sua incerteza.

2.1.3.6 Precisão

A precisão é o grau de concordância entre medições repetidas, sendo expressa numericamente na forma de medidas de dispersão como o desvio padrão e a variância, sob determinadas condições de medição (BALBINOT, 2010). A exatidão está associada ao erro sistemático e, se este pode ser determinado, é possível tornar o instrumento mais exato adicionando uma correção a todas as medidas. Já a precisão está atrelada ao erro aleatório do sistema (AGUIRRE, 2013).

A figura 1 torna mais clara a diferença entre precisão e exatidão.

Figura 1 - Diferentes combinações de precisão e exatidão



Fonte: Adaptado de SILVA (2013).

Na figura 1, o centro do alvo representa o valor verdadeiro da medição, enquanto que os pontos representam diferentes repetições da mesma medição.

2.1.3.7 Resolução

A resolução é definida como a menor variação do mensurando que pode ser percebida na medição. Em um instrumento com mostrador digital, a resolução representa a magnitude equivalente à variação de uma unidade no dígito menos significativo do valor medido (BALBINOT, 2010).

2.1.3.8 Sensibilidade

A sensibilidade é definida como a razão entre a variação da saída e a variação da entrada que a originou, ambas as variações em regime permanente de operação. Se a curva de resposta for linear, a sensibilidade será uma constante. Do contrário, ela irá variar com a declividade da curva. Entradas espúrias variando no tempo podem gerar variações significativas na saída caso tenham amplitude comparável à entrada de interesse do sistema (AGUIRRE, 2013).

2.1.3.9 Linearidade

A linearidade é um parâmetro que indica o máximo desvio da curva de saída em função da entrada (que melhor descreve os pontos reais) em relação à curva real do instrumento. É representada como percentual do fundo de escala do instrumento. Esse valor somente tem sentido se o sistema de medição tiver resposta linear. Do contrário, é utilizado o termo conformidade, porém o conceito se mantém.

2.1.3.10 Faixa nominal

A faixa nominal ou *range* é o intervalo de valores que podem ser medidos, por exemplo a faixa nominal será de 0 a 1000 Volts para um multímetro capaz de medir tensões entre esses valores. A amplitude da faixa nominal ou *span* é a diferença entre os limites superior e inferior de valores que podem ser medidos pelo instrumento (BALBINOT, 2010).

2.1.3.11 Calibração de um instrumento de medição

A calibração permite estabelecer a relação estática (em regime permanente de operação) entre o mensurando e a saída do instrumento. A partir da calibração de um sensor, é possível determinar parâmetros como linearidade, sensibilidade, exatidão e histerese (AGUIRRE, 2013).

Um padrão é uma medida materializada, instrumento de medição ou material de referência destinado a definir, realizar, conservar ou reproduzir uma unidade ou um ou mais valores de uma grandeza para servir de referência para a calibração de outros dispositivos. Tem sempre uma incerteza mais baixa do que dispositivos convencionais.

O resultado de uma calibração permite definir os valores do mensurando para diversos valores dentro da faixa de utilização do instrumento, bem como as correções que devem ser aplicadas. Os resultados obtidos pela calibração são registrados em um certificado de calibração, que descreve as condições ambientais e métodos experimentais utilizados. Isso permite comparar o sistema calibrado com as exigências apresentadas em normas técnicas, permitindo a emissão de um parecer de conformidade para o sistema de medição calibrado.

Uma calibração pode ser direta ou indireta. Na calibração direta, o padrão utilizado consiste em uma ou mais medidas materializadas. Um exemplo de calibração direta consiste em utilizar massas-padrão para calibrar uma balança.

Certas grandezas não dispõem de padrões ou, se existem, sua utilização não é praticável. A calibração indireta permite lidar com esses problemas. Nesse método, a grandeza a ser medida é gerada por um dispositivo auxiliar, sendo que seu valor não tem que ser plenamente conhecido, mas deve ser estável. A medição é realizada pelo sistema sob calibração (SMC) e por um sistema de medição padrão (SMP). Estas medições são comparadas no processo de calibração (GONÇALVES JÚNIOR, 2008).

Em ambos os casos, a incerteza do padrão é dez ou mais vezes inferior à do instrumento sendo calibrado (AGUIRRE, 2013).

A calibração para medições diretas onde existem várias fontes de incerteza envolve, em primeiro lugar, identificar todas as fontes de incerteza que podem interferir na medição, sem desprezar nenhuma delas. Em segundo lugar, é preciso determinar a correção (erro sistemático) que cada fonte de incerteza impõe ao sistema de medição.

A etapa seguinte da calibração é determinar a incerteza-padrão associada a cada fonte de incerteza, ou seja, a contribuição aleatória de cada uma delas para o valor total. Esse procedimento pode ser realizado por procedimentos estatísticos e não-estatísticos.

Quando se estima a incerteza-padrão de uma fonte de incerteza com base em uma série de medições repetidas do mesmo mensurando, tem-se um procedimento estatístico, ou do tipo A.

Se o mensurando for constante e seu valor for calculado a partir da média de md medições repetidas, a incerteza-padrão u_P da média será dada pela razão entre o desvio-padrão DP do conjunto de medições e a raiz quadrada do número de medições realizado, conforme a equação 2.

$$u_P = DP/\sqrt{md} \quad (2)$$

O número de graus de liberdade v_{LIB} envolvidos na obtenção da incerteza-padrão é igual a md descontado de uma unidade. É calculado também um fator de correção C_{MED} decorrente do desvio da média das medidas em relação ao valor verdadeiro, assumido como sendo cada ponto de calibração.

Nas situações em que não é prático ou possível utilizar procedimentos estatísticos para determinar a incerteza-padrão, são utilizados os procedimentos não-estatísticos ou do tipo B. Informações extraídas de especificações técnicas do sistema, de medições anteriores, de certificados de calibração ou até estimativas de especialistas podem ser levadas em consideração. Com base nisso, determina-se a distribuição estatística na qual os erros do sistema melhor se enquadram. Quando não existem dados suficientes para esse procedimento, é assumida a distribuição retangular, que gera a maior incerteza dentre as distribuições comumente utilizadas (normal, retangular e triangular). No caso de uma distribuição retangular, a incerteza-padrão será dada pela equação 3.

$$u_P = a_{fv}/\sqrt{3} \quad (3)$$

Na equação, a_{fv} representa metade da faixa de variação considerada para a fonte de incerteza. Quando a distribuição de probabilidades é tida como conhecida, o número de graus de liberdade v_{LIB} é infinito.

O próximo passo da calibração é determinar a incerteza combinada u_C de todas as fontes de incerteza associadas ao sistema de medição. Para isso, é utilizada a equação 4.

$$u_C = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + \dots + u_n^2} \quad (4)$$

Uma vez determinada a incerteza combinada, é preciso calcular o número de graus de liberdade equivalente à combinação de todas as fontes de incerteza. Esse valor é denominado de número de graus de liberdade efetivos V_{ef} , dado pela equação de Welch-Satterthwaite:

$$\frac{u_C^4}{V_{ef}} = \frac{u_1^4}{v_1} + \frac{u_2^4}{v_2} + \dots + \frac{u_n^4}{v_n} \quad (5)$$

A incerteza combinada é o desvio-padrão que resulta da ação conjunta de todas as fontes de incerteza. Para obter a faixa de valores dentro da qual, com uma certa probabilidade (em geral, 95%), espera-se encontrar o erro aleatório da medição, é preciso multiplicar a incerteza combinada pelo respectivo coeficiente t_{ST} da distribuição t de Student. O resultado é a incerteza expandida U_{exp} , que é a repetitividade da ação combinada de todas as fontes de incerteza. A incerteza expandida é dada pela equação 6 (GONÇALVES JÚNIOR, 2008).

$$U_{exp} = t_{ST} * u_C \quad (6)$$

Com esses procedimentos, é possível avaliar a incerteza de medição de um instrumento e gerar um certificado de calibração.

2.2 MÉTODOS DE MEDIÇÃO DE VELOCIDADE

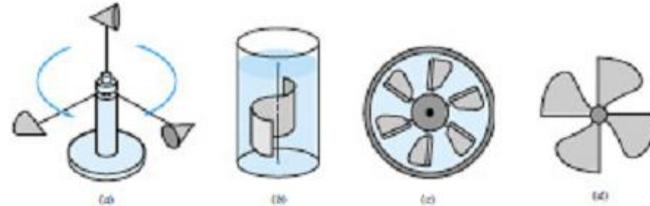
A medição de velocidade pode ser feita por processamento matemático a partir da medição de aceleração ou deslocamento, ou por métodos indiretos que forneçam uma correlação entre a velocidade e a grandeza física sendo efetivamente medida (BALBINOT, 2011).

2.2.1 Rotativos

Os métodos rotativos de medição de velocidade são baseados na conversão do movimento giratório de um rotor em uma grandeza elétrica, estando o rotor exposto ao escoamento de um fluido líquido ou gasoso. Os instrumentos para medição da

velocidade do ar são denominados anemômetros. A figura 2 mostra quatro configurações possíveis de anemômetros rotativos.

Figura 2 - Anemômetros (a) rotativo de conchas; (b) de Savonius; (c) de hélice em duto; (d) em escoamento livre



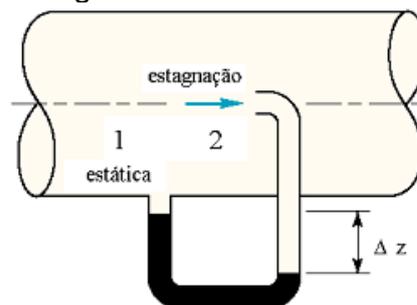
Fonte: SCHNEIDER (2012).

Esses dispositivos medem a velocidade do ar apenas em um sentido. Esta será proporcional à rotação do eixo. Devido às dimensões físicas, esses instrumentos não permitem a medição da velocidade em pontos específicos dentro do espaço adjacente às hélices (SCHNEIDER, 2012).

2.2.2 Pressão

A partir da medição das pressões estática e de estagnação, cuja diferença resulta na pressão dinâmica, e da utilização de um tubo de Pitot, é possível medir a velocidade de uma corrente de escoamento no interior de um tubo (SCHNEIDER, 2012). A figura 3 esquematiza o tubo de Pitot.

Figura 3 - Tubo de Pitot



Fonte: SCHNEIDER (2012).

Quanto maior a velocidade de escoamento do fluido, maior a diferença entre as pressões de estagnação e estática, e maior a diferença de altura Δz mostrada na figura. O tubo de Pitot não é recomendado para escoamentos com rápida variação de velocidade, pois a resposta da coluna manométrica do dispositivo é lenta.

Para minimizar erros de medição, a sonda deve ser posicionada paralelamente à corrente do escoamento. Se esse cuidado não for tomado, pressões transversais

produzirão desvios positivos na pressão estática e desvios negativos na pressão de estagnação (SCHNEIDER, 2012).

2.2.3 Ultrassom

A anemometria por ultrassom utiliza um elemento piezoelétrico para produzir ondas de pressão em frequências acima da faixa audível (dezenas ou centenas de kHz). É baseada no efeito Doppler, que determina que a frequência observada de uma onda depende da velocidade relativa entre o emissor e o observador.

Um transmissor, que pode ser um cristal oscilador ou uma cerâmica piezoelétrica, emite um sinal de frequência ultrassônica, que é parcialmente refletido pelas partículas e/ou bolhas do fluido, sendo a reflexão captada por um receptor. O desvio da frequência do sinal recebido em relação ao transmitido será proporcional à velocidade das partículas e/ou bolhas nas quais o sinal foi refletido. Para que a medição seja possível, o fluido deve conter partículas ou bolhas capazes de refletir o sinal de ultrassom. Para que a medição seja útil, estes elementos devem estar à mesma velocidade que o restante do fluido.

2.2.4 Medição a laser

A técnica de duplo feixe é a mais utilizada na anemometria a laser. São utilizados dois feixes de laser para medir uma componente de velocidade, e estes incidem em ângulos diferentes sobre uma mesma região do escoamento do fluido. Formam-se franjas de Fresnel e, à medida que as partículas atravessam as franjas, passam sucessivamente por regiões claras e escuras. Um sensor externo, como um fotodiodo, capta uma onda pulsada cuja frequência depende da velocidade das partículas e da distância entre franjas sucessivas (AGUIRRE, 2013).

2.2.5 Térmicos

O método térmico mais utilizado é o anemômetro a filme ou a fio quente. Tem como particularidades uma rápida resposta a variações abruptas de velocidade, caso o sistema seja bem dimensionado, e a possibilidade de medir velocidade em regiões pontuais do escoamento e em mais de uma dimensão.

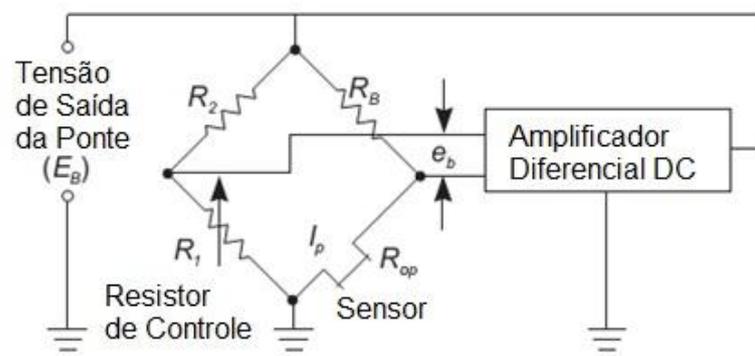
Tem como desvantagens a possibilidade de contaminação do sensor por impurezas do fluxo, prejudicando a qualidade das medições e a resposta em

frequência. No caso de sensor de fio, existe a possibilidade de quebra ou queima do elemento aquecido. Para mais de uma coordenada, requer mais de um fio, o que aumenta o risco de ocorrência dessas falhas. Além disso, não permite medir velocidade em meios hostis, como aqueles com risco de combustão. Em fluxos altamente turbulentos, aparecem erros significativos decorrentes de simplificações na modelagem do sistema (CHOPRA, 2008).

Os anemômetros térmicos medem a velocidade de um fluido detectando as variações na transferência de calor entre um elemento eletricamente aquecido (filme metálico depositado em um substrato ou fio fino) e o fluido líquido ou gasoso cuja velocidade se quer medir. Podem ser divididos em três tipos: tensão constante, corrente constante ou temperatura constante. Cada tipo mantém a grandeza correspondente ao nome constante, permitindo que as demais variem. Neste trabalho, será dada ênfase ao anemômetro à temperatura constante, que atualmente é considerado o “estado da arte” da anemometria térmica.

O anemômetro térmico à temperatura constante consiste basicamente em um sensor de fio ou filme metálico aquecido por meio da aplicação de uma potência controlada sobre ele. Como o sensor estará exposto a um fluido (líquido ou gasoso), perderá energia térmica para o meio, e essa perda de calor será tão mais intensa quanto maior for a velocidade do fluido. Essa perda de energia se traduzirá em um resfriamento do sensor e, por consequência, em uma queda na sua resistência elétrica e um aumento da corrente sobre ele, o que se reflete na tensão de saída. Com isso, o circuito de controle poderá correlacionar a velocidade do fluido com a tensão produzida (TSI, 2013). A topologia mais usual para o circuito de controle do sensor consiste em uma ponte de Wheatstone associada a um amplificador diferencial, conforme indicado na figura 4.

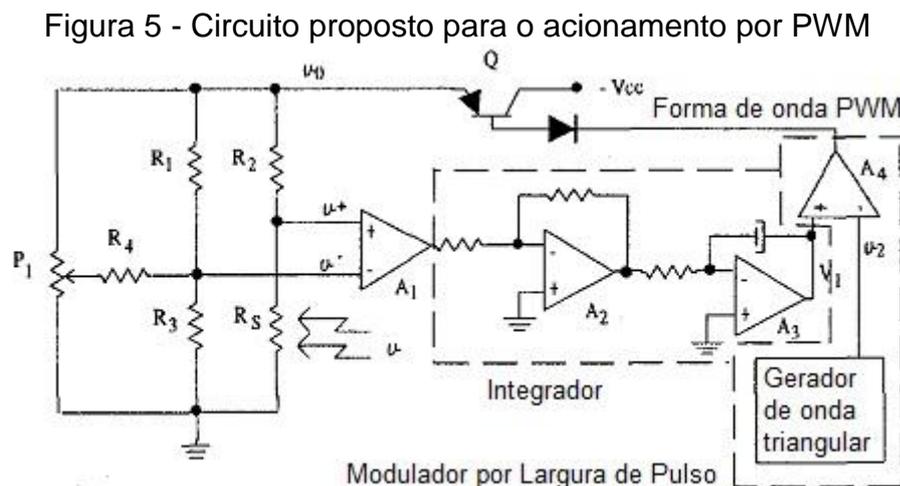
Figura 4 - Circuito básico do anemômetro de fio ou filme metálico aquecido



Fonte: Adaptado de TSI (2013).

Nesse caso, quando a velocidade varia, a tensão de erro E_b varia, alterando a tensão de saída do amplificador diferencial, o que altera a tensão aplicada à ponte de Wheatstone. Com isso, a corrente no sensor se altera de modo a restaurar a sua resistência ao valor original (antes da variação da velocidade) (CHOPRA, 2008).

Existe também o método de excitação por PWM aplicado ao anemômetro de fio quente. Nesse caso, o sensor é aquecido por um pulso de tensão em um primeiro momento. A seguir, o pulso é removido e um contador digital é disparado, sendo que a contagem cessa quando o sensor tiver atingido um certo limiar mínimo de temperatura. Com isso, a contagem de pulsos será proporcional à velocidade do fluido, e um conversor A/D torna-se desnecessário para o processamento do valor obtido. Na figura 5, é apresentado um circuito implementado na literatura para esse método.



Fonte: Adaptado de OLIVEIRA (1995).

No circuito proposto, que é semelhante ao básico anteriormente comentado, um integrador é empregado para produzir uma tensão de controle tal que permita a geração de um sinal de realimentação PWM. Tal procedimento pode prejudicar a resposta do sistema para variações bruscas de velocidade do fluido, uma vez que o integrador, por natureza, introduz um atraso na resposta do circuito (OLIVEIRA, 1995).

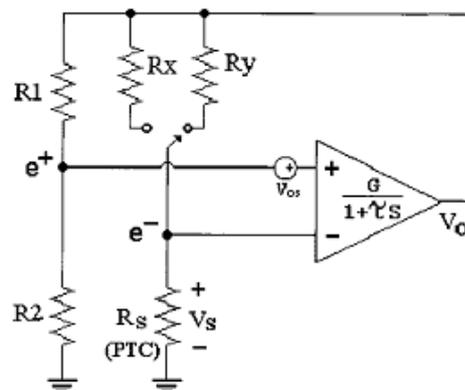
Os sensores utilizados em anemômetros térmicos podem ter formato de fio (4 a $6\mu\text{m}$ de diâmetro e 1mm de comprimento) ou formato de filme metálico depositado sobre um substrato de quartzo. O tungstênio é um material resistente e que tem alto coeficiente de variação da resistência com a temperatura. Porém, deteriora-se no contato com meios oxidantes em alta temperatura. Nesse caso, são utilizados fios de platina ou uma liga platina-irídio para uma maior resistência mecânica (TSI, 2013).

É preciso implementar um método de compensação para tornar a velocidade medida independente da temperatura do meio em que está sendo feita a medição, uma vez que ambas as variáveis interferem na perda de calor do sensor aquecido para o meio. Sem essa precaução, é introduzido um erro entre 1 e 2% para cada °C de variação na temperatura do fluido em relação à temperatura calibrada.

Um método proposto é a utilização de dois resistores R_x e R_y e de um circuito de chaveamento que ligue o sensor de fio ou filme alternadamente a um e a outro resistor. O objetivo é alterar a temperatura do sensor de modo a avaliar matematicamente qual o desvio introduzido pela temperatura do fluido na medição (FERREIRA, 2001).

O esquema proposto é mostrado na figura 6, onde um sensor PTC (*Positive Temperature Coefficient*), cuja resistência elétrica é diretamente proporcional à temperatura, é empregado como o elemento sendo aquecido.

Figura 6 - Circuito proposto para a compensação de temperatura



Fonte: FERREIRA (2001).

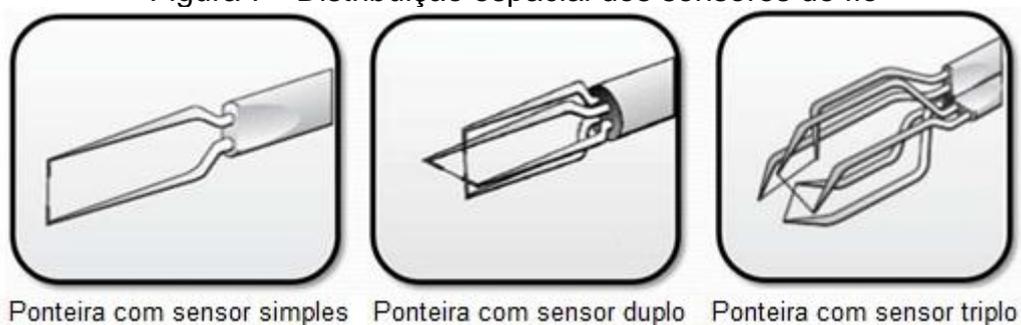
Um segundo método, de utilização mais comum, consiste em tomar uma amostra da temperatura do fluido através de um segundo sensor, este sem aquecimento, de modo a permitir a determinação da influência da temperatura ambiente sobre a medição do sensor aquecido. Uma forma de processamento consiste em utilizar um sistema digital de aquisição de dados para determinar qual a faixa de temperaturas dentro da qual a temperatura lida pelo sensor não-aquecido se encontra. A partir disso, a velocidade é calculada para os dois valores extremos da faixa (para os quais existem dados prévios de calibração), e por fim um método de interpolação linear é empregado para refinar o valor de velocidade obtido (FERREIRA, 2010).

Para minimizar perdas por condução de calor para os suportes e ter distribuição uniforme de temperatura, é desejável que a razão entre o comprimento e o diâmetro do sensor de fio, denominada neste trabalho de fator de forma, seja a maior possível. Além disso, um diâmetro mínimo para o fio, ainda que implique em maior fragilidade, permite melhores resposta em frequência, resolução espacial e relação sinal-ruído em altas frequências (CHOPRA, 2008).

O primeiro passo na seleção do sensor requer a avaliação das condições do meio em que ele estará inserido. No caso de gases em alta temperatura, deve-se considerar que sensores de filme resistem até 425°C e sensores de fio de tungstênio suportam até 300°C. Fios de platina suportam temperaturas superiores, mas são mais frágeis. A liga de platina-irídio, como comentado, é mais resistente, porém tem menor coeficiente de variação da resistência com a temperatura. Em meios líquidos, caso forem condutivos, o sensor deve ser isolado, porém isso prejudica a resposta em frequência do sistema de medição. Em líquidos isolantes, como óleo, um sensor não-revestido deve ser utilizado, pois tende a coletar menos contaminação. As técnicas de fabricação de ponteiros para líquidos condutivos limitam a temperatura do fluido a 30°C, em geral.

O segundo passo consiste em determinar o número de componentes de velocidade a serem medidos. Um só sensor cilíndrico perpendicular ao fluxo dará uma boa medição da velocidade instantânea na direção média do fluxo. Dois e três sensores cilíndricos devidamente orientados podem medir, respectivamente, duas e três componentes de velocidade. A figura 7 mostra a distribuição dos sensores para cada caso (TSI, 2013).

Figura 7 - Distribuição espacial dos sensores de fio



Fonte: Adaptado de CHOPRA (2008).

O terceiro passo envolve definir se o sensor será de fio ou de filme. Para medições em baixa turbulência, um fio fino é a melhor escolha. Sensores de fio tem

uma melhor relação sinal-ruído e melhor resposta em frequência do que sensores de filme. Com múltiplos sensores, seu posicionamento fica prejudicado (se alongam e dobram quando aquecidos), gerando erros no cálculo da velocidade.

Porém, a rigidez de sensores cilíndricos de filme os torna recomendados para diversas aplicações, como a medição com múltiplos sensores, na qual o algoritmo de processamento de dados geralmente considera o sensor como rígido. Sensores de filme são menos suscetíveis a danos ou contaminação por partículas presentes no fluxo em relação aos sensores de fio. O quarto passo envolve a seleção da ponteira de medição e do suporte, que depende do acesso ao fluxo e do local da medição (TSI, 2013).

2.3 MÉTODOS DE MEDIÇÃO DE TEMPERATURA

Na prática, a medição de temperatura é geralmente realizada por meio de termistores, termorresistências, termopares, sensores eletrônicos ou pirômetros. Neste trabalho, serão descritos apenas os dois primeiros tipos.

2.3.1 Termistores

Os termistores são sensores cuja resistência elétrica varia com a temperatura. São constituídos pela mistura de óxidos metálicos prensados e sinterizados em diversas formas, e podem ser encapsulados em vidro ou epóxi. A faixa de operação típica é de -100 °C a 300 °C. Tem sensibilidade alta frente a outros sensores de temperatura, entre 3% e 5% por °C, mas tem comportamento não-linear. A tolerância de fabricação geralmente varia entre 5% e 20% (THOMAZINI, 2012). A alta resistividade dos termistores permite dimensões reduzidas e cabos de conexão longos, o que acarreta em resposta rápida às variações de temperatura.

O tipo de termistor cuja resistência aumenta com o aumento da temperatura é conhecido como PTC (Positive Temperature Coefficient – coeficiente positivo de temperatura). Esse comportamento ocorre dentro de uma certa faixa de temperatura apenas. Fora dela, o coeficiente de temperatura é negativo ou nulo. Se forem constituídos de silício, apresentam variação quase linear da resistência com a variação da temperatura. Quando fabricados a partir de titanatos de bário, chumbo ou estrôncio, o comportamento da resistência varia com a temperatura. Para

temperaturas menores que 0°C, a resistência varia de forma inversa à temperatura, de modo análogo aos termistores NTC (Negative Temperature Coefficient – coeficiente negativo de temperatura). Para uma faixa de temperaturas acima de 0°C, a resistência aumenta com o aumento da temperatura, que é o efeito que caracteriza um PTC. Acima dessa faixa, o comportamento de NTC volta a aparecer.

O NTC tem utilização mais usual do que o PTC, mas há carência de padronização entre fabricantes, motivo pelo qual o uso em processos industriais é limitado. Tem menor sensibilidade à variação de temperatura do que o PTC.

Uma forma de linearizar a curva de um termistor e de outros sensores resistivos não-lineares dentro de uma determinada faixa de temperaturas é pelo uso de um resistor fixo em paralelo com o sensor. A desvantagem associada é a redução da sensibilidade do sistema de medição (BALBINOT, 2010).

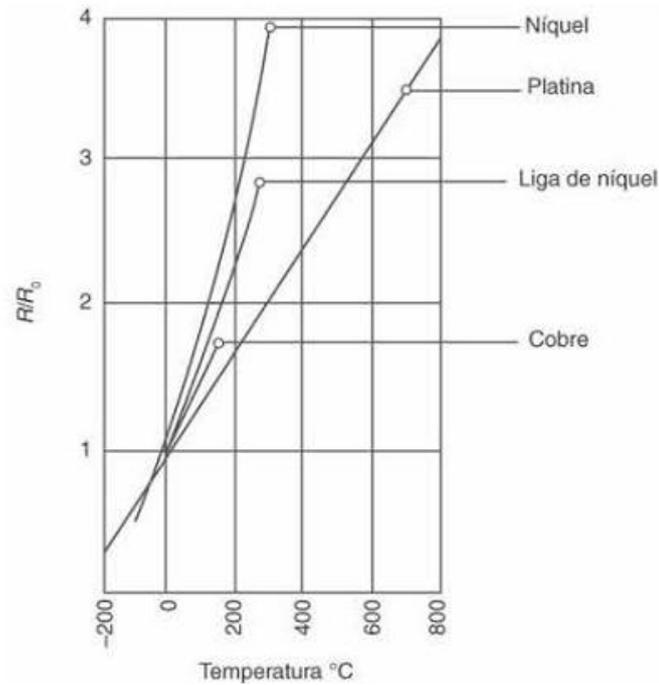
2.3.2 Termorresistências

As termorresistências são condutores metálicos cuja resistência varia de forma praticamente linear com a temperatura. Os principais metais utilizados são a platina e o níquel. Estão sujeitas ao auto-aquecimento, que pode ser limitado por correntes de excitação na ordem de 1 a 2 mA (THOMAZINI, 2012).

Esse tipo de sensor também é conhecido por RTD (*Resistance Temperature Detector* – Detector de Temperatura Resistivo). O RTD mais utilizado na prática é o Pt-100, formado por um filamento de platina. Este tem uma resistência de 100 Ω à temperatura de 0°C.

A platina conserva suas características a altas temperaturas, e tem uma relação resistência-temperatura estável para a faixa entre -184,44 e 648,88°C, sendo mais preciso do que um termopar dentro dessa faixa. Já o níquel mantém essa relação linear até cerca de 300°C. O cobre, assim como a platina, tem comportamento linear, porém sua temperatura de utilização não deve superar 150°C. Na figura 8, é mostrada a variação da resistência desses metais, em relação à observada a 0°C, com a temperatura. Fica clara na figura a maior linearidade da platina e do cobre, e também a maior sensibilidade do níquel (BALBINOT, 2010).

Figura 8 - Resistência relativa frente à temperatura para diversos metais



Fonte: BALBINOT (2010).

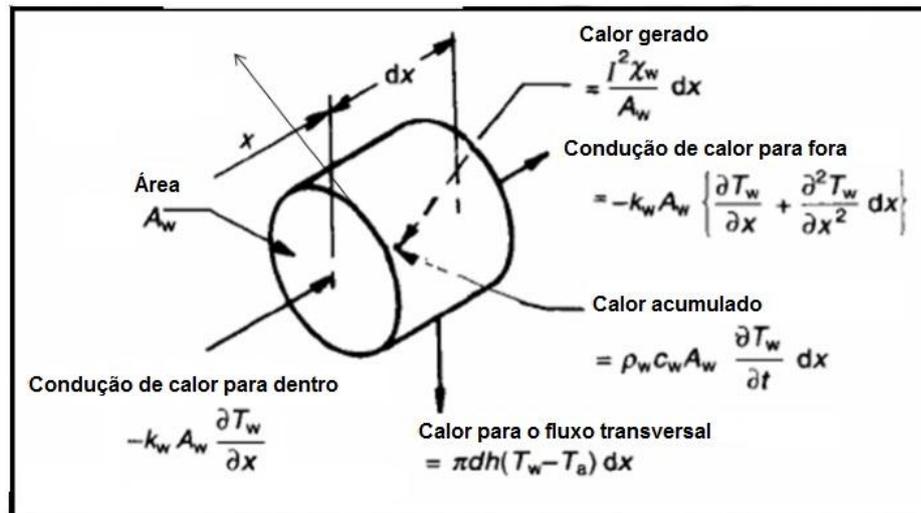
2.4 MODELAGEM DO FILAMENTO E DO FLUIDO

A modelagem da troca de calor entre o filamento e o meio em que este está inserido parte dos conceitos básicos da Termodinâmica. Aplicando o princípio da conservação de energia, tem-se que a potência gerada para alimentar o fio aquecido P_G será a soma da potência transferida ao meio P_T e a potência acumulada no filamento P_A , conforme a equação 7.

$$P_G = P_T + P_A \quad (7)$$

A figura 9 esquematiza os fluxos de calor considerados na modelagem do anemômetro de fio quente.

Figura 9 - Diagrama de fluxo de energia para a modelagem



Fonte: Adaptado de CHOPRA (2008).

Com isso, a potência gerada para alimentar o filamento aquecido dependerá da corrente I_F que circula no fio e da sua resistência R_F , sendo dada pela equação 8.

$$P_G = I_F^2 * R_F \quad (8)$$

A potência P_T , transferida do sensor ao fluido, é dada pela equação 9.

$$P_T = \dot{Q}_{cf} + \dot{Q}_{cn} + \dot{Q}_r + \dot{Q}_{cond} \quad (9)$$

Na equação 9, a transferência de calor por convecção forçada \dot{Q}_{cf} é gerada pelo deslocamento do fluido perpendicularmente ao eixo do fio. A transferência de calor por convecção natural \dot{Q}_{cn} somente é representativa em baixas velocidades do fluido. Assumindo que essa condição não ocorrerá na prática, pode-se ignorar essa grandeza na modelagem. A transferência de calor por radiação \dot{Q}_r é tida como desprezível na faixa de temperatura na qual o anemômetro irá operar, logo também pode ser ignorada.

A transferência de calor por condução \dot{Q}_{cond} ocorre entre o filamento aquecido e os seus suportes, gerando gradientes de temperatura ao longo dele. Esse fenômeno é minimizado pela escolha de um sensor com baixa condutividade térmica e com o máximo comprimento possível. No presente projeto, ele será desprezado porque o fator de forma do fio escolhido será suficientemente alto, o que evita tais efeitos.

Com essas considerações, tem-se que a potência transferida do sensor ao fluido P_T será derivada exclusivamente da convecção forçada \dot{Q}_{cf} , que depende do coeficiente de transferência de calor h , da área S do sensor e das temperaturas do fio

T_F e do meio onde ele está inserido T_M (CHOPRA, 2008). Assim, a equação 10 será válida.

$$P_T = \dot{Q}_{cf} = h * S * (T_F - T_M) \quad (10)$$

A resistência do fio R_F varia com a temperatura de acordo com a equação 11, onde α_r é o coeficiente de temperatura da resistividade do sensor e R_G é a resistência do sensor quando a temperatura do fluido for T_G .

$$R_F = R_G * [1 + \alpha_r * (T_F - T_G)] = R_G * [1 + \alpha_r * \Delta T] \quad (11)$$

Rearranjando a equação 11 para isolar a diferença de temperatura ΔT , tem-se a equação 12.

$$\Delta T = \frac{R_F - R_G}{\alpha_r * R_G} \quad (12)$$

O coeficiente de transferência de calor por convecção h depende de diversas grandezas físicas do fio e do meio, como o diâmetro do fio d_F e alguns parâmetros do fluido gasoso, como sua condutividade térmica k , sua viscosidade dinâmica μ_G , sua massa específica ρ_e , seu calor específico sob pressão constante C_p e sua velocidade U , as quais podem ser agrupadas sob uma equação empírica, que depende dos números de Nusselt (Nu), Prandtl (Pr) e Reynolds (Re), estes obtidos por meio das equações 13, 14 e 15.

$$Nu = \frac{h * d_F}{k} \quad (13)$$

$$Pr = \frac{\mu_G * C_p}{k} \quad (14)$$

$$Re = \frac{\rho_e * U * d_F}{\mu_G} \quad (15)$$

Esses coeficientes são agrupados sob a equação empírica 16 (ATS, 2007).

$$Nu = 0,42 * Pr^{0,2} + 0,57 * Pr^{0,33} + Re^{0,5} \quad (16)$$

Além da equação 13, que relaciona o coeficiente de transferência de calor por convecção h ao número de Nusselt, a variável h pode ser obtida também pela equação 17, onde X , Y e n são constantes obtidas experimentalmente (ARAÚJO, 2014).

$$h = X + Y * U^n \quad (17)$$

Utilizando as equações anteriores e simplificando, tem-se a equação 18 (ATS, 2007).

$$P_T = (R_F - R_G) * (X + Y * U^n) \quad (18)$$

Substituindo a expressão 17 na 10, tem-se a equação 19 (ARAÚJO, 2014).

$$P_T = S * (T_F - T_M) * (X + Y * U^n) \quad (19)$$

O expoente n geralmente recebe o valor 0,5, mas pode ser ajustado para minimizar desvios experimentais. Na equação 18, X e Y são constantes dadas por:

$$X = \frac{0,42 * k * S}{R_G * \alpha_r * d_F} * Pr^{0,2} \quad (20)$$

$$Y = \frac{0,57 * k * S}{R_G * \alpha_r * d_F} * Pr^{0,33} * \left(\frac{\rho e * d_F}{\mu_G} \right)^{0,5} \quad (21)$$

Ainda que as equações 20 e 21 permitam calcular diretamente o valor das constantes X e Y , na prática geralmente não se dispõe de todos os valores necessários para uma substituição direta devido a impurezas na composição do fluido ou simplesmente pela impossibilidade de determinar todos os parâmetros empiricamente. Nesse caso, esse processo é realizado durante a calibração do instrumento, o que será explicado posteriormente.

A energia acumulada no sensor será dada pela equação 22.

$$P_A = \frac{C_p}{\alpha_r * R_G} * \frac{dR_F}{dt} = m * C_p * \frac{dT_F}{dt} \quad (22)$$

Substituindo as equações 8, 18 e 22 na equação 7, tem-se a equação 23.

$$I_F^2 * R_F = (R_F - R_G) * (X + Y * U^n) + \frac{C_p}{\alpha_r * R_G} * \frac{dR_F}{dt} \quad (23)$$

Escrevendo a equação 23 em função da tensão no sensor, é obtida a Lei de King, que correlaciona a tensão no sensor com a velocidade do fluido no decorrer do tempo, expressa pela equação 24 (ATS, 2007).

$$\frac{V_F^2}{R_F} = (R_F - R_G) * (X + Y * U^n) + \frac{C_p}{\alpha_r * R_G} * \frac{dR_F}{dt} \quad (24)$$

2.4.1. Obtenção da resposta dinâmica do sistema

A equação 23 pode ser aproximada para uma equação diferencial ordinária (EDO) linear de 1ª ordem, de modo a permitir a determinação da constante de tempo τ associada ao sensor. O modelo geral de uma EDO de 1ª ordem é dado por:

$$y + \tau * \frac{dy}{dt} = Z \quad (25)$$

Essa equação tem sempre uma solução homogênea y_h , que é própria ao sistema, e uma solução particular y_p , que está associada à entrada imposta ao sistema. Ambas as soluções são independentes entre si, e são mostradas a seguir.

$$y_h = K * e^{-t/\tau}, y_p = Z \quad (26)$$

A constante K é calculada a partir de uma condição inicial do sistema $y(0) = M$. A solução completa y_c é a soma da solução homogênea com a particular. Com isso:

$$y_c(0) = K + Z = M \rightarrow K = M - Z \quad (27)$$

Logo, a solução completa da EDO será:

$$y_c(t) = (M - Z) * e^{-t/\tau} + Z, t = \infty \rightarrow y_c(\infty) = Z \quad (28)$$

Assumindo a corrente no sensor e a velocidade do fluido como constantes e reorganizando a equação 23 para separar os termos de ordem diferente, tem-se:

$$R_G * (X + Y * U^n) = R_F * [(X + Y * U^n) - I_F^2] + \frac{C_p}{\alpha_r * R_G} * \frac{dR_F}{dt} \quad (29)$$

$$R_F + \frac{C_p}{\alpha_r * R_G} * \frac{1}{[(X + Y * U^n) - I_F^2]} * \frac{dR_F}{dt} = \frac{R_G * (X + Y * U^n)}{[(X + Y * U^n) - I_F^2]} \quad (30)$$

Comparando a equação 28 com a equação 30, tem-se a equação 31.

$$R_F(\infty) = R_F = Z = \frac{R_G * (X + Y * U^n)}{[(X + Y * U^n) - I_F^2]} \quad (31)$$

A constante de tempo do sensor será dada pela equação 32.

$$\tau = \frac{C_p}{\alpha_r * R_G * [(X + Y * U^n) - I_F^2]} \quad (32)$$

Considerando $R_F(0)=R_G$, a constante K será dada pela equação 33.

$$K = R_G - \frac{R_G * (X + Y * U^n)}{[(X + Y * U^n) - I_F^2]} = \frac{-R_G * I_F^2}{[(X + Y * U^n) - I_F^2]} \quad (33)$$

Com isso, pode-se obter a solução geral da EDO pela equação 34 (MONTEIRO, 2015).

$$R_F(t) = \frac{-R_G * I_F^2}{[(X + Y * U^n) - I_F^2]} * e^{\frac{-t * \alpha_r * R_G * [(X + Y * U^n) - I_F^2]}{C_p}} + \frac{R_G * (X + Y * U^n)}{[(X + Y * U^n) - I_F^2]} \quad (34)$$

A partir dos conceitos abordados neste capítulo, tem-se os subsídios teóricos necessários para implementar o anemômetro de fio quente.

3 METODOLOGIA

Nessa etapa do trabalho, serão detalhados os procedimentos de confecção e caracterização dos sensores, bem como a montagem, os testes e a calibração do protótipo do anemômetro.

3.1 ESCOLHA E CARACTERIZAÇÃO DOS SENSORES

Inicialmente, será feita uma pesquisa acerca dos sensores disponíveis no mercado, e avaliado o desempenho em termos de resposta dinâmica, linearidade e sensibilidade que se pode obter com diferentes tipos de sensores. Além disso, será feita uma análise em termos de custo do sensor. Se não for encontrado um sensor que combine tais características de desempenho com um baixo custo, serão confeccionados sensores que atendam da melhor forma a esses requisitos.

O sensor de velocidade terá de ser submetido, em um primeiro momento, a sucessivas medições das temperaturas que ele atinge mediante a aplicação de diferentes níveis de corrente elétrica contínua, para que se possa escolher uma temperatura de operação adequada para a medição de velocidade. Com isso, pode-se determinar também a máxima corrente que poderá ser aplicada ao sensor de temperatura sem aquecê-lo significativamente.

A caracterização do sensor de temperatura será feita utilizando um equipamento capaz de gerar e controlar diversas temperaturas dentro de um espaço confinado, de modo que seja possível levantar a curva de resistência do sensor em função da temperatura do ar onde ele está inserido.

3.2 IMPLEMENTAÇÃO E MONTAGEM DO PROTÓTIPO

O anemômetro será implementado em dois blocos distintos: aquisição e processamento. O bloco de aquisição será composto por dois circuitos distintos de tratamento de sinal, um circuito para a velocidade e outro para a temperatura.

Com a curva de temperatura de aquecimento em função da corrente aplicada, será possível elaborar um circuito elétrico que realize o tratamento do sinal de velocidade. Para permitir o cálculo da velocidade do ar a partir da tensão de saída do circuito, será necessário um equipamento que gere um fluxo de ar com velocidade

ajustável, como um canal aerodinâmico, também conhecido como túnel de vento. Construindo um gráfico de velocidade em função da tensão de saída do circuito de tratamento de sinal, e utilizando uma regressão matemática condizente com a curva obtida, pode-se gerar uma equação que permita o cálculo da velocidade do ar.

Com a curva de resistência do sensor em função da temperatura do ar, será possível elaborar o circuito elétrico que realizará o tratamento do sinal obtido a partir do sensor. A partir desse processo, para o sensor de temperatura, será possível gerar uma equação por meio de uma regressão linear em um software adequado, que permita o cálculo da temperatura do ar a partir da tensão de saída do circuito de tratamento de sinal.

O bloco de processamento será formado por um microcontrolador, cujo firmware fará a leitura das tensões de saída dos circuitos de tratamento através de um conversor A/D. O algoritmo de processamento irá incorporar as equações de temperatura e velocidade em função das saídas dos respectivos circuitos de tratamento de sinal.

O protótipo será montado em matrizes de contatos, coladas sobre uma base juntamente com o display e a placa que contém o microcontrolador.

3.3 TESTES E CALIBRAÇÃO

Em primeiro lugar, é preciso realizar o ajuste da taxa de sobreaquecimento. Este somente tem de ser executado uma vez, antes do início da calibração, em todos os casos em que a variação de temperatura for pequena. Do contrário, é preciso reajustar esse parâmetro antes de cada medição nova, minimizando a influência da temperatura nas medições. É importante medir a temperatura ambiente, especialmente se variações significativas de temperatura são esperadas. Isso torna a calibração do sistema passível de repetição sob as mesmas condições (JØRGENSEN, 2002).

Para os testes, é essencial que exista um sistema de medição padrão que possa medir e controlar a velocidade do fluido (MONTEIRO, 2015).

Ainda que a grandeza que reflita as variações de velocidade do fluido seja a resistência do sensor, esta não pode ser medida com facilidade. Por isso, na prática é medida a tensão de saída do circuito do anemômetro, e os valores obtidos de tensão e velocidade são aplicados a uma equação de calibração dada pela equação 35.

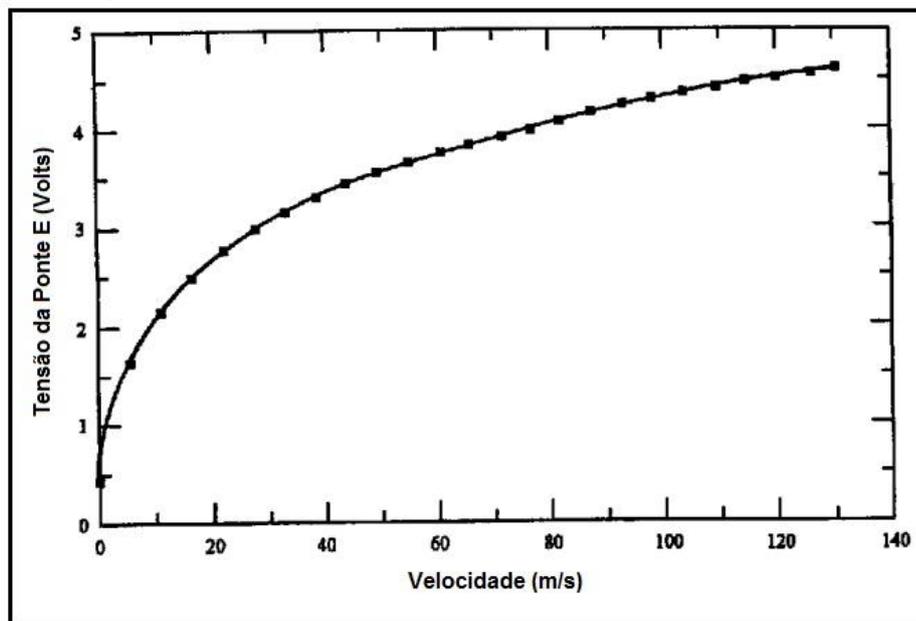
$$V_o = \sqrt{A + B * U^n} \quad (35)$$

Reescrevendo a equação 35, a medição em tempo real da velocidade será dada pela equação 36.

$$U_{med} = \sqrt[n]{\frac{V_o^2 - A}{B}} \quad (36)$$

As constantes A, B e n são determinadas empiricamente, pois dependem de todas as variáveis envolvidas no procedimento experimental. Em um primeiro momento, porém, será considerado $n=0,5$, que é um valor típico em implementações práticas. A curva característica da equação 35 é mostrada na figura 10.

Figura 10 - Curva característica de tensão x velocidade



Fonte: Adaptado de FERREIRA (2010).

A curva da figura 10 é válida para um fluxo isotérmico, ou seja, deve ser levantada uma nova curva de calibração para cada temperatura de interesse. O valor n das equações 35 e 36 depende do regime de velocidade, e varia de 0,4 a 1,3. Para velocidades maiores do que 1 m/s, é proposta a faixa de 0,4 a 0,5 (FERREIRA, 2010).

Para cada valor medido de velocidade, será medida a tensão de saída do circuito de tratamento de sinal de velocidade. O processo será repetido para diversas temperaturas de interesse. Para a obtenção dos coeficientes de calibração em um

software apropriado, como o Microsoft Office Excel, existem duas abordagens, uma por ajuste polinomial e outra por ajuste na forma de curva de potências.

Para o ajuste na forma de curva de potências, são calculados os valores U_{med}^n e V_o^2 , e construído um gráfico com escala logarítmica em ambos os eixos, para aproximar a curva de uma reta. A seguir, é gerada uma linha de tendência. Os coeficientes linear e angular da reta obtida serão, respectivamente, os coeficientes A e B das equações 35 e 36. Pode ser necessário repetir o cálculo de U_{med}^n para outros valores de n , caso o erro de ajuste da reta seja excessivo.

Para maior exatidão, é recomendado o ajuste polinomial. Para isso, é preciso apenas ter as medições de U_{med} em função de V_o . Com isso, é gerada uma linha de tendência polinomial de quarta ordem, que resulta em cinco coeficientes de calibração, com erros de linearização inferiores a 1%.

O uso do ajuste polinomial oferece resultados mais exatos especialmente para grandes faixas de velocidade, pois o coeficiente n é ligeiramente dependente da velocidade (JØRGENSEN, 2002).

É necessário que os valores de velocidade medidos cubram toda a faixa de velocidades do instrumento para reduzir erros causados por não-linearidades, derivadas de um afastamento excessivo entre pontos de calibração adjacentes (MONTEIRO, 2015).

Será feito um comparativo entre os dois métodos de ajuste e, se o erro de linearização for semelhante após a determinação no n ótimo para o primeiro método, será utilizado na prática o ajuste por curva de potências. Nesse caso, a maior simplicidade da função resultante reduziria o tempo de processamento de dados.

3.4 VALIDAÇÃO

A validação do anemômetro será feita por comparação com um instrumento comercial, com exatidão dez ou mais vezes superior à prevista para o anemômetro desenvolvido neste trabalho, caso tal instrumento de referência esteja disponível. Com isso, é possível desprezar a incerteza do instrumento comercial frente ao desenvolvido.

O procedimento de determinação da incerteza de medição seguirá os passos descritos na seção 2.1.3.11 deste trabalho, que trata da calibração de um instrumento de medição.

4 IMPLEMENTAÇÃO

Nessa etapa do trabalho, será descrita a implementação prática dos passos abordados na seção anterior.

4.1 ESCOLHA DOS SENSORES

Em primeiro lugar, foi feita uma pesquisa em relação aos elementos que poderiam ser utilizados como sensores de temperatura e velocidade. Verificou-se que há a necessidade de um gasto significativo para a obtenção de sensores comerciais com resposta dinâmica e sensibilidade propícios para uma aplicação comercial. O sensor de vazão/velocidade MFS02, por exemplo, fabricado pela empresa suíça IST, é vendido ao custo de quase 200 reais pelo pacote mínimo de 5 unidades, desconsiderando os custos de importação.

Como tal gasto é elevado para o objetivo do projeto, então restam os sensores de temperatura de baixo custo, como termopares, termistores e termorresistências, que podem cumprir também o papel de sensores de velocidade se propositalmente aquecidos por meio de uma corrente elétrica suficientemente elevada.

Os termopares necessitam uma temperatura estável para servir de referência durante o funcionamento, o que exige um equipamento adicional para gerar essa temperatura e controlá-la. Já os termistores apresentam variação não-linear da resistência elétrica com a temperatura, o que prejudica a medição em termos de exatidão a partir do momento em que se utiliza curvas geradas por meio de uma regressão matemática.

As termorresistências seriam, em um primeiro momento, a melhor escolha para servirem de sensores, pois apresentam variação linear da resistência elétrica com a temperatura. Porém, estas apresentam resposta dinâmica lenta (na ordem de vários minutos na ausência de convecção forçada), assim não são adequadas para medir temperatura e velocidade, pois é crucial que haja uma resposta dinâmica rápida dos sensores para um bom desempenho do anemômetro de fio quente.

Cabe observar que o sensor de temperatura deve ter resposta dinâmica tão próxima à do sensor de velocidade quanto maior e mais rápida for a variação de temperatura esperada para o fluxo de ar, pois a medição de velocidade rapidamente

se afasta do valor correto quando a temperatura considerada no cálculo não condiz com a real do fluxo.

Por todas as razões já expostas anteriormente, decidiu-se confeccionar ambos os sensores necessários ao projeto. Nas seções a seguir, será descrita a confecção e caracterização dos sensores de temperatura e velocidade.

4.2 CONFECÇÃO DOS SENSORES

Ambos os sensores foram confeccionados pelo mesmo processo, descrito a seguir. Em primeiro lugar, foi cortada a moldura a partir de uma placa de fenolite de espessura 1,6mm, com cobre em apenas um lado, nas dimensões da figura 11:

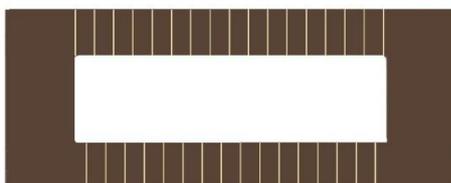
Figura 11 – Dimensões da moldura dos sensores



Fonte: elaborado pelo autor.

A seguir, com uma régua e um estilete, foram marcadas e traçadas sucessivas linhas transversais ao furo quadrado no centro da moldura, de modo a formar ilhas isoladas eletricamente umas das outras, e dispostas de modo que as seções de fio cruzassem o furo transversalmente ao seu comprimento. O padrão desejado é mostrado na figura 12:

Figura 12 - Padrão das ilhas cortadas na moldura dos sensores



Fonte: elaborado pelo autor.

Uma vez separadas as ilhas, foram feitos furos em extremidades opostas do furo da moldura, próximos às ilhas das extremidades, e depois inseridos e soldados terminais metálicos de modo a permitir uma robustez maior ao contato elétrico do sensor no seu uso, permitindo uma soldagem mais simples e segura a cabos ou até mesmo uma eventual inserção em uma matriz de contatos.

Logo após, foi soldado o fio de cobre esmaltado de bitola 41 AWG, o mais fino à disposição (para uma resposta dinâmica mais rápida), ao terminal de uma das extremidades. Com o auxílio de um estilete e uma pinça, o fio foi sendo soldado em zigue-zague entre ilhas opostas ao furo da moldura, sempre buscando mantê-lo esticado e tão transversal quanto possível ao furo. O contato elétrico efetivo com as ilhas não foi priorizado, pois o que se buscava de fato era uma boa fixação mecânica, o que se conseguiu cobrindo de estanho as ilhas, mergulhando o fio e mantendo-o nessa posição até a solidificação do estanho. Por último, foram soldados cabos de cobre de 25cm de extensão e 0,5mm² de bitola aos terminais metálicos.

No sensor de velocidade, foi adicionada uma camada de cola quente para que o fluxo de ar incidisse apenas nos segmentos de fio sobre o furo central da moldura. O resultado final para o sensor de velocidade é mostrado na figura 13.

Figura 13 – Sensor de velocidade finalizado



Fonte: elaborado pelo autor.

Já no sensor de temperatura, a parte condutora da moldura foi deixada exposta ao ar para facilitar a troca de calor do sensor com o ar, reduzindo o tempo de estabilização da temperatura. O resultado final para o sensor de temperatura é mostrado na figura 14.

Figura 14 – Sensor de temperatura finalizado



Fonte: elaborado pelo autor.

4.3 CARACTERIZAÇÃO DOS SENSORES

Nesta seção, será descrito o processo de caracterização dos sensores de velocidade e temperatura.

4.3.1 Sensor de velocidade

Foi utilizada uma amostra de fio de cobre esmaltado com bitola 41 AWG, o mesmo empregado na confecção dos sensores, para avaliar o aquecimento produzido pela aplicação de diferentes níveis de corrente contínua no fio. Para isso, a amostra de 15cm de fio foi enrolada sobre um termistor NTC, cuja curva de resistência x temperatura já havia sido determinada com o auxílio de um banho ISOCAL-6 Venus 2140B da Ecil, que gera qualquer temperatura entre 55°C abaixo da ambiente e 125°C. Este dispositivo não tem certificado de calibração, desta forma considerou-se a incerteza de medição indicada no manual do fabricante. O tempo de estabilização desse termistor é de cerca de 5 minutos em ar estagnado para degraus de 50°C de temperatura. Esse fato foi levado em consideração na caracterização descrita a seguir. Uma vez enrolada a amostra, foram aplicados nela diversos níveis de corrente diferentes, e após 5 minutos de espera para estabilização de cada leitura, foram obtidos os valores do quadro 1.

Quadro 1 – Medições de temperatura do fio x corrente aplicada

Corrente (mA)	Temperatura (°C)
20	29,6
60	30,5
90	33
220	48
270	56,5
340	70
360	76
390	85
450	101

Fonte: elaborado pelo autor.

Com base nesses valores, foi possível determinar os componentes da ponte de Wheatstone que produziram a temperatura desejada sobre o sensor aquecido.

4.3.2 Sensor de temperatura

O sensor de temperatura finalizado foi caracterizado, ou seja, teve sua curva de resistência elétrica em função da temperatura determinada com o auxílio do banho ISOCAL-6 Venus 2140B da Ecil, o mesmo utilizado no item 4.3.1. Para a caracterização, foi escolhida a faixa de -10°C a 50°C , por ser esta uma faixa que contempla temperaturas observadas em todas as estações do ano.

A caracterização foi executada da seguinte forma: o sensor finalizado foi inserido na cavidade própria do banho até encostar no fundo. Em ordem crescente, foi ajustada uma temperatura e medida a resistência do sensor com um multímetro ET2042E, com resolução de $0,1\Omega$ e exatidão de $\pm 0,8\%$ na faixa de medição de 600Ω selecionada, segundo o manual. Entre medições sucessivas, transcorreram cerca de 5 minutos, para garantir uma leitura estável. O quadro 2 com os valores obtidos, considerando a resistência total dos cabos de medição e do sensor como $0,4\Omega$, é mostrado a seguir:

Quadro 2 – Caracterização do sensor de temperatura

Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	Resistência (Ohms)
-10	1,52
0	1,58
10	1,66
15	1,69
20	1,72
25	1,74
30	1,76
35	1,80
40	1,83
50	1,88

Fonte: elaborado pelo autor.

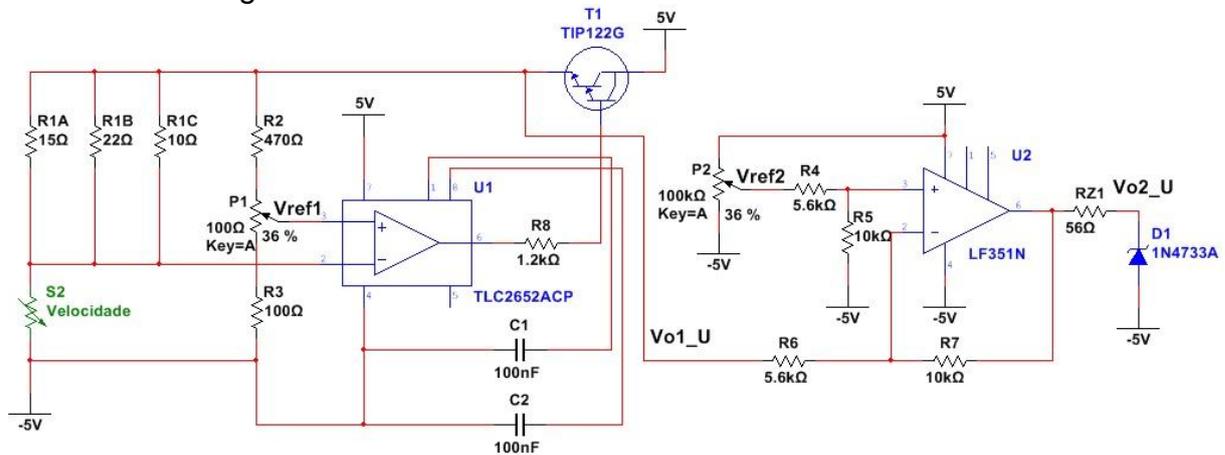
4.4 CIRCUITOS DE TRATAMENTO DE SINAL

Nesta seção, serão apresentados os circuitos de medição de velocidade e temperatura do anemômetro desenvolvido, e explicado o funcionamento de cada um deles.

4.4.1 Circuito para velocidade

O circuito de tratamento do sinal de velocidade é mostrado na figura 15.

Figura 15 - Circuito de tratamento do sinal de velocidade



Fonte: elaborado pelo autor.

O primeiro estágio do circuito é composto em parte por uma ponte de Wheatstone, formada pelo sensor de velocidade S2 e três resistores R1A, R1B e R1C, no braço da esquerda, e pelo potenciômetro P1 juntamente com dois resistores R2 e R3, no braço da direita. O sensor S2, que consiste de um fio de cobre soldado sobre uma moldura de fenolite coberta com cobre, já teve sua confecção descrita anteriormente. Os resistores R2 e R3 melhoram a sensibilidade do ajuste do ponto de operação e, combinados com a resistência de P1, produzem uma razão da ponte, isto é, a razão entre as resistências totais de cada braço, de cerca de 100:1.

A tensão Vref1 é definida pelo potenciômetro, e assim é ajustada a tensão sobre o sensor e, por consequência, sua temperatura de operação. O restante do primeiro estágio é formado pelo amplificador operacional U1, que tem como diferencial um offset extremamente baixo (na ordem de 30 μV), e pelo transistor Darlington T1, que atua sobre a ponte de Wheatstone. Os capacitores C1 e C2 são parte do circuito de controle de offset interno a U1. Cada um dos resistores R1A, R1B e R1C tem 10W de potência, e são ligados em paralelo no braço da esquerda da ponte para limitar o seu aquecimento, pois disso depende a estabilidade das medições.

O controle do sensor funciona da seguinte forma: quando o circuito é energizado, o sensor é aquecido até uma determinada temperatura, que será superior à máxima permitida para o fluxo. Quando ele é exposto a um fluxo de ar, ocorre perda

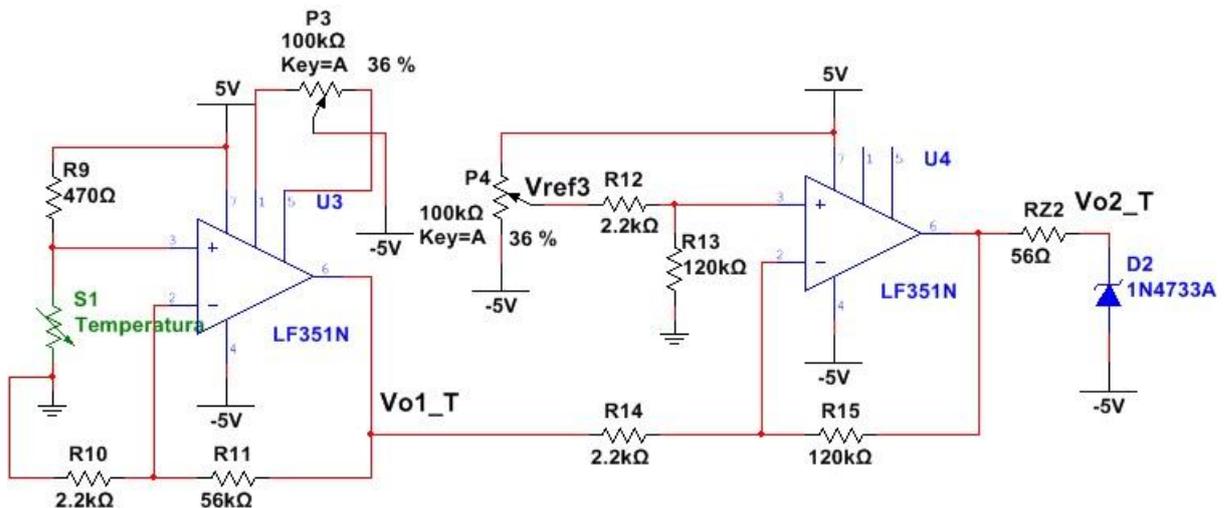
de calor por convecção, que reduz a temperatura do sensor e sua resistência, ocasionando uma queda na tensão sobre ele. Com isso, aumenta a diferença entre as tensões nas entradas não-inversora e inversora de U1, aumentando a tensão de saída. Essa tensão é aplicada ao topo da ponte, e atuará para restaurar a tensão inicial sobre o sensor, aquecendo-o no processo até que a temperatura se estabilize no valor original. Assim, a potência elétrica aplicada ao sensor sempre irá compensar a potência térmica perdida para o fluxo de ar por convecção, e essa perda de calor será proporcional à velocidade do ar.

Já o segundo estágio é um amplificador subtrator, que subtrai a tensão V_{ref2} , ajustada no trimpot P2, da tensão de saída $Vo1_U$ do primeiro estágio, inserindo um ganho dado pela razão entre os resistores R7 e R6, considerando-os iguais a R5 e R4, respectivamente. O sinal resultante $Vo2_U$ é enviado ao conversor A/D do microcontrolador.

4.4.2 Circuito para temperatura

O circuito de tratamento do sinal de temperatura é mostrado na figura 16.

Figura 16 - Circuito de tratamento do sinal de temperatura



Fonte: elaborado pelo autor.

O circuito é composto por um amplificador não-inversor no primeiro estágio, cujo amplificador operacional U3 conta com o trimpot P3 para anulação da tensão de offset, processo que é realizado com o mesmo circuito, porém com o ponto de conexão do sensor aterrado. Nesse caso, o trimpot é variado até que a tensão medida

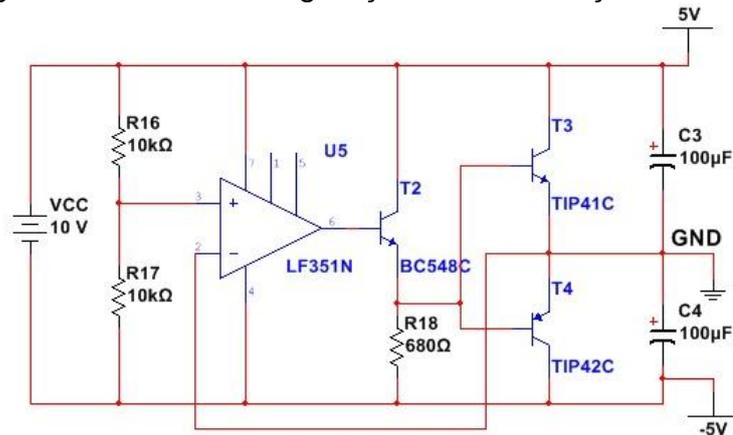
na saída seja nula. Uma vez realizado o ajuste, a conexão ao ponto GND é removida e o sensor com o resistor em série são adicionados.

O sensor S1, por ser um fio de cobre soldado sobre uma moldura de fenolite coberta com cobre, funcionará como uma termorresistência, ou seja, a sua resistência e a tensão sobre ele serão diretamente proporcionais à temperatura do ar.

Já o segundo estágio é um amplificador subtrator, que subtrai a tensão V_{ref3} , ajustada no trimpot P4, da tensão de saída $Vo1_T$ do primeiro estágio, inserindo um ganho dado pela razão entre os resistores R15 e R14, considerando-os iguais a R13 e R12, respectivamente. O sinal resultante $Vo2_T$ é enviado ao conversor A/D do microcontrolador.

Para o funcionamento adequado do primeiro estágio, a alimentação do seu amplificador operacional deve ser simétrica. Para gerar um ponto comum GND a partir do qual se possa medir +5V e -5V, é utilizado o circuito da figura 17.

Figura 17 – Circuito de geração de alimentação simétrica



Fonte: elaborado pelo autor.

O circuito é formado pelo amplificador operacional U5 na configuração seguidor de tensão ou buffer, que controla o par de transistores T3 e T4 de modo a manter a tensão no ponto GND igual à tensão sobre o resistor R17, que será a metade da tensão de alimentação VCC aplicada ao circuito.

4.5. MONTAGEM DO TÚNEL DE VENTO

Para se obter as curvas de velocidade em função da tensão de saída $Vo2_U$, e para calibrar o anemômetro ao final da parte prática, foi necessário utilizar um túnel de vento para gerar um fluxo de ar com mínima turbulência e velocidade ajustável. O

equipamento é composto por uma câmara de admissão de ar, dentro da qual há um ventilador impulsionado por um motor elétrico trifásico de 4 HP e velocidade nominal de 1730 rotações por minuto (rpm). O motor transmite torque por meio de uma correia, e é controlado por um inversor de frequência de modelo CFW-08 da marca WEG, alimentado pela rede elétrica monofásica de 220V. Por meio deste, é feito o ajuste da velocidade do ar. Na figura 18, é mostrada a parte traseira da câmara de admissão, com o motor trifásico, a grade de proteção da correia e o sistema de transmissão de torque.

Figura 18 - Parte traseira do túnel de vento



Fonte: elaborado pelo autor.

Na figura 19, é mostrada a parte interna da seção de madeira confeccionada já com a resistência de aquecimento do túnel. Essa resistência é utilizada em chuveiros elétricos, e tem potência de 4000W. Esta seção adicional foi necessária para posicionar a resistência com um afastamento de cerca de 30cm da colméia da entrada da primeira seção, de modo a evitar a possibilidade de derretimento dessa peça.

Figura 19 – Parte interna da seção com a resistência de aquecimento



Fonte: elaborado pelo autor.

A colméia tem a função de uniformizar o fluxo de ar ao somente permitir que o ar a atravesse paralelamente às paredes do túnel, transformando o fluxo de ar, que antes era turbulento, em laminar.

Para unir as duas primeiras seções de acrílico do túnel, foi utilizada fita dupla face. As tiras foram coladas ao longo de toda a área das junções e dobradas longitudinalmente para garantir a colagem ao longo de toda a junção. Posteriormente, ainda foi adicionada fita adesiva ao redor de toda a junção entre as partes. Para unir a terceira e última seção à segunda, foi utilizado o mesmo método. A figura 20 mostra o túnel finalizado após a união das seções.

Figura 20 – Túnel de vento montado



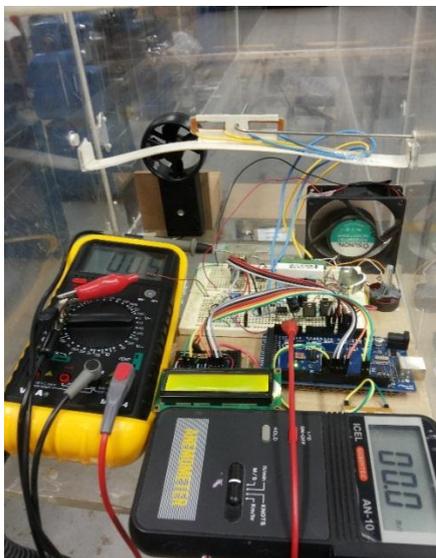
Fonte: elaborado pelo autor.

Utilizando a hélice de um dos anemômetros de referência, foi lentamente varrida toda a área de saída de ar do túnel para determinar se e em quais regiões a velocidade seria uniforme. Descobriu-se que a região dos 15x15cm centrais da seção apresentava velocidade uniforme, logo os sensores seriam posicionados dentro dela na medida do possível.

Dentro da terceira seção, foram posicionados os sensores de temperatura e velocidade, bem como o tubo de Pitot e o anemômetro de hélice utilizados como referências de velocidade e temperatura. Além disso, os circuitos do anemômetro e o multímetro utilizado nas medições também foram colocados no local devido ao

tamanho reduzido dos cabos dos sensores. Na figura 21, é mostrada a disposição desses elementos na terceira seção.

Figura 21 – Disposição dos elementos na seção de medição



Fonte: elaborado pelo autor.

Com isso, tem-se como efeito colateral um melhor resfriamento dos componentes devido à sua exposição ao fluxo de ar, especialmente para um fluxo com temperatura próxima à ambiente. Para um resfriamento adicional dos componentes de potência, como o transistor que realimenta a ponte de Wheatstone e os resistores desta, foi utilizado um cooler alimentado pela mesma fonte que energiza o restante do circuito. Esse resfriamento é especialmente relevante quando a velocidade do ar é baixa.

4.6. DETERMINAÇÃO DAS EQUAÇÕES

Nesta seção, será descrito o processo de obtenção das curvas e respectivas equações de velocidade e temperatura para o anemômetro desenvolvido.

4.6.1 Velocidade

Após a montagem do túnel de vento, explicada na seção 4.5, procedeu-se ao teste inicial do circuito de tratamento do sinal de velocidade para determinar as equações de velocidade em função da tensão de saída V_{o2_U} .

Para isso, em um primeiro momento foram ajustadas diversas rotações no painel do inversor de frequência e lidas as velocidades geradas, com o objetivo de encontrar pontos de teste que cobrissem uniformemente toda a faixa de velocidade do túnel.

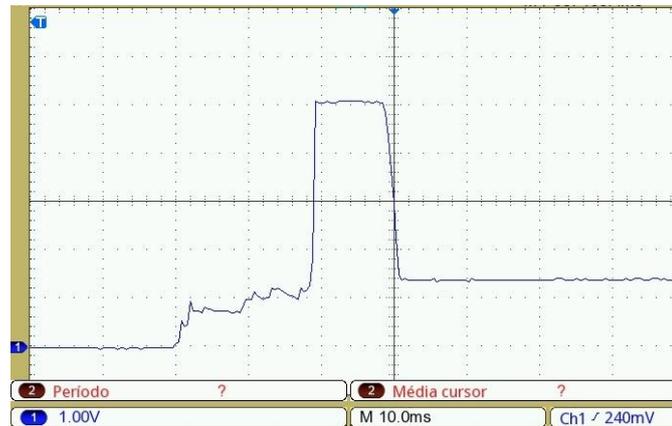
Em um segundo momento, procedeu-se ao ajuste do circuito. Em primeiro lugar, foi ajustada a tensão de operação do sensor na ausência de fluxo de ar para cerca de 0,65V, valor que leva o sistema a um ponto de equilíbrio entre potência consumida e sensibilidade. O ajuste de tensões muito superiores, na ordem de 0,9V, torna o anemômetro excessivamente sensível ao fluxo de ar. O ajuste de tensões inferiores a cerca de 0,5V torna o sistema insensível ao fluxo de ar. O ajuste via potenciômetro é delicado, exigindo diversas tentativas até que se chegasse a um ponto satisfatório.

No segundo estágio, dois ajustes foram necessários. O primeiro diz respeito à faixa de tensões V_{o2_U} geradas pela variação da velocidade entre os extremos de 0 a 10,36m/s. Foi ajustada a máxima velocidade do túnel e depois ajustado o potenciômetro do segundo estágio para que V_{o2_U} estivesse entre 4,5 e 4,8V, uma vez que jamais poderá ultrapassar 5V para evitar danos à entrada do conversor A/D. A seguir, foi interrompida a geração do fluxo de ar e verificada a tensão de saída V_{o2_U} mínima.

Inicialmente, verificou-se que esta era muito alta, assim foi aumentado o ganho do segundo estágio para que a diferença entre as tensões mínima e máxima também aumentasse, melhorando a resolução da velocidade medida. Com esse ajuste, novamente foi ajustada a máxima velocidade do túnel e depois ajustado o potenciômetro do segundo estágio para que V_{o2_U} estivesse entre 4,5 e 4,8V.

Foram observadas oscilações contínuas nas tensões medidas, o que esteve associado a variações na tensão da fonte de alimentação do sistema. Removendo o cooler do circuito, esses problemas foram visivelmente atenuados. Entende-se que a redução de 0,5A na corrente consumida, o que representa 30% do total quando a velocidade é máxima, tenha facilitado a regulação da tensão pela fonte. Além disso, eventuais irregularidades na parte mecânica do cooler em determinados pontos de rotação poderiam estar se refletindo em picos de consumo durante o funcionamento. Foi medida a tensão de saída V_{o2_U} durante a energização do sistema, sem fluxo de ar sobre os sensores, e a forma de onda obtida é mostrada na figura 22.

Figura 22 - Tensão Vo2_U na energização do sistema



Fonte: elaborado pelo autor.

Percebe-se que transcorrem cerca de 31ms para que a tensão de saída, e portanto a temperatura de operação do sensor, se estabilizem. Nota-se que há um pico de tensão antes da estabilização, e este se deve ao processo de aquecimento do sensor de velocidade, onde a máxima ação de controle é necessária. A seguir, procedeu-se ao levantamento das curvas. Para uma temperatura média do fluxo de 15 °C, foram obtidos os resultados do quadro 3.

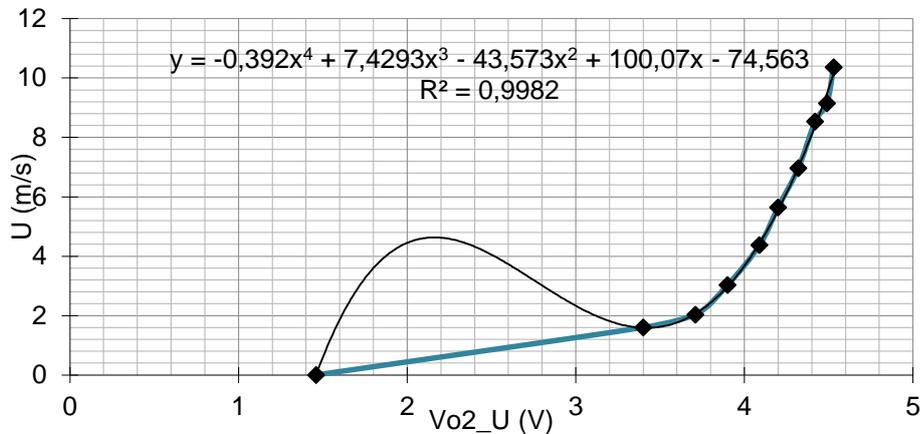
Quadro 3 – Tensão Vo2_U em função da velocidade

U (m/s)	Vo2_U (V)
0,00	1,46
1,60	3,40
2,03	3,71
3,02	3,90
4,37	4,09
5,64	4,20
6,96	4,32
8,53	4,42
9,14	4,49
10,36	4,53

Fonte: elaborado pelo autor.

Esses pontos geraram o gráfico da figura 23.

Figura 23 – Gráfico da velocidade em função de Vo2_U com ajuste polinomial para temperatura média de 15 °C



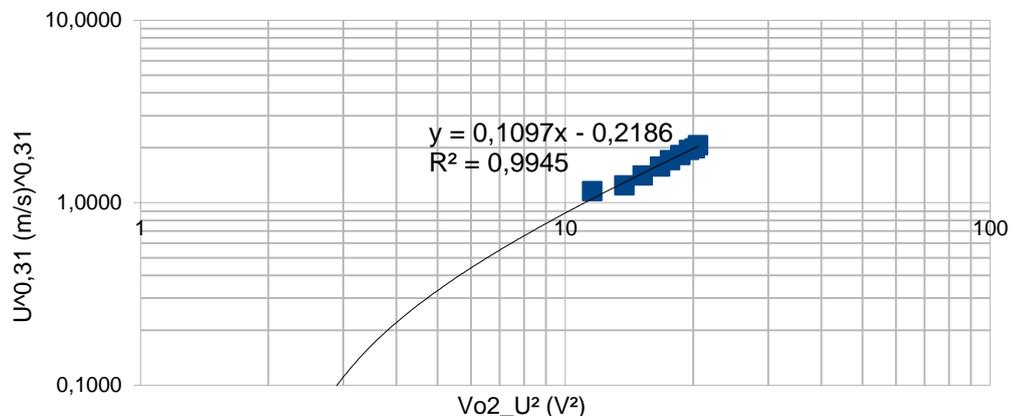
Fonte: elaborado pelo autor.

A curva do gráfico da figura 23, mostrada na linha espessa, foi aproximada por meio de uma regressão polinomial de quarta ordem, mostrada na linha fina, resultando na equação 37.

$$U = -0,392*Vo2_U^4 + 7,4293*Vo2_U^3 - 43,573*Vo2_U^2 + 100,07*Vo2_U - 74,563 \quad (37)$$

Como já foi explicado anteriormente, há também a possibilidade de regressão linear sobre a curva formada por $Vo2_U^2$ e U^n , onde n é uma constante ajustada para que a regressão forneça a máxima aproximação com a curva real. Na figura 24, é mostrada a curva de U^n , onde $n=0,31$, em função de $Vo2_U^2$. Além disso, é também mostrado o resultado da regressão linear aplicada sobre essa curva. Ambos os eixos estão em escala logarítmica.

Figura 24 – Gráfico da velocidade em função de Vo2_U com ajuste por curva de potências para temperatura média de 15 °C



Fonte: elaborado pelo autor.

A curva de potências do gráfico da figura 24 consiste no conjunto de pontos mostrado, e foi aproximada por meio de uma regressão linear, mostrada na linha azul fina, resultando na equação 38, que relaciona a velocidade com a tensão V_{o2_U} lida pelo microcontrolador.

$$U = \sqrt[0,31]{0,1097 * V_{o2_U}^2 - 0,2186} \quad (38)$$

Igualando as equações 36 e 38, tem-se a equação 39.

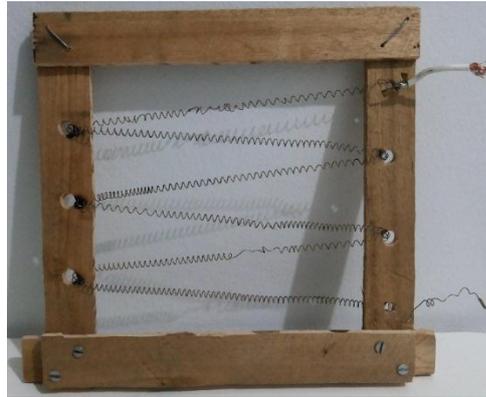
$$\sqrt[n]{\frac{V_o^2 - A}{B}} = \sqrt[0,31]{0,1097 * V_{o2_U}^2 - 0,2186} \quad (39)$$

Com isso, pode-se determinar que $A=1,9927$, $B=9,1158$ e $n=0,31$.

Percebe-se que o ajuste polinomial, apesar de fornecer uma curva mais próxima da real, apresenta uma severa oscilação entre os dois primeiros pontos levantados na prática, o que geraria um erro inaceitável no cálculo da velocidade. Por isso, a utilização da reta fornecida pelo ajuste por curva de potências se mostra mais adequada para a temperatura média de 15 °C observada no levantamento, pois seu desvio frente à curva real, simbolizado pelo coeficiente R^2 , é apenas ligeiramente maior do que o observado no ajuste polinomial.

Inicialmente, buscava-se levantar três curvas de velocidade em função da tensão V_{o2_U} , cada curva para uma temperatura diferente. Infelizmente, não foi possível aquecer o fluxo de ar do túnel de vento devido à sua vazão excessiva. Verificou-se que a resistência de chuveiro na configuração mostrada anteriormente (enrolada sobre um núcleo de plástico) chegava a derreter o núcleo sem aquecer o fluxo de ar. Assim, ela foi desenrolada e fixada sobre uma moldura quadrada de madeira, e esta foi inserida na seção de madeira já mostrada. Desta vez, foi possível aplicar a máxima potência elétrica sobre a resistência, porém isso, além de ter ocasionado a queima dos furos de passagem da moldura, não gerou um aquecimento perceptível do fluxo de ar. A moldura avariada após os testes é mostrada na figura 25.

Figura 25 - Moldura de madeira da resistência após os testes



Fonte: elaborado pelo autor.

Como alternativa, buscou-se reduzir a vazão de saída do túnel através de uma seção de PVC de 80cm de comprimento e 10cm de diâmetro acoplada a uma chapa de madeira, sendo esta fixada à saída da seção de madeira. Assim, toda a seção de acrílico do túnel original foi removida neste teste.

Dentro da seção de PVC, foi inserida sob pressão uma tira de papelão de 3cm de largura, enrolada de modo que sua seção transversal fizesse o papel da colméia da seção de acrílico original, reduzindo a turbulência do fluxo de ar. Foi fixada, por meio de arames de aço, uma resistência de secador de cabelos na entrada da seção de PVC, deixando-a a cerca de 15cm da colméia improvisada. Para evitar um eventual deslocamento da colméia dentro da seção no caso de velocidades elevadas, foram inseridos arames de aço perpendiculares entre si na seção, logo após a colméia de papelão. Na figura 26, é mostrado o posicionamento da resistência e do papelão.

Figura 26 - Posicionamento da resistência e do papelão na seção de PVC



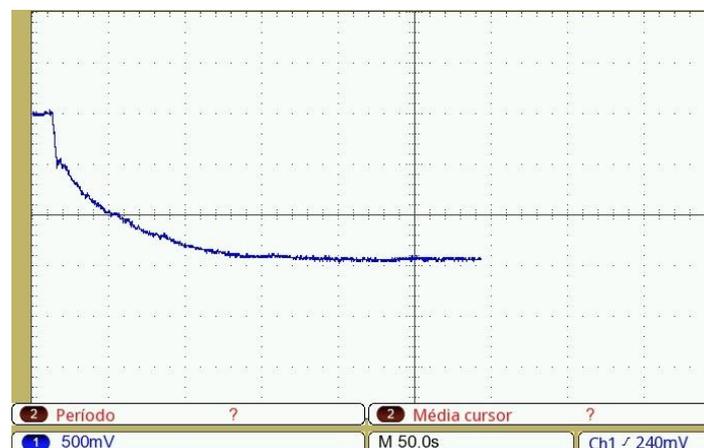
Fonte: elaborado pelo autor.

Nos testes efetuados com um anemômetro de hélice, notou-se uma variação de velocidade na ordem de 3m/s dentro da área transversal da seção, o que é inaceitável para utilização no projeto, tendo-se em mente que o espaço ocupado pelos sensores e pelos anemômetros de referência seria praticamente igual à área transversal da seção. Porém, foi possível notar claramente um acréscimo na temperatura do fluxo na ordem de 10 °C, o que comprova a tese de que a vazão excessiva de ar gerada pelo túnel de vento foi o que impossibilitou o aumento da temperatura do fluxo com a resistência disponível. Diante desses obstáculos práticos, decidiu-se utilizar uma só curva de velocidade em função de $Vo2_U$ para o instrumento sendo desenvolvido.

4.6.2 Temperatura

Inicialmente, foi medida a resposta do sensor de temperatura a uma mudança brusca de temperatura de 50 °C à ambiente de 22 °C. O sensor foi removido do banho a 50 °C e deixado em ar estagnado. A forma de onda obtida é mostrada na figura 27.

Figura 27 – Resposta do sensor a um degrau de -28°C com ar estagnado

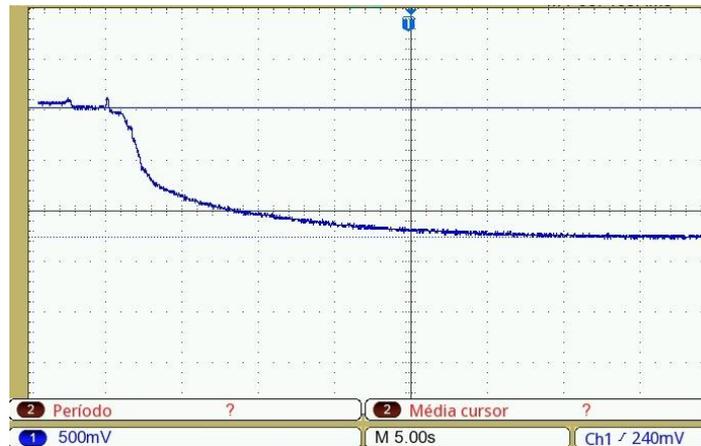


Fonte: elaborado pelo autor.

Nota-se que o tempo de estabilização está na ordem de 3 minutos.

Foi repetida a aplicação do degrau negativo de temperatura, porém desta vez o sensor foi removido do banho a 50 °C e deixado exposto a um fluxo de ar com velocidade constante de 4 m/s. A resposta obtida é mostrada na figura 28.

Figura 28 – Resposta do sensor a um degrau de -28 °C com ar a 4 m/s



Fonte: elaborado pelo autor.

Nesse caso, o tempo de estabilização está na ordem de 25 segundos. Com isso, pode-se inferir que medições de baixas velocidades devem ser precedidas de um tempo de espera para a estabilização da leitura de temperatura, sob pena de serem introduzidos erros na velocidade calculada.

Utilizando o mesmo banho da caracterização, foi medida a tensão de saída do segundo estágio, aqui denominada $Vo2_T$, para cada temperatura já arbitrada anteriormente. As medições das tensões foram realizadas com o multímetro MY-64 da Metex, que, segundo o seu manual, tem resolução de 10mV para a escala de 20V e exatidão de $\pm 0,3\%$. Os resultados são mostrados no quadro 4.

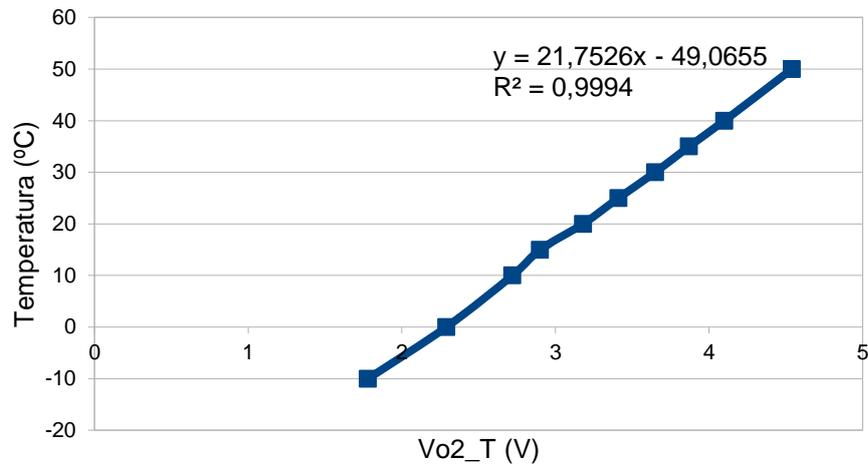
Quadro 4 – Medições do circuito de tratamento do sinal de temperatura

Temperatura(°C)	$Vo2_T$ (V)
-10	1,78
0	2,29
10	2,72
15	2,90
20	3,18
25	3,41
30	3,65
35	3,87
40	4,1
50	4,54

Fonte: elaborado pelo autor.

Utilizando o software Microsoft Excel, foi construído o gráfico de temperatura x $Vo2_T$, e realizada uma regressão linear dessa curva. O gráfico gerado com a linha de tendência é mostrado na figura 29.

Figura 29 – Gráfico de temperatura x Vo2_T



Fonte: elaborado pelo autor.

A relação obtida é praticamente linear, como se espera para um fio de cobre. Com isso, foi obtida a equação 40.

$$T = 21,7526 * Vo2_T - 49,0655 \quad (40)$$

4.7 IMPLEMENTAÇÃO DO INSTRUMENTO

Nesta seção, serão abordados os aspectos relativos ao firmware e à montagem prática do anemômetro desenvolvido.

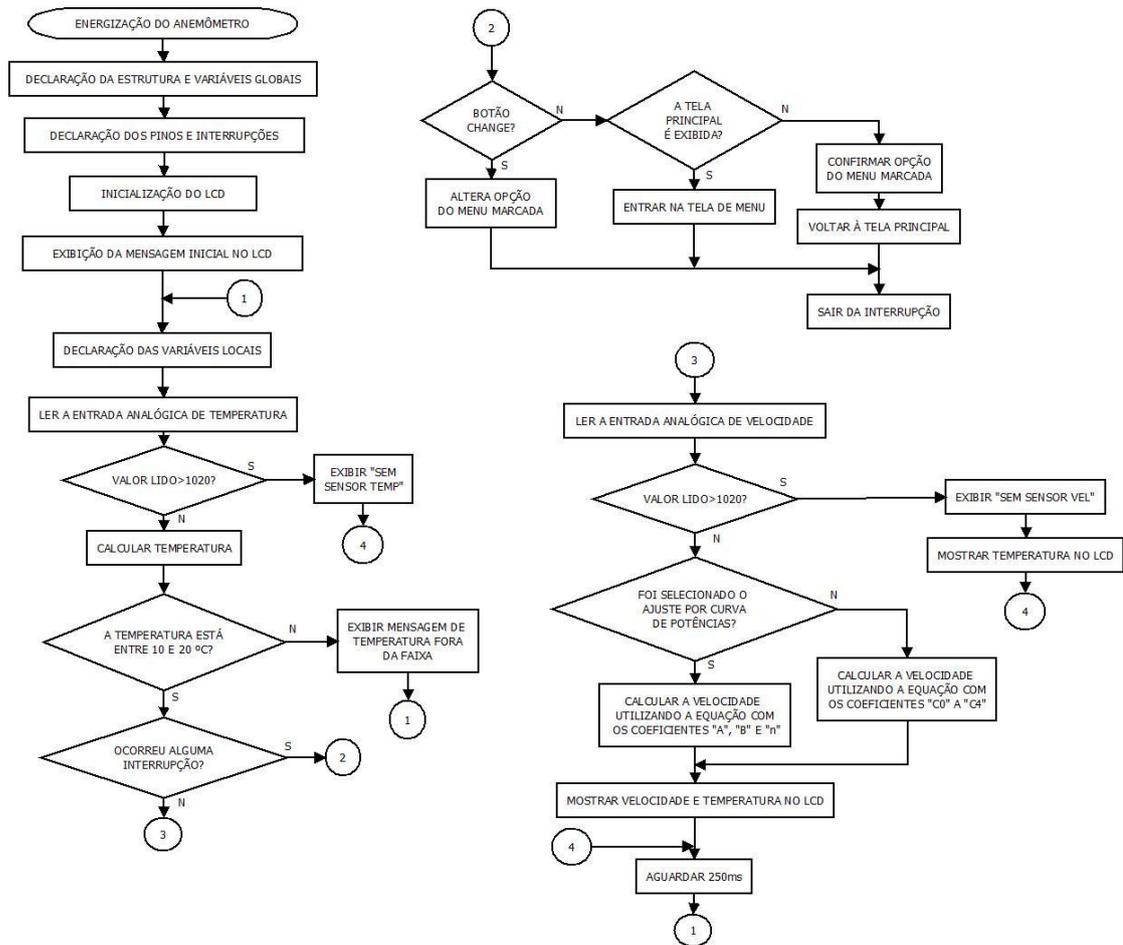
4.7.1 Microcontrolador escolhido

Foi desenvolvido um firmware para o anemômetro utilizando uma placa Arduino Mega 2560, que contém o microcontrolador Atmega2560. Como a alimentação DC externa da placa pode variar de 7 a 12V, foi escolhida a alimentação de 10V para todo o sistema, incluindo os circuitos anteriormente descritos.

4.7.2 Firmware

Na figura 30, é mostrado o fluxograma seguido na elaboração do firmware.

Figura 30 – Fluxograma do firmware



Fonte: elaborado pelo autor.

O intervalo entre leituras consecutivas de temperatura e velocidade e de atualização do LCD é de 330ms. O firmware foi desenvolvido para permitir a calibração do instrumento considerando alternadamente a regressão por curva de potências e a polinomial. Como é mostrado no fluxograma, a seleção da regressão considerada é feita por meio dos botões *Change*, para selecionar a opção desejada, e *Enter*, para entrar e sair do menu de seleção.

Há também a detecção de sensor desconectado para ambos os sensores, que consiste na verificação da tensão presente nas entradas do conversor A/D utilizadas. Se o nível de tensão for superior a cerca de 99,6% do fundo de escala de 5V, então é exibido o alerta no LCD. Se o sensor de velocidade estiver desconectado, a medição de temperatura segue sendo mostrada. Porém, se o sensor de temperatura estiver desconectado, não será medida nem mostrada a velocidade, pois a exatidão dessa

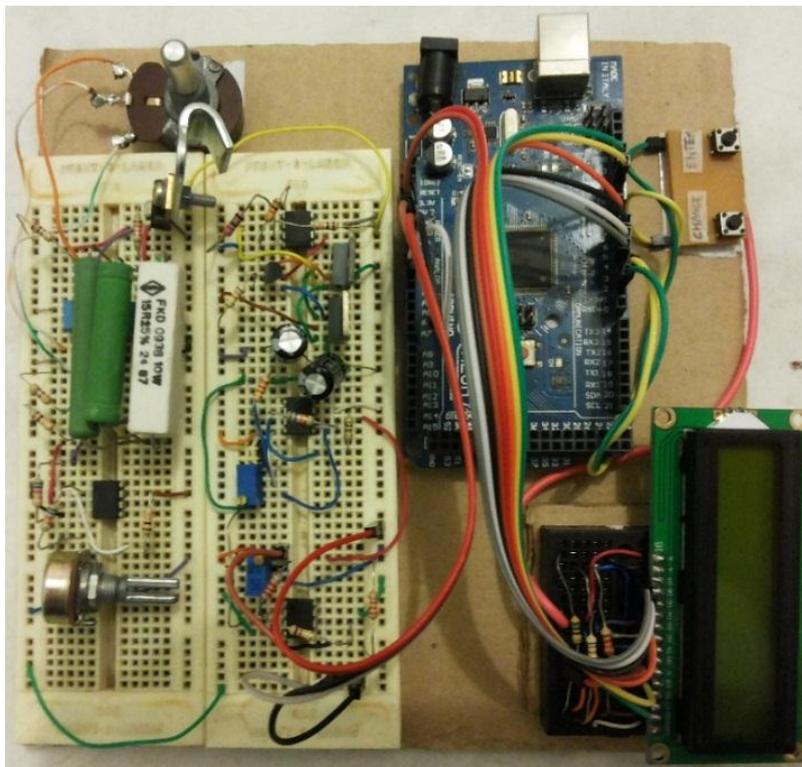
medida depende da temperatura do fluxo. Sendo esta incerta, a confiabilidade da medição de velocidade seria desconhecida.

Como somente foi possível levantar uma curva de velocidade em função de V_{o2_U} , para a temperatura ambiente, decidiu-se delimitar a validade das medições para a faixa de temperaturas de 5°C abaixo até 5°C acima da média obtida no levantamento da curva. Se a temperatura medida estiver fora dessa faixa, é exibida a mensagem “Fora da faixa” na tela do LCD, no lugar da temperatura.

4.7.3 Montagem prática do instrumento

Os circuitos de tratamento de sinais foram montados separadamente, um em cada matriz de contatos. Estes, assim como a placa Arduino Mega 2560, o LCD utilizado para a interação com o usuário e o potenciômetro P1 foram colados sobre uma base de papelão por meio de fita dupla-face. Foi ainda posicionado um cooler de 12V próximo dos componentes de potência da ponte de Wheatstone, com o fim de acelerar a dissipação do calor gerado e garantir uma melhor estabilidade para as medidas. O arranjo obtido é mostrado na figura 31.

Figura 31 - Anemômetro montado



Fonte: elaborado pelo autor.

4.8 CALIBRAÇÃO

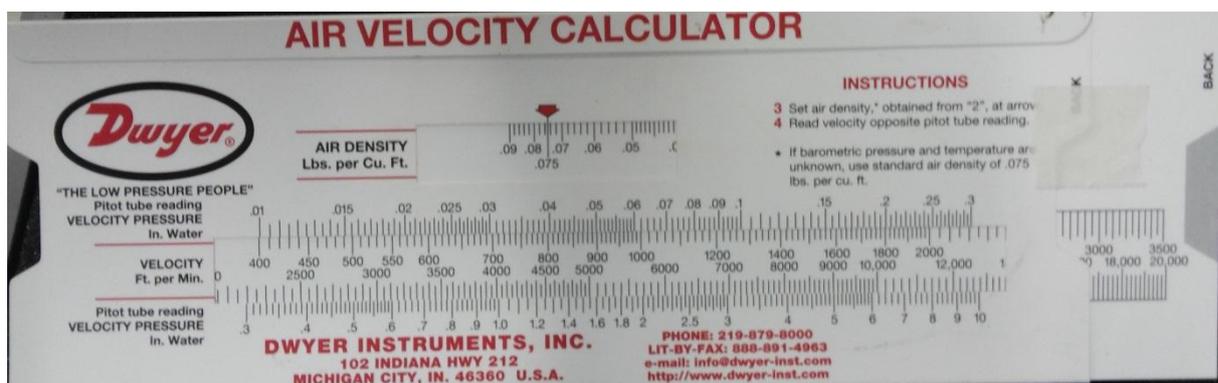
Nesta seção, será descrito o processo de calibração do instrumento desenvolvido, que segue a norma GUM.

4.8.1 Medições realizadas

Foi realizada uma série de medições com o sistema de medição sob calibração (SMC) em paralelo a dois instrumentos de referência, com uma temperatura ambiente de 15 °C. O primeiro é um anemômetro de hélice, modelo AN-10 da marca ICEL (denominado nesta seção de sistema de medição padrão 1 – SMP1). O segundo é um manômetro digital da série 475 da marca Dwyer, com tubo de Pitot (denominado nesta seção de sistema de medição padrão 2 – SMP2).

O uso destes dois se justifica pelo fato de que o primeiro indica diretamente a velocidade do fluxo de ar e mede uma faixa maior de velocidades, mas tem exatidão inferior ao segundo, que fornece apenas uma indicação de pressão. Esta é convertida em velocidade por meio de uma escala deslizante, fornecida juntamente com o instrumento, mostrada na figura 32.

Figura 32 – Escala deslizante utilizada para determinar a velocidade do ar



Fonte: elaborado pelo autor.

A conversão de pressão para velocidade é feita com a densidade do ar definida como “0.075”, conforme a figura, pois a pressão barométrica é desconhecida. A partir desse alinhamento, deve-se procurar a pressão mostrada pelo instrumento na escala inferior da figura 32, e ler na escala de velocidade o valor correspondente em pés por minuto. Multiplicando esse valor por 0,00508, é obtida a velocidade em m/s. O valor

mínimo da escala é 400 pés por minuto, o que equivale a 2 m/s. Logo, não é possível medir velocidades inferiores com o SMP2.

Foram ajustadas três velocidades para o fluxo de ar do túnel de vento, que correspondem a 10, 50 e 90% do valor máximo da faixa de medição, que alcança 10,3 m/s. Esses percentuais são os recomendados pela norma GUM (JCGM, 2008). No quadro 5, são mostradas as medições realizadas para a calibração de velocidade para os três pontos definidos, considerando o ajuste por curva de potências. Para melhorar a exatidão do processo de calibração, foram tomadas 30 amostras de cada medição. Todos os valores são dados em m/s.

Quadro 5 – Medições realizadas para a calibração de velocidade, com ajuste por curva de potências

Amostra	Ponto 1		Ponto 2			Ponto 3		
	SMC	SMP1	SMC	SMP1	SMP2	SMC	SMP1	SMP2
1	0,6	1,0	5,2	5,1	5,08	9,6	9,6	9,06
2	0,5	1,0	5,1	5,1	4,97	9,1	9,7	9,19
3	0,6	1,0	4,8	5,2	5,12	9,6	9,6	9,45
4	0,6	1,1	4,7	5,1	5,12	9,1	9,5	8,97
5	0,6	1,0	4,9	5,2	5,00	9,2	9,6	8,97
6	0,5	1,1	5,1	5,2	5,00	9,9	9,7	9,55
7	0,6	1,0	4,8	5,1	5,00	9,6	9,5	9,14
8	0,5	1,0	5,0	5,2	5,00	9,2	9,5	8,97
9	0,5	1,1	5,2	5,2	4,92	9,5	9,6	9,12
10	0,6	1,0	4,9	5,1	4,97	9,9	9,7	9,17
11	0,5	1,0	4,7	5,1	4,97	9,3	9,6	9,17
12	0,6	1,0	4,7	5,1	4,97	9,6	9,7	9,12
13	0,5	1,1	4,7	5,2	5,00	9,5	9,6	9,24
14	0,6	1,0	4,6	5,0	4,92	9,8	9,6	8,97
15	0,6	1,0	4,8	5,2	5,00	9,4	9,7	9,19
16	0,5	1,0	5,0	5,2	5,00	9,7	9,5	9,14
17	0,6	1,1	4,9	5,2	4,79	9,7	9,6	9,19
18	0,5	1,1	5,1	5,2	5,17	9,7	9,7	9,06
19	0,6	1,0	4,9	5,1	5,21	9,6	9,6	9,12
20	0,6	1,1	5,1	5,1	4,97	9,1	9,6	9,14
21	0,5	1,0	5,1	5,0	5,04	9,1	9,7	9,14
22	0,6	1,1	4,9	5,2	5,04	9,4	9,6	9,04
23	0,5	1,0	5,1	5,1	5,04	9,6	9,7	9,40
24	0,6	1,1	5,0	5,1	5,04	9,7	9,6	8,84
25	0,6	1,0	5,1	5,1	4,97	8,9	9,6	9,40
26	0,6	1,0	4,6	5,1	5,00	9,4	9,7	9,08
27	0,6	1,0	4,9	5,1	5,00	9,6	9,5	9,14
28	0,6	1,1	4,9	5,1	5,00	9,2	9,6	9,08
29	0,6	1,1	4,6	5,1	4,83	9,7	9,5	9,17
30	0,5	1,0	4,9	5,2	4,92	8,9	9,6	9,08

Fonte: elaborado pelo autor.

As medições do quadro 5 geraram uma velocidade média de 0,5633 m/s com desvio-padrão de 0,049 m/s no ponto 1, velocidade média de 4,91 m/s com desvio-padrão de 0,1807 m/s no ponto 2 e velocidade média de 9,4533 m/s com desvio-padrão de 0,2825 m/s no ponto 3. No quadro 6, são mostradas as medições realizadas para a calibração de velocidade para os três pontos definidos, considerando o ajuste polinomial. Para melhorar a exatidão do processo de calibração, foram tomadas 30 amostras de cada medição. Todos os valores são dados em m/s.

Quadro 6 - Medições realizadas para a calibração de velocidade, com ajuste polinomial

Amostra	Ponto 1		Ponto 2			Ponto 3		
	SMC	SMP1	SMC	SMP1	SMP2	SMC	SMP1	SMP2
1	2,0	1,1	5,3	5,2	4,92	9,3	9,6	9,17
2	1,9	1,0	5,1	5,1	5,00	8,2	9,6	8,84
3	1,8	1,0	4,9	5,2	4,78	8,9	9,5	9,04
4	2,0	1,0	5,1	5,2	5,04	8,9	9,4	9,17
5	1,8	1,1	5,1	5,1	5,04	9,3	9,5	9,17
6	1,9	1,0	5,4	5,2	5,00	9,3	9,6	9,06
7	2,0	1,1	5,3	5,2	4,92	9,1	9,6	8,94
8	1,9	1,0	5,4	5,1	4,92	8,7	9,4	8,93
9	2,0	1,1	4,9	5,1	5,08	8,5	9,5	9,19
10	1,8	1,0	4,8	5,1	5,08	9,1	9,5	9,19
11	1,9	1,0	5,1	5,1	4,92	8,3	9,6	9,04
12	1,9	1,1	4,9	5,2	4,97	8,7	9,6	9,12
13	1,9	1,0	4,8	5,1	5,00	8,5	9,6	9,24
14	1,9	1,0	5,1	5,1	4,97	8,9	9,5	9,12
15	1,9	1,1	5,3	5,2	5,04	8,9	9,5	8,81
16	1,9	1,0	5,1	5,1	5,04	9,3	9,4	8,84
17	1,9	1,1	5,0	5,2	4,83	9,4	9,4	9,06
18	2,0	1,0	5,1	5,1	4,92	8,9	9,6	9,12
19	1,9	1,0	5,1	5,0	4,97	8,7	9,4	8,93
20	2,0	1,1	4,9	5,1	5,00	8,7	9,6	9,70
21	1,9	1,0	5,2	5,3	4,78	9,2	9,6	9,24
22	1,9	1,0	4,9	5,2	5,04	9,0	9,5	9,08
23	1,9	1,1	4,9	5,1	5,00	8,3	9,5	9,24
24	1,9	1,0	5,1	5,2	5,00	8,7	9,6	9,40
25	1,9	1,0	5,1	5,1	5,04	9,4	9,3	9,19
26	2,0	1,1	5,1	5,2	5,00	8,3	9,5	9,19
27	1,9	1,0	5,1	5,0	5,04	9,3	9,5	9,19
28	1,9	1,0	5,1	5,2	4,97	9,4	9,5	9,12
29	1,9	1,0	5,3	5,2	4,97	8,3	9,5	9,04
30	2,0	1,1	5,1	5,1	4,92	8,4	9,4	9,04

Fonte: elaborado pelo autor.

As medições do quadro 6 geraram uma velocidade média de 1,9167 m/s com desvio-padrão de 0,0592 m/s no ponto 1, velocidade média de 5,0867 m/s com desvio-padrão de 0,1634 m/s no ponto 2 e velocidade média de 8,8633 m/s com desvio-padrão de 0,3891 m/s no ponto 3. Foi utilizado o banho ISOCAL-6 Venus 2140B da Ecil (denominado de SMP3) para calibração da temperatura mostrada no SMC. No quadro 7, são mostradas as medições realizadas para a calibração de temperatura para os pontos 1 (-4 °C), 2 (20 °C) e 3 (44 °C), que correspondem a 10, 50 e 90% da faixa de medição prevista de -10 a 50 °C.

Quadro 7 – Medições realizadas para a calibração de temperatura

Amostra	Ponto 1		Ponto 2		Ponto 3	
	SMC	SMP3	SMC	SMP3	SMC	SMP3
1	-4,3	-4,01	20,2	19,98	44,5	44,00
2	-4,4	-4,01	20,1	19,98	44,6	44,01
3	-4,4	-4,01	20,3	19,99	44,5	44,01
4	-4,5	-4,01	20,2	20,01	44,5	44,01
5	-4,3	-4,02	20,2	20,00	44,6	44,01
6	-4,3	-4,01	20,3	20,00	44,4	44,01
7	-4,3	-4,00	20,2	20,01	44,6	44,01
8	-4,2	-4,00	20,1	20,01	44,4	44,00
9	-4,4	-4,01	20,1	20,00	44,6	44,00
10	-4,5	-4,01	20,2	19,99	44,4	44,00
11	-4,4	-4,01	20,1	19,99	44,6	43,99
12	-4,5	-4,01	20,3	19,98	44,6	43,98
13	-4,4	-4,01	20,2	19,98	44,4	43,98
14	-4,5	-4,01	20,0	19,99	44,2	43,98
15	-4,3	-4,00	20,1	19,99	44,5	43,98
16	-4,5	-4,01	20,0	19,98	44,6	43,99
17	-4,3	-4,01	20,2	19,98	44,7	44,00
18	-4,4	-4,02	20,1	19,99	44,6	44,00
19	-4,5	-4,03	20,1	19,99	44,1	44,00
20	-4,6	-4,03	20,3	20,00	44,5	44,01
21	-4,4	-4,02	20,2	20,00	44,6	44,01
22	-4,4	-4,01	20,1	20,00	44,5	44,01
23	-4,6	-4,01	20,1	20,01	44,6	43,99
24	-4,4	-4,01	20,1	20,01	44,6	44,00
25	-4,3	-4,01	19,9	20,00	44,5	44,00
26	-4,4	-4,01	20,0	20,00	44,6	44,00
27	-4,3	-4,01	20,1	20,00	44,7	43,99
28	-4,3	-4,01	20,2	20,00	44,6	43,99
29	-4,4	-4,01	20,1	20,00	44,6	43,99
30	-4,5	-4,02	20,3	20,00	44,7	43,99

Fonte: elaborado pelo autor.

As medições do quadro 7 geraram uma temperatura média de $-4,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ com desvio-padrão de $0,1026\text{ }^{\circ}\text{C}$ no ponto 1, temperatura média de $20,165\text{ }^{\circ}\text{C}$ com desvio-padrão de $0,0933\text{ }^{\circ}\text{C}$ no ponto 2 e temperatura média de $44,495\text{ }^{\circ}\text{C}$ com desvio-padrão de $0,1468\text{ }^{\circ}\text{C}$ no ponto 3.

4.8.2 Determinação das incertezas de medição

Segundo os passos descritos na seção 2.1.3.11, será descrita a determinação das incertezas de medição de temperatura e velocidade para o SMC.

4.8.2.1 Determinação das fontes de incerteza para velocidade e temperatura

Em primeiro lugar, é preciso determinar todas as fontes de incerteza envolvidas no processo experimental. Para a incerteza-padrão relacionada à exatidão do SMP1, assume-se uma distribuição retangular, que representa o pior caso (estimativa mais segura). Segundo o manual do equipamento, a exatidão é de $\pm 3\%$ sobre a faixa de 0 a 45 m/s, o que equivale a $\pm 1,35\text{ m/s}$, de modo que este valor é usado no cálculo da incerteza-padrão, que é feito pela equação 41.

$$u_{SMP1} = \frac{1,35}{\sqrt{3}} = 0,7794\text{ m/s} \quad (41)$$

Para a incerteza-padrão relacionada à exatidão do SMP2, assume-se uma distribuição retangular, que representa o pior caso. Segundo o site do fabricante, a exatidão é de $\pm 0,5\%$ sobre a faixa de 0 a 1 polegada de água. Pela escala da figura 36, encontra-se que a velocidade equivalente ao fundo de escala é de cerca de 4020 pés/min, ou 20,4m/s. Assim, a exatidão é de cerca de $\pm 0,102\text{ m/s}$, e este valor é usado no cálculo da incerteza-padrão, dado pela equação 42.

$$u_{SMP2} = \frac{0,102}{\sqrt{3}} = 0,0589\text{ m/s} \quad (42)$$

Para a incerteza-padrão relacionada à exatidão do SMP3, assume-se uma distribuição retangular, que representa o pior caso. Segundo o manual do equipamento, a exatidão na comparação direta entre um sensor externo e o do banho é de $\pm 0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, de modo que este valor é usado no cálculo da incerteza-padrão gerada pela exatidão do SMP3, que é feito pela equação 43.

$$u_{SMP3} = \frac{0,1}{\sqrt{3}} = 0,0577 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (43)$$

A incerteza-padrão relacionada à resolução dos valores de velocidade e temperatura mostrados no LCD do SMC é de uma casa decimal, ou 0,1 m/s e 0,1 °C, respectivamente. Assumindo uma distribuição retangular, a incerteza-padrão será a mesma para velocidade e temperatura, sendo dada pela equação 44.

$$u_{LCD} = \frac{0,1/2}{\sqrt{3}} = 0,02887 \quad (44)$$

O microcontrolador Arduino tem conversores A/D com dez bits de resolução, assim tem-se 1024 níveis de tensão diferentes que poderiam ser lidos caso a tensão de entrada variasse de 0 a 5V. No caso da medição de velocidade, esta varia de 0 a 10,36m/s, e nesse intervalo são medidas as tensões entre 1,46 e 4,53V. Estas correspondem aos níveis 299 e 927 dentro da faixa de 0 a 1023. Assim, a resolução da leitura de velocidade do conversor A/D será dada pela equação 45.

$$Res_{AD_U} = \frac{10,36}{(927 - 299)} = 0,0165 \text{ m/s} \quad (45)$$

Considerando uma distribuição retangular, a incerteza-padrão da leitura de velocidade do conversor A/D será dada pela equação 46.

$$u_{AD_U} = \frac{0,0165/2}{\sqrt{3}} = 0,004762 \text{ m/s} \quad (46)$$

No caso da medição de temperatura, esta pode variar de -10 a 50 °C, e nesse intervalo são medidas as tensões entre 1,78 e 4,54V. Estas correspondem aos níveis 364 e 930 dentro da faixa de 0 a 1023. Assim, a resolução da leitura de temperatura do conversor A/D será dada pela equação 47.

$$Res_{AD_T} = \frac{(50 - (-10))}{(930 - 364)} = 0,106 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (47)$$

Considerando uma distribuição retangular, a incerteza-padrão da leitura de temperatura do conversor A/D será dada pela equação 48.

$$u_{AD_T} = \frac{0,106/2}{\sqrt{3}} = 0,0306 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (48)$$

Como as incertezas-padrão obtidas pelas equações 41 a 44, 46 e 48 são do tipo B e assume-se a distribuição como conhecida, o número de graus de liberdade é infinito para todas essas fontes de incerteza. As únicas fontes de incerteza estatística (tipo A) são as derivadas das medições executadas nos três pontos de calibração de velocidade e temperatura. Nos pontos de medição utilizados para as calibrações, aparecem incertezas aleatórias, cujo valor é determinado pelo desvio-padrão das medidas e pelo número de medidas md . Além dessa incerteza, surge um fator de correção decorrente do erro sistemático. Foi considerada a distribuição normal para as medidas realizadas.

4.8.2.2 Determinação da incerteza de medição da velocidade

Para as medições de velocidade nos três pontos de calibração, pode-se calcular a incerteza, o número de graus de liberdade e o fator de correção de acordo com a seção 2.1.3.11. Para as medições com o ajuste por curva de potências, esses valores são mostrados no quadro 8.

Quadro 8 - Incerteza, graus de liberdade e fator de correção para a medição de velocidade com ajuste por curva de potências

Parâmetro	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3
UMED_U	0,00895	0,03299	0,05158
VMED_U	29	29	29
CMED_U	0,4733	0,092	-0,31

Fonte: elaborado pelo autor.

A correção combinada será numericamente igual a C_{MED_U} para os três pontos de calibração, pois não há outras fontes de erro sistemático além das próprias medições de velocidade realizadas. A incerteza combinada C_C para várias fontes não-correlacionadas pode ser obtida pela equação 49 aplicada em cada ponto de calibração da velocidade.

$$u_{C_U1} = \sqrt{u_{MED_U1}^2 + u_{LCD_U}^2 + u_{AD_U}^2 + u_{SMPx}^2} \quad (49)$$

Na equação 49, u_{SMPx} é a incerteza-padrão do SMP1 para o ponto 1 e a incerteza-padrão do SMP2 para os pontos 2 e 3. Como as incertezas tipo B tem

infinitos graus de liberdade, o número de graus de liberdade efetivos pode ser obtido pela equação 50 aplicada em cada ponto de calibração da velocidade.

$$V_{ef_U1} = \frac{u_{C_U1}^4}{u_{MED_U1}^4 / V_{MED_U}} \quad (50)$$

A incerteza expandida é obtida a partir da incerteza combinada e do fator de abrangência t_{ST} . O fator t_{ST} foi calculado pela função INVT do Microsoft Excel, que utiliza como argumentos a probabilidade associada à distribuição t de Student bicaudal e o número de graus de liberdade V_{ef} . O quadro 9 mostra os resultados obtidos mediante a aplicação das equações 49, 50 e 6.

Quadro 9 – Incerteza combinada, graus de liberdade efetivos e incerteza expandida para a medição de velocidade com ajuste por curva de potências

Parâmetro	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3
u_{C_U}	0,78	0,0736	0,0836
V_{ef_U}	$1,67 \times 10^9$	717,38	199,94
t_{ST}	1,96	1,963	1,972
U_{exp}	1,53	0,14	0,16

Fonte: elaborado pelo autor.

Com isso, são gerados os quadros 10, 11 e 12 para os três pontos de calibração da velocidade.

Quadro 10 - Quadro-resumo para $U=1,04$ m/s e ajuste por curva de potências

FONTE	TIPO	DISTRIBUIÇÃO	CORREÇÃO	INCERTEZA	GL
SMP1	B	Retangular	-	0,7794 m/s	∞
ResLCD_U	B	Retangular	-	0,02887 m/s	∞
ResAD_U	B	Retangular	-	0,004762 m/s	∞
MED_U1	A	Normal	0,4733 m/s	0,00895 m/s	29
CORREÇÃO COMBINADA (C_{MED_U1})				0,4733 m/s	
INCERTEZA COMBINADA (u_{C_U1})				0,78 m/s	
GRAUS DE LIBERDADE EFETIVOS (V_{ef_U1})				$1,67 \times 10^9$	
COEFICIENTE DE ABRANGÊNCIA (t_{ST})				1,96	
INCERTEZA EXPANDIDA (U_{exp})				1,5 m/s	

Fonte: elaborado pelo autor.

Quadro 11 - Quadro-resumo para $U=5$ m/s e ajuste por curva de potências

FONTE	TIPO	DISTRIBUIÇÃO	CORREÇÃO	INCERTEZA	GL
SMP2	B	Retangular	-	0,0589 m/s	∞
ResLCD_U	B	Retangular	-	0,02887 m/s	∞
ResAD_U	B	Retangular	-	0,004762 m/s	∞
MED_U2	A	Normal	0,092 m/s	0,03299 m/s	29
CORREÇÃO COMBINADA (C_{MED_U2})				0,092 m/s	
INCERTEZA COMBINADA (u_{C_U2})				0,0736 m/s	
GRAUS DE LIBERDADE EFETIVOS (V_{ef_U2})				717,38	
COEFICIENTE DE ABRANGÊNCIA (t_{ST})				1,963	
INCERTEZA EXPANDIDA (U_{exp})				0,14 m/s	

Fonte: elaborado pelo autor.

Quadro 12 - Quadro-resumo para $U=9,14$ m/s e ajuste por curva de potências

FONTE	TIPO	DISTRIBUIÇÃO	CORREÇÃO	INCERTEZA	GL
SMP2	B	Retangular	-	0,0589 m/s	∞
ResLCD_U	B	Retangular	-	0,02887 m/s	∞
ResAD_U	B	Retangular	-	0,004762 m/s	∞
MED_U3	A	Normal	-0,31 m/s	0,05158 m/s	29
CORREÇÃO COMBINADA (C_{MED_U3})				-0,31 m/s	
INCERTEZA COMBINADA (u_{C_U3})				0,0836 m/s	
GRAUS DE LIBERDADE EFETIVOS (V_{ef_U3})				199,94	
COEFICIENTE DE ABRANGÊNCIA (t_{ST})				1,972	
INCERTEZA EXPANDIDA (U_{exp})				0,16 m/s	

Fonte: elaborado pelo autor.

Para as medições com o ajuste polinomial, a incerteza, o número de graus de liberdade e o fator de correção, obtidos de acordo com a seção 2.1.3.11, são mostrados no quadro 13.

Quadro 13 - Incerteza, graus de liberdade e fator de correção para a medição de velocidade com ajuste polinomial

Parâmetro	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3
u_{MED_U}	0,01081	0,02984	0,07103
V_{MED_U}	29	29	29
C_{MED_U}	-0,88	-0,1133	0,2503

Fonte: elaborado pelo autor.

A correção combinada será numericamente igual a C_{MED_U} para os três pontos de calibração, pois não há outras fontes de erro sistemático além das próprias medições de velocidade realizadas. A incerteza combinada C_C para várias fontes não-correlacionadas pode ser obtida pela equação 49 aplicada em cada ponto de calibração da velocidade. O número de graus de liberdade efetivos pode ser obtido pela equação 50 aplicada em cada ponto de calibração da velocidade. A incerteza expandida é obtida a partir da equação 6. O quadro 14 mostra os resultados obtidos mediante a aplicação das equações 49, 50 e 6.

Quadro 14 – Incerteza combinada, graus de liberdade efetivos e incerteza expandida para a medição de velocidade com ajuste polinomial

Parâmetro	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3
u_{C_U}	0,78	0,0722	0,0968
V_{ef_U}	$7,86 \times 10^8$	995,05	100,03
t_{ST}	1,96	1,962	1,984
U_{exp}	1,53	0,14	0,19

Fonte: elaborado pelo autor.

Com isso, são gerados os quadros 15, 16 e 17 para os três pontos de calibração da velocidade.

Quadro 15 - Quadro-resumo para $U=1,04$ m/s e ajuste polinomial

FONTE	TIPO	DISTRIBUIÇÃO	CORREÇÃO	INCERTEZA	GL
SMP1	B	Retangular	-	0,7794 m/s	∞
ResLCD_U	B	Retangular	-	0,02887 m/s	∞
ResAD_U	B	Retangular	-	0,004762 m/s	∞
MED_U1	A	Normal	-0,88 m/s	0,01081 m/s	29
CORREÇÃO COMBINADA (C_{MED_U1})				-0,88 m/s	
INCERTEZA COMBINADA (u_{C_U1})				0,78 m/s	
GRAUS DE LIBERDADE EFETIVOS (V_{ef_U1})				$7,86 \times 10^8$	
COEFICIENTE DE ABRANGÊNCIA (t_{ST})				1,96	
INCERTEZA EXPANDIDA (U_{exp})				1,5 m/s	

Fonte: elaborado pelo autor.

Quadro 16 - Quadro-resumo para $U=4,97$ m/s e ajuste polinomial

FONTE	TIPO	DISTRIBUIÇÃO	CORREÇÃO	INCERTEZA	GL
SMP2	B	Retangular	-	0,0589 m/s	∞
ResLCD_U	B	Retangular	-	0,02887 m/s	∞
ResAD_U	B	Retangular	-	0,004762 m/s	∞
MED_U2	A	Normal	-0,1133 m/s	0,02984 m/s	29
CORREÇÃO COMBINADA (C_{MED_U2})				-0,1133 m/s	
INCERTEZA COMBINADA (u_{C_U2})				0,0722 m/s	
GRAUS DE LIBERDADE EFETIVOS (V_{ef_U2})				995,05	
COEFICIENTE DE ABRANGÊNCIA (t_{ST})				1,962	
INCERTEZA EXPANDIDA (U_{exp})				0,14 m/s	

Fonte: elaborado pelo autor.

Quadro 17 - Quadro-resumo para $U=9,11$ m/s e ajuste polinomial

FONTE	TIPO	DISTRIBUIÇÃO	CORREÇÃO	INCERTEZA	GL
SMP2	B	Retangular	-	0,0589 m/s	∞
ResLCD_U	B	Retangular	-	0,02887 m/s	∞
ResAD_U	B	Retangular	-	0,004762 m/s	∞
MED_U3	A	Normal	0,2503 m/s	0,07103 m/s	29
CORREÇÃO COMBINADA (C_{MED_U3})				0,2503 m/s	
INCERTEZA COMBINADA (u_{C_U3})				0,0968 m/s	
GRAUS DE LIBERDADE EFETIVOS (V_{ef_U3})				100,03	
COEFICIENTE DE ABRANGÊNCIA (t_{ST})				1,984	
INCERTEZA EXPANDIDA (U_{exp})				0,19 m/s	

Fonte: elaborado pelo autor.

4.8.2.3 Determinação da incerteza de medição da temperatura

Para as medições de temperatura nos três pontos de calibração, pode-se calcular a incerteza, o número de graus de liberdade e o fator de correção de acordo com a seção 2.1.3.11. Esses valores são mostrados no quadro 18.

Quadro 18 - Incerteza, graus de liberdade e fator de correção para a medição de temperatura

Parâmetro	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3
u_{MED_T}	0,01873	0,01704	0,02680
V_{MED_T}	29	29	29
C_{MED_T}	0,3885	-0,1730	-0,7015

Fonte: elaborado pelo autor.

A correção combinada C_c será numericamente igual a C_{MED_T} para os três pontos de calibração, pois não há outras fontes de erro sistemático além das próprias medições de temperatura realizadas. A incerteza combinada para várias fontes não-correlacionadas pode ser obtida pela equação 49 aplicada em cada ponto de calibração da temperatura. Como as incertezas tipo B tem infinitos graus de liberdade, o número de graus de liberdade efetivos pode ser obtido pela equação 50 aplicada em cada ponto de calibração da temperatura. A incerteza expandida é obtida para os pontos de calibração da temperatura pela equação 6. O quadro 19 mostra os resultados obtidos mediante a aplicação das equações 49, 50 e 6.

Quadro 19 – Incerteza combinada, graus de liberdade efetivos e incerteza expandida para a medição de temperatura

Parâmetro	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3
u_{C_T}	0,0738	0,0734	0,0763
V_{ef_T}	6996,51	9991,83	1901,6
t_{ST}	1,960	1,960	1,961
U_{exp}	0,1	0,1	0,1

Fonte: elaborado pelo autor.

Com isso, são gerados os quadros 20, 21 e 22 para os três pontos de calibração da temperatura.

Quadro 20 - Quadro-resumo para $T = -4,01\text{ }^{\circ}\text{C}$

FONTE	TIPO	DISTRIBUIÇÃO	CORREÇÃO	INCERTEZA	GL
SMP3	B	Retangular	-	0,0577 °C	∞
ResLCD_T	B	Retangular	-	0,02887 °C	∞
ResAD_T	B	Retangular	-	0,0306 °C	∞
MED_T1	A	Normal	0,3885 °C	0,01873 °C	29
CORREÇÃO COMBINADA (C_{MED_T1})				0,3885 °C	
INCERTEZA COMBINADA (u_{C_T1})				0,0738 °C	
GRAUS DE LIBERDADE EFETIVOS (V_{ef_T1})				6996,51	
COEFICIENTE DE ABRANGÊNCIA (t_{ST})				1,96	
INCERTEZA EXPANDIDA (U_{exp})				0,1 °C	

Fonte: elaborado pelo autor.

Quadro 21 - Quadro-resumo para T= 19,99 °C

FONTE	TIPO	DISTRIBUIÇÃO	CORREÇÃO	INCERTEZA	GL
SMP3	B	Retangular	-	0,0577 °C	∞
ResLCD_T	B	Retangular	-	0,02887 °C	∞
ResAD_T	B	Retangular	-	0,0306 °C	∞
MED_T2	A	Normal	-0,173 °C	0,01704 °C	29
CORREÇÃO COMBINADA (C_{MED_T2})				-0,173 °C	
INCERTEZA COMBINADA (u_{C_T2})				0,0734 °C	
GRAUS DE LIBERDADE EFETIVOS (V_{ef_T2})				9991,83	
COEFICIENTE DE ABRANGÊNCIA (t_{ST})				1,96	
INCERTEZA EXPANDIDA (U_{exp})				0,1 °C	

Fonte: elaborado pelo autor.

Quadro 22 - Quadro-resumo para T= 44 °C

FONTE	TIPO	DISTRIBUIÇÃO	CORREÇÃO	INCERTEZA	GL
SMP3	B	Retangular	-	0,0577 °C	∞
ResLCD_T	B	Retangular	-	0,02887 °C	∞
ResAD_T	B	Retangular	-	0,0306 °C	∞
MED_T3	A	Normal	-0,7015 °C	0,0268 °C	29
CORREÇÃO COMBINADA (C_{MED_T3})				-0,7015 °C	
INCERTEZA COMBINADA (u_{C_T3})				0,0763 °C	
GRAUS DE LIBERDADE EFETIVOS (V_{ef_T3})				1901,6	
COEFICIENTE DE ABRANGÊNCIA (t_{ST})				1,961	
INCERTEZA EXPANDIDA (U_{exp})				0,1 °C	

Fonte: elaborado pelo autor.

Com isso, encerra-se a parte prática do trabalho. Na seção 4.9, serão analisados os resultados obtidos.

4.9 ANÁLISE DE RESULTADOS

A partir dos resultados obtidos na caracterização dos sensores, em especial o de temperatura, fica clara a relação linear entre esta grandeza e a resistência elétrica, o que era esperado pelo fato de que ambos os sensores são simplesmente fios esmaltados de cobre soldados sobre uma moldura. O processo de calibração deixou claro que, em termos de incerteza de medição, o ponto 1 da velocidade (que corresponde a 10% da velocidade máxima que foi possível produzir no túnel de vento) é o mais crítico.

Com a regressão polinomial, a correção combinada foi de $-0,88$ m/s, ou seja, o valor medido pelo SMC foi maior do que o indicado pelo SMP1, tal como era previsto pela curva da figura 23, que apresenta uma oscilação positiva entre as velocidades zero e $1,6$ m/s, exatamente o intervalo dentro do qual está o ponto 1. Já com a regressão linear sobre a curva de potências, a correção combinada foi de $0,47$ m/s, ou seja, o valor medido pelo SMC foi menor do que o indicado pelo SMP1, tal como era previsto pela curva da regressão linear da figura 24. Esta mostra que, em relação ao conjunto de pontos que simboliza a curva original, tensões ligeiramente maiores de saída são necessárias para produzir uma velocidade entre zero e $1,6$ m/s, exatamente o intervalo dentro do qual está o ponto 1.

Para os pontos de calibração 2 e 3, que representam as velocidades aproximadamente iguais a 50 e 90% da faixa de velocidades do túnel de vento, as incertezas expandidas foram semelhantes, na ordem de $0,15$ m/s, dez vezes menores do que as obtidas para o ponto 1. Esse comportamento também era esperado pelo fato de que ambas as regressões produziram curvas praticamente coincidentes com as originais em todo o intervalo acima de $1,6$ m/s.

Comparando ambos os métodos de ajuste, não é possível determinar claramente a superioridade de um frente ao outro, pois os erros aleatório e sistemático, simbolizados pela incerteza combinada e pela correção combinada, respectivamente, são muito próximos entre si. No ponto de calibração 1, ainda que se observe que a correção combinada do ajuste por curva de potências seja um pouco mais do que a metade da obtida com o ajuste polinomial, ambas são excessivas frente à velocidade sendo medida.

4.10 ANÁLISE DE CUSTOS

No quadro 23, são mostrados os custos associados aos componentes do anemômetro desenvolvido, tendo como referência o mês de março de 2018. Foram considerados entre parênteses os custos de entrega, considerando os praticados pelo site Mercado Livre.

Quadro 23 - Quadro de custos do projeto

Componente	Custo total (R\$)
Placa Arduino Mega 2560 com cabo USB	<u>60,00 (+15,00)</u>
Display LCD 16x02	<u>13,08 (+15,00)</u>
Matriz de contatos	25,00
Amplificador operacional TLC2652	<u>11,00</u>
Amplificadores operacionais LF351	8,00
Demais componentes	40,00
Total estimado:	177,08
Total efetivo:	114,08

Fonte: elaborado pelo autor.

Os custos efetivos do projeto estão sublinhados. O custo da placa Arduino Mega 2560, como era esperado, foi o maior. As peças de fenolite utilizadas nas molduras dos sensores, bem como o fio esmaltado 41 AWG, foram obtidos de sobras desses materiais.

Os demais componentes, como matriz de contatos, amplificadores operacionais, transistores, capacitores e resistores, foram reaproveitados ou obtidos no almoxarifado do Curso de Engenharia Elétrica, assim não geraram um custo efetivo. Seus custos são também estimados com base nos anúncios do site Mercado Livre. Como se pode notar, a proposta inicial de baixo custo foi atendida.

5 CONCLUSÃO

Neste capítulo, serão apresentadas as considerações finais acerca do trabalho, bem como sugestões para futuros trabalhos envolvendo anemometria térmica.

5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em primeiro lugar, pode-se concluir que o princípio de funcionamento do anemômetro de fio quente foi adequadamente implementado, pois foi possível observar o mesmo comportamento físico que a literatura já prevê, especialmente em relação à variação da tensão de saída V_{O2_U} em relação à velocidade. Percebeu-se uma taxa de variação positiva e decrescente de V_{O2_U} para velocidades crescentes, tal como previsto. O controle da potência sobre o sensor se mostrou adequado, pois o circuito de controle rapidamente compensava variações na velocidade do fluxo.

Para uma medição adequada, que se traduz em um nível ótimo de sensibilidade do sistema de medição, um correto ajuste do ponto de operação foi crucial. Como já havia sido determinado empiricamente, tensões sobre o sensor na ordem de 0,5V ou menos na ausência de fluxo de ar tornam o instrumento insensível ao fluxo de ar, e tensões superiores a 0,9V tornam a medição instável, ou seja, levam a saída à saturação, na presença de um fluxo relativamente lento de ar. Com tensões muito baixas, a temperatura do sensor aquecido também será baixa, logo é necessário um fluxo de ar muito rápido para que seja possível detectar uma variação de velocidade. No outro extremo, verifica-se que tensões elevadas geram temperaturas elevadas no sensor, o que permite que até um fluxo lento de ar altere substancialmente a tensão de saída. É preciso ressaltar também que o consumo de energia do sistema cresce à medida que aumenta a temperatura de operação do sensor de velocidade.

Quanto ao firmware, seu funcionamento esteve de acordo com o previsto, mas há que se ressaltar a necessidade de utilizar microcontroladores com conversores A/D mais rápidos para uma eventual aplicação comercial que exija medição em fluxos turbulentos, com variações bruscas de velocidade. Foi possível perceber um baixo tempo de resposta do sensor de temperatura, que tende a poucos segundos para velocidades mais elevadas dentro da faixa testada. Sem fluxo de ar, o seu tempo de estabilização frente a um degrau de $-28\text{ }^{\circ}\text{C}$ foi de 3 minutos, e caiu para 25s quando ele foi exposto a um fluxo de ar a 4 m/s. Para a medição de velocidade, a resposta foi

ainda mais rápida pelo fato de que o funcionamento é em malha fechada, o que confirma a previsão teórica. Na energização, o tempo de estabilização de V_{o2_U} foi de apenas 31ms.

Comparando ambos os métodos de ajuste, não foi possível determinar claramente a superioridade de um frente ao outro, pois os erros aleatório e sistemático tem valores muito próximos entre si. Em especial para largas faixas de velocidade, porém, a tendência segundo a literatura é que o ajuste polinomial se mostre mais exato do que o ajuste por curva de potências.

Em relação à incerteza expandida do instrumento, de forma geral ela se mostrou satisfatória, tendo em vista que os sensores foram confeccionados à mão e os componentes eletrônicos utilizados foram, em sua grande maioria, de baixo custo. Para ambos os ajustes, destacam-se os comportamentos observados nas velocidades de 5 m/s, que gerou uma incerteza de 0,14 m/s para ambos os ajustes (2,8% do valor medido), e na velocidade de 9,1 m/s, que gerou uma incerteza máxima de 0,19 m/s, (2,1% do valor medido). Ambas as incertezas são inferiores ao objetivo estipulado de 5%, logo este foi atendido para a segunda metade da faixa de medição do instrumento desenvolvido.

Entende-se que o erro sistemático observado para o ponto 1 da calibração poderia ser substancialmente reduzido com mais pontos de medição na faixa de 0 a 1,6 m/s, onde a variação da tensão V_{o2_U} é maior frente ao restante da curva. Para os pontos 2 e 3, que geraram erros sistemáticos de cerca de 0,1 e 0,3 m/s, respectivamente, em relação aos valores esperados, entende-se que o comportamento do instrumento desenvolvido foi satisfatório.

Para uma aplicação comercial, fica clara a necessidade de se utilizar, em primeiro lugar, um sensor com resistência elétrica mais elevada para reduzir o consumo de energia do sistema e permitir assim sua alimentação por meio de baterias, tornando-o portátil. Em segundo lugar, seriam necessários resistores com tolerância de valores menor do que os 5% utilizados. Para a ponte de Wheatstone, resistores de potência maior do que os de 10W utilizados permitiriam uma operação com menos aquecimento, caso fosse mantido o mesmo sensor de velocidade. Além disso, um dissipador de calor com maior área de contato com o ar permitiria uma operação mais segura para o transistor que realimenta a ponte. Infelizmente, não havia espaço suficiente para a colocação de um dissipador maior na montagem.

É preciso ressaltar também a importância de se repetir o processo de calibração anteriormente descrito para mais temperaturas além da ambiente, uma vez que a medição de velocidade é dependente da temperatura do fluxo. Por causa dessa impossibilidade, foi preciso impor um limite de ± 5 °C em relação à temperatura medida na construção da curva de velocidade em função de V_{o2_U} . Além dessa faixa, a tendência é um desvio excessivo do valor esperado de velocidade.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Por circunstâncias de tempo e infra-estrutura experimental, diversos testes e procedimentos não puderam ser executados. A seguir, são listadas sugestões de investigações a serem realizadas em trabalhos futuros que envolvam anemometria térmica. São elas:

- a) Testes práticos da mesma topologia de medição adotada para faixas maiores de velocidade e para quaisquer temperaturas diferentes da ambiente. Tais procedimentos permitem uma análise mais completa do comportamento prático de um anemômetro de fio quente, porém somente são viáveis com túneis de vento em circuito fechado e/ou com um sistema de aquecimento de ar mais potente do que o empregado. Testes em temperaturas menores do que a ambiente também são desejáveis, mas exigem um sistema adicional para resfriamento de ar;
- b) Testes práticos da mesma topologia de medição para outros tipos de sensores, como de fio de platina e de filme quente, e comparação dos resultados obtidos com sensores já consolidados no mercado;
- c) Repetição dos testes anteriores para outras topologias do sistema já descritas anteriormente, como a que contempla compensação de temperatura por meio de chaveamento entre dois resistores, ou ainda a que controla o sensor de velocidade por meio de pulsos PWM;
- d) Simulações da resposta dinâmica do sistema envolvendo todas as topologias anteriores, de modo que seja possível desenvolver métodos de ajuste automático da temperatura de operação do sensor aquecido, e que eventualmente permitam a troca do sensor utilizado por um similar sem a necessidade de uma nova caracterização do sensor.

REFERÊNCIAS

- AGUIRRE, Luis Antonio. **Fundamentos de Instrumentação**. São Paulo: Pearson, 2013.
- ALEXANDER, Charles K.; SADIKU, Matthew N. O. **Fundamentos de circuitos elétricos**. 5. ed. Porto Alegre: McGraw-Hill: Bookman, 2013.
- ARAÚJO, Leonardo Vale; CATUNDA, S. Y. C. *et al.* **A controlled-temperature hot-wire anemometer with voltage feedback linearization**. IEEE, 2014. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/6860761/>>. Acesso em 29 set. 2017.
- Arduino Mega 2560 rev3**. Disponível em: <<https://store.arduino.cc/usa/arduino-mega-2560-rev3>>. Acesso em 26 mai. 2018.
- ATP Instrumentation. **Digital Multimeter Operation Manual. Model: MY-64**. Disponível em: <<https://www.atp-instrumentation.co.uk/manuals/electrical/DM-64-Manual.pdf>>. Acesso em 26 mai. 2018.
- ATS - Advanced Thermal Solutions Incorporated. **Understanding hot wire anemometry**. 2007. Disponível em: <http://www.qats.com/Download/Qpedia_Dec07_Understanding%20hot%20wire%20anemometry.ashx>. Acesso em 02 ago. 2017.
- BALBINOT, Alexandre; BRUSAMARELLO, Valner João. **Instrumentação e fundamentos de medidas**. Vol 1. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2010.
- BALBINOT, Alexandre; BRUSAMARELLO, Valner João. **Instrumentação e fundamentos de medidas**. Vol 2. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011.
- CHOPRA, Mehak. **Hot Wire Anemometry and Fluid Flow Measurement**. Instituto Indiano de Tecnologia, Nova Delhi, 2008. Disponível em: <http://www.leb.eei.uni-erlangen.de/winterakademie/2008/report/content/course01_pdf/0107.pdf>. Acesso em 13 ago. 2017.
- Dwyer Instruments. **Series 475 Intrinsically Safe Handheld Digital Manometer**. Disponível em: <<http://www.dwyer-inst.com/Product/Pressure/Manometers/Digital/Series475#specs>>. Acesso em 26 mai. 2018.
- FERREIRA, Raimundo P. C.; FREIRE, Raimundo C. S. *et al.* **Hot-wire anemometer with temperature compensation using only one sensor**. IEEE, 2001. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/948306/>>. Acesso em 29 set. 2017.
- FERREIRA, Vitor Pinheiro. PEPE, Iuri Muniz. **Anemômetro de fio quente de baixo custo para medição de vazão de ar condicionado**. VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica. Campina Grande – Paraíba. 2010. Disponível em: <<http://www.abcm.org.br/anais/conem/2010/PDF/CON10-1587.pdf>>. Acesso em 29 set. 2017.
- GONÇALVES JÚNIOR, Armando Albertazzi; SOUSA, André R. de. **Fundamentos de metrologia científica e industrial**. Barueri, SP: Manole, 2008. xiv, 408 p.

ICEL. **Manual de instruções do anemômetro modelo AN-10**. Disponível em: <<http://www.icel-manaus.com.br/manual/AN-10%20Manual.pdf>>. Acesso em 15 mai. 2018.

Isotech. **Venus Plus 2140 Handbook**. Disponível em: <http://www.isotechna.com/vspfiles/product_manuals/Isotech/Venus%202140.pdf>. Acesso em 15 mai. 2018.

JCGM - Joint Committee for Guides in Metrology. **Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement**. 2008. Disponível em: <www.bipm.org>. Acesso em 27 mai. 2018.

JØRGENSEN, Finn. **How to measure turbulence with hot-wire anemometers – a practical guide**. Dantec Dynamics. 2002. Disponível em: <<http://web.iitd.ac.in/~pmvs/courses/mel705/hotwire2.pdf>>. Acesso em 02 ago. 2017.

Minipa. **Manual do multímetro ET-2042E**. Disponível em: <<http://www.minipa.com.br/images/Manual/ET-2042E-1101-BR.pdf>>. Acesso em 27 mai. 2018.

MONTEIRO, Leonardo Herz. **Estudo e Modelagem de um Anemômetro a Fio Quente Operando em Temperatura Constante**. UFRJ, 2015. Disponível em: <<http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10014347.pdf>>. Acesso em 02 ago. 2017.

OLIVEIRA, Amauri. FREIRE, Raimundo C. S. et al. **An anemometer with PWM excitation**. IEEE, 1995. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/483847>>. Acesso em 29 set. 2017.

SCHNEIDER, Paulo Smith. **Medição de Velocidade e Vazão de Fluidos**. Apostila da disciplina de Medições Térmicas – UFRGS. Disponível em: <http://www.ufrgs.br/medterm/areas/area-ii/vazao_mt.pdf>. Acesso em: 10 set. 2017.

SILVA, Diorginer H. **Fundamentos básicos de mecânica**. Curso de Automação Industrial. Poços de Caldas, MG. 2013. Disponível em: <<http://pt.slideshare.net/diorginer/aula-02-16958620>>. Acesso em 20 set. 2017.

THOMAZINI, Daniel; ALBUQUERQUE, Pedro U. B. de. **Sensores industriais: fundamentos e aplicações**. 8. ed., rev. e atual. São Paulo: Érica, 2012. 224 p.

TSI Thermal Anemometry Probes - TSI Incorporated. 2013. Disponível em: <http://www.tsi.com/uploadedFiles/_Site_Root/Products/Literature/Catalogs/Hotwire_Catalog_2980465.pdf>. Acesso em 02 ago. 2017.

VIM - Vocabulário Internacional de Metrologia. Disponível em: <inmetro.gov.br/inovacao/publicacoes/vim_2012.pdf>. Acesso em 07 set. 2017.

YOUNG, Hugh D.; FREEDMAN, Roger A. **Física II: termodinâmica e ondas - 12ª edição**. São Paulo: Addison Wesley, 2008.