

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

GUSTAVO PAZ PLATCHECK

Sensoriamento do Deslocamento de Ar no Transporte e Armazenamento de Hortifrutigranjeiros através de Redes de Sensores sem Fio

Porto Alegre

2017

GUSTAVO PAZ PLATCHECK

Sensoriamento do Deslocamento de Ar no Transporte e Armazenamento de Hortifrutigranjeiros através de Redes de Sensores sem Fio

Projeto de diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para Graduação em Engenharia Elétrica.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Ivan Muller

Porto Alegre

2017

CIP - Catalogação na Publicação

Platcheck, Gustavo Paz

Sensoriamento do Deslocamento de Ar no Transporte e Armazenamento de Hortifrutigranjeiros através de Redes de Sensores sem Fio / Gustavo Paz Platcheck. -- 2017.
63 f.

Orientador: Ivan Muller.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Curso de Engenharia Elétrica, Porto Alegre, BR-RS, 2017.

1. Anemometria. 2. Redes sem fio. 3. Calibração. 4. Eletrônica. I. Muller, Ivan, orient. II. Título.

GUSTAVO PAZ PLATCHECK

Sensoriamento do Deslocamento de Ar no Transporte e Armazenamento de Hortifrutigranjeiros através de Redes de Sensores sem Fio

Este projeto foi julgado adequado para fazer jus aos créditos da Disciplina de “Projeto de Diplomação”, do Departamento de Engenharia Elétrica e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: _____

Prof. Dr. Ivan Muller, UFRGS

Aprovado em: ___ / ___ / ___

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Hamilton Klimach, UFRGS

Doutor pela Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Dr. Tiago Balen, UFRGS

Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Dr. Valner Brusamarello, UFRGS

Doutor pela Universidade Federal de Santa Catarina

Chefe do DELET: Prof. Dr. Ály Ferreira Flores Filho

Doutor pela Universidade de Cardiff, UK

Dedico este trabalho a minha esposa Fernanda Genehr, por todo apoio e compreensão ao longo deste caminho, me dando forças para continuar.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Ivan Muller, pela orientação, disponibilidade e grande desprendimento em ajudar-me ao longo deste projeto.

A minha esposa Fernanda Genehr, pela paciência, companhia e incentivo.

A Universidade Federal do Rio Grande do Sul, pelo excelente ambiente oferecido aos seus alunos e os profissionais qualificados que disponibiliza para nos ensinar.

Por fim, agradeço de forma especial aos meus pais, Maria Giselda Paz Platcheck e Ivsen Platcheck, que tornaram tudo possível.

RESUMO

Neste trabalho é desenvolvida uma rede de sensores sem fio para determinação da velocidade do vento em câmaras térmicas e caminhões refrigeradores. Para isso são utilizadas três placas *Wind Sensor*, do fabricante MODERN DEVICES, que são anemômetros a fio quente operando à temperatura constante. As placas foram calibradas com o uso de um túnel de vento, também desenvolvido neste projeto. A aquisição de dados é realizada através de dispositivos de redes de sensores sem fio *Namimote*, que atuam como nós sensores no interior das câmaras. A faixa de calibração foi de 0 m/s até aproximadamente 3,5 m/s. A funcionalidade do sistema foi verificada, sendo possível coletar dados de diferentes nós sensores e um nó coletor capaz de salvar os dados coletados e apresentá-los graficamente para o usuário.

PALAVRAS-CHAVE: anemômetro, redes sem fio, calibração.

ABSTRACT

In this project, a wireless sensor network was developed to perform measurement of wind speed in cooling chambers and refrigerated trucks. To perform these measurements, it was used three hot-wire anemometer circuits operating in constant temperature, called *Wind Sensor*, developed by MODERN DEVICES. The three anemometers were calibrated using a wind tunnel, also developed in this project. The data acquisition is made through *Namimote* sensor nodes. The wind speed range of the calibration varies from 0 m/s to approximately 3.5 m/s. The functionality of the system was verified, being able to collect data from different node sensors with only one controller node, which was able to save the data and present them graphically to the user.

KEYWORDS: anemometry, wireless network, calibration.

SUMARIO

Capítulo 1 – Introdução.....	1
Capítulo 2 – Fundamentação Teórica.....	3
2.1 – Tipos de Anemômetros.....	3
2.1.1 – Anemômetro do tipo Copo (tipo Robinson).....	3
2.1.2 – Anemômetro do tipo Hélice.....	4
2.1.3 – Anemômetro à Fio Quente.....	4
2.1.4 – Anemômetros Ultrassônicos.....	5
2.2 - Anemômetros à Fio Quente.....	6
2.2.1 – Anemômetro à Fio Quente Operando com Temperatura Constante.....	7
2.2.2 – Equacionamento.....	9
2.3 Trabalhos Relacionados.....	12
Capítulo 3 – Materiais Utilizados.....	14
3.1 – Nó sensor <i>Namimote</i>	14
3.2 – Anemômetro <i>Wind Sensor</i>	16
3.3 – Placa Reguladora de Tensão.....	22
3.4 – Sensor de Temperatura DS18B20.....	23
3.5 – Anemômetro tipo Hélice ICEL AN-3040.....	25
3.6 – Túnel de Vento.....	26
Capítulo 4 – Metodologia Experimental.....	33
Capítulo 5 – Resultados e Discussão.....	36
Capítulo 6 – Conclusões e Trabalhos Futuros.....	47
Referências	
Bibliográficas.....	48

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Anemômetro do tipo Copo.....	3
Figura 2 - Anemômetro tipo Hélice.....	4
Figura 3 – Sondas de anemômetro a Fio Quente.....	5
Figura 4 – Anemômetro tipo Ultrassônico Bidimensional.....	6
Figura 5 - Esquemático elétrico de uma ponte de <i>Wheatstone</i>	8
Figura 6 - Diagrama de blocos de um anemômetro operando a temperatura constante.....	9
Figura 7 – Diagrama de funcionamento da rede de sensores sem fio.....	15
Figura 8 – Imagem do nó sensor utilizado.....	15
Figura 9 – Placa de anemômetro a fio quente <i>Wind Sensor</i>	16
Figura 10 – Esquemático elétrico da placa <i>Wind Sensor</i>	17
Figura 11 – Esquemático do circuito do Bloco I da placa <i>Wind Sensor</i>	18
Figura 12 – Esquemático do circuito do Bloco II da placa <i>Wind Sensor</i>	20
Figura 13 – Aparência final da placa <i>Wind Sensor</i>	21
Figura 14 – Esquemático do circuito divisor de tensão para V_{raw}	22
Figura 15 – Esquemático elétrico do circuito regulador de tensão.....	23
Figura 16 – Placa reguladora de tensão implementado utilizando o integrado REG710-5.....	23
Figura 17 – Sensor de temperatura DS18B20.....	24
Figura 18 – a) Sensor DS18B20 conectado à placa <i>Namimote</i> ; b) Detalhe da junção dos sensores.....	25
Figura 19 – Anemômetro ICEL AN-3040.....	26
Figura 20 – Diagrama estrutural de um túnel de vento de circuito aberto..	27
Figura 21 – Tela inicial do programa <i>TunnelSim Open Return Version 1.0g®</i>	28
Figura 22 – Mensagem de erro decorrente do ângulo elevado do difusor..	28
Figura 23 – Tela das dimensões finais da câmara de teste.....	29

Figura 24 – Tela das dimensões finais do difusor.....	30
Figura 25 – Tela das dimensões finais do cone de contração.....	30
Figura 26 – Apresentação final do túnel de vento implementado.....	31
Figura 27 – Detalhe dos furos para os anemômetros na câmara de teste....	31
Figura 28 – Conexão do ventilador com a saída do difusor.....	32
Figura 29 – Tela de fios de aço colocada na entrada do túnel.....	32
Figura 30 – Calibração dos anemômetros no interior do túnel de vento.....	33
Figura 31 – Gráfico da tensão de saída do sensor n°4 pela velocidade do vento.....	42
Figura 32 – Gráfico da tensão de saída do sensor n°5 pela velocidade do vento.....	42
Figura 33 – Gráfico da tensão de saída do sensor n°33 pela velocidade do vento.....	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tabela com as características do anemômetro ICEL AN-3040.....	25
Tabela 2 – Dados obtidos da tensão de saída da placa n°4 em função da velocidade do vento incidente.....	36
Tabela 3 – Dados obtidos da tensão de saída da placa n°5 em função da velocidade do vento incidente.....	37
Tabela 4 – Dados obtidos da tensão de saída da placa n°33 em função da velocidade do vento incidente.....	38
Tabela 5 – Dados obtidos da temperatura medida pela placa n°4 ao longo do experimento.....	39
Tabela 6 – Dados obtidos da temperatura medida pela placa n°5 ao longo do experimento.....	40
Tabela 7 – Dados obtidos da temperatura medida pela placa n°33 ao longo do experimento.....	41
Tabela 8 – Comparação entre os valores de velocidade do vento medidos e calculados para a placa n°4.....	44
Tabela 9 – Comparação entre os valores de velocidade do vento medidos e calculados para a placa n°5.....	45
Tabela 10 – Comparação entre os valores de velocidade do vento medidos e calculados para a placa n°33.....	46

1 Introdução

A miniaturização da eletrônica permitiu o desenvolvimento de equipamentos de medição compactos, com baixo consumo de energia e baixo custo decorrente da produção em grande escala. Por isso, começa a se tornar economicamente viável utilizar estes equipamentos para a coleta de inúmeras variáveis de interesse para uma nova gama de processos e problemas existentes na indústria e no comércio.

Diversas áreas beneficiaram-se da miniaturização da eletrônica. Uma destas áreas é a agricultura. Técnicas estão sendo empregadas com o intuito de maximizar a produção de alimentos, incluindo-se a redução de desperdício que ocorre nas mais diversas etapas do processo agrícola, desde a colheita até a disponibilização para consumo. Este tipo de pesquisa e desenvolvimento se torna ainda mais importante em países como o Brasil, que dependem fortemente do setor agrícola.

As perdas de frutas, hortaliças e flores após a colheita são atribuídas a muitos fatores: ocorrência de podridões, senescência acelerada ou perda de qualidade visual ou gustativa. Quando colocados em câmaras térmicas para armazenamento ou transporte, estes produtos são submetidos a uma série de agentes danosos, como vibrações, impactos, fungos e bactérias. Todos estes fatores contribuem para um aumento de perdas ao longo do processo produtivo, sendo, portanto, a minimização destas perdas de suma importância.

Os produtos hortícolas são colocados em câmaras refrigeradoras para que o metabolismo celular dos produtos seja drasticamente reduzido, impedindo assim que amadureçam ou mesmo apodreçam durante o tempo de armazenamento e/ou transporte. Essa redução de metabolismo só é obtida se o ar refrigerado da câmara conseguir circular ao longo de toda a carga ou câmara, sendo a troca de calor com o ar refrigerado o único modo de baixar a temperatura dos produtos.

Caso o vento não esteja circulando de forma correta por todas as caixas de acondicionamento, ou mesmo em partes dela, os hortícolas mal refrigerados poderão chegar ao mercado impróprios ao consumo humano, sendo destinados ao descarte.

Com base nisso, fica claro que um bom entendimento da circulação do ar refrigerado nestas câmaras e caminhos é importante para garantir a qualidade final do produto, além de diminuir as perdas. Vale destacar também que as câmaras devem ser abertas o mínimo possível, de forma a manter a temperatura interna o mais constante

possível. O uso de redes de sensores sem fio para o monitoramento das variáveis temperatura e velocidade do ar dentro destas câmaras é extremamente produtivo, uma vez que diversos pontos podem ser monitorados pelos sensores e, os pontos onde as variáveis estão mal condicionadas podem ser localizados.

2 Fundamentação Teórica

Os anemômetros são equipamentos capazes de medir a velocidade de escoamento do ar. São normalmente utilizados em estações meteorológicas, em laboratórios de pesquisa na área da aerodinâmica e outras aplicações que necessitem de monitoramento e controle da velocidade do vento. Atualmente existem diferentes tipos de anemômetros, que utilizam abordagens diferentes para medir a velocidade do vento. Os mais importantes são o anemômetro do tipo copo, o anemômetro do tipo hélice, o anemômetro a fio quente e o anemômetro ultrassônico, que são descritos a seguir.

2.1 Tipos de Anemômetros

2.1.1 Anemômetro do tipo Copo (tipo Robinson)

Este tipo de anemômetro consiste em uma haste vertical que apresenta braços horizontais em seu topo, onde cada braço possui um copo em sua extremidade. Estes braços são dispostos de forma simétrica, formando ângulos retos com o eixo vertical. Este tipo de anemômetro apresenta geralmente de três a quatro copos. À medida que o vento atinge os copos do anemômetro, os braços giram em torno da haste central, gerando uma rotação proporcional à velocidade do vento incidente. Pela sua estrutura simétrica, não é possível averiguar a direção do vento incidente, e sim sua velocidade somente. Este anemômetro geralmente apresenta preço mais elevado devido aos acoplamentos mecânicos necessários para o seu funcionamento e é mais adequado para velocidades elevadas. A Figura 1 ilustra um anemômetro tipo copo.

Figura 1: Anemômetro do tipo Copo.



Fonte: (AMMONIT, 2017)

2.1.2 Anemômetro do tipo Hélice

O anemômetro do tipo hélice também opera de forma mecânica. Ele possui um conjunto de hélices que giram conforme a velocidade do vento. Este tipo de anemômetro precisa estar na direção de propagação do vento, sendo muito utilizado em equipamentos portáteis, de forma que operador posicione o anemômetro na direção correta. Caso seja fixo, necessita a instalação de catavento para correta posição conforme a direção do vento. A Figura 2 ilustra um anemômetro tipo hélice, um equipamento portátil.

Figura 2: Anemômetro tipo Hélice.



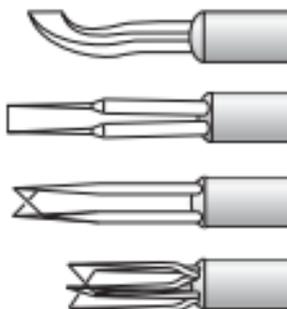
Fonte: (IMPAC, 2017)

2.1.3 Anemômetro a Fio Quente

Estes tipos de anemômetros utilizam como princípio de operação a perda de calor quando um condutor aquecido é exposto ao fluxo do fluido, de forma que a velocidade do vento pode ser medida através da correlação entre a potência elétrica no condutor e a perda de calor por convecção. Os sensores são finos e pequenos objetos metálicos inseridos diretamente no fluxo que se pretende medir. Este tipo de anemômetro pode medir tanto a intensidade quanto a direção do fluxo, sendo que para determinar a direção são necessários três sensores dispostos de forma específica. Tem como vantagem o baixo custo, normalmente é portátil (devido ao tamanho do sensor), é um método pouco intrusivo e também tem a capacidade de responder a velocidades de

escoamento bem mais baixas que os anemômetros mecânicos, sendo utilizado, inclusive, em sensores de respiração nos hospitais. A Figura 3 ilustra alguns tipos de sondas de anemômetros a fio quente disponíveis no mercado.

Figura 3: Sondas de anemômetro a Fio Quente.



Fonte: (TSI, 2017)

2.1.4 Anemômetros Ultrassônicos

Estes medidores utilizam ondas sonoras de alta frequência para medir a velocidade do fluido. É constituído de uma parte transmissora e outra receptora, podendo estar colocadas diretamente no fluxo desejado ou fora dele. Os sinais sonoros enviados até o receptor sofrerão interferência do fluxo a ser medido, de forma que o receptor determina a velocidade a partir destas interferências. Estes equipamentos apresentam uma resposta mais precisa que os outros anemômetros, podendo detectar variações mínimas de fluxo. A Figura 4 apresenta um anemômetro ultrassônico bidimensional, pois apresenta dois receptores e dois transmissores. Este tipo de anemômetro pode ser ainda unidimensional (um receptor e um transmissor) ou tridimensional (três receptores e três transmissores).

Figura 4: Anemômetro tipo Ultrassônico Bidimensional.



Fonte: (AMMONIT, 2017)

Neste trabalho, optou-se pelo uso de um anemômetro de fio quente pelas seguintes razões: dimensões reduzidas, baixo custo, boa resposta dinâmica, alta sensibilidade e independência da direção do vento, o que o torna adequado para o uso em câmaras de resfriamento e caminhões refrigerados.

2.2 Anemômetro a Fio Quente

A anemometria a fio quente depende do fato de que toda a resistência elétrica de um condutor metálico é dependente, em algum grau, da temperatura, mesmo que pouco. Por isso, uma parte essencial de um anemômetro a fio quente é um elemento metálico, usualmente com dimensões muito pequenas, aquecido pela passagem de corrente elétrica e inserido no fluxo a ser medido. A troca de calor do elemento aquecido para o fluxo aumenta com o aumento da velocidade do fluxo. O resfriamento do elemento aquecido decorrente da passagem do fluxo é então lido por uma ponte resistiva sensível, do qual o fio aquecido forma um dos braços desta ponte.

A escolha do elemento metálico tem grande relação com a dependência da resistência elétrica em relação à temperatura do material utilizado. Este elemento metálico deve ser muito pequeno, sendo usualmente utilizado fios muito finos e curtos, apresentando espessuras de alguns micrômetros e chegando a alguns milímetros de comprimento. Estes fios são normalmente compostos por Platina, Tungstênio e suas ligas, devido ao seu comportamento dinâmico com relação à temperatura.

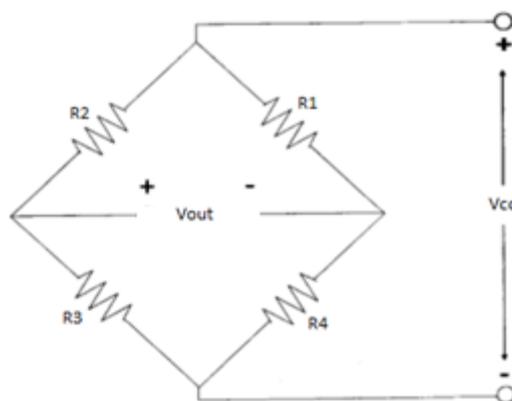
Estes elementos são também chamados de termorresistências, ou em inglês *Resistance Temperature Detector* (RTD), e apresentam resistência elétrica quase que linearmente dependente da temperatura.

Outra opção para confecção de anemômetros a fio quente são os termistores. Os termistores são componentes que apresentam uma resistência elétrica que depende exponencialmente da temperatura. Eles podem variar positivamente com a temperatura, sendo chamados de PTC, do inglês *Positive Temperature Coefficient*, ou negativamente com a temperatura, sendo chamados de NTC, do inglês *Negative Temperature Coefficient*. Os termistores são fabricados a partir de materiais semicondutores, podendo também apresentar dimensões muito pequenas, ou ainda menores que as dimensões dos RTD's.

As vantagens de se utilizar os termistores se devem ao fato de eles apresentarem baixo custo, elevada sensibilidade com relação à temperatura e pequena capacidade calorífica.

2.2.1 Anemômetro à Fio Quente Operando com Temperatura Constante

Os circuitos eletrônicos comumente empregados para a anemometria a fio quente são as pontes de Wheatstone e os amplificador realimentados. Uma ponte de Wheatstone é composta de uma associação de quatro resistores, conforme a Figura 5. O importante neste tipo de circuito é a tensão V_{OUT} gerada pela diferença entre as tensões dos resistores da ponte. Essa tensão pode ser vista como o “erro” nos valores de tensão dos resistores da ponte. Quando a tensão V_{OUT} é nula, a ponte é dita balanceada.

Figura 5: Esquema elétrico de uma ponte de *Wheatstone*.

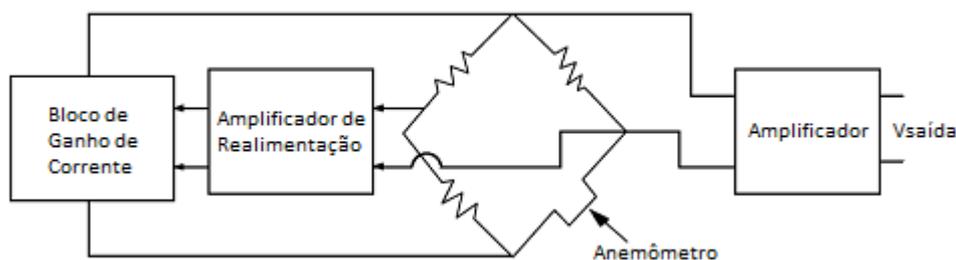
Fonte: Autoria própria.

Tipicamente, um dos resistores da ponte é substituído pelo sensor RTD ou NTC, de forma que a variação de tensão neste sensor altere o balanço da ponte e, conseqüentemente, sua saída.

Em um anemômetro operando à temperatura constante, a saída desta ponte é ligada a um amplificador realimentado. Este amplificador de realimentação deve ser capaz de “sentir” o desbalanço das tensões na ponte (devido ao fluxo de vento sobre o sensor) e gerar uma saída que alimente um bloco de ganho de corrente, que adiciona corrente ao circuito da ponte. Este aumento de corrente irá acarretar num aumento de temperatura do sensor proveniente do aumento da potência elétrica entregue ao mesmo, de forma a compensar a potência perdida decorrente da passagem de fluido sobre o sensor. Este procedimento pode ser realizado por uma série de amplificadores conectados em cascata.

O amplificador diferencial para este tipo de aplicação deve possuir alto CMR (*common-mode rejection*), ou seja, a diferença de tensão entre os pinos de entrada do amplificador será amplificada, enquanto que uma tensão comum aos dois terminais não será amplificada. Além disso, o amplificador escolhido deve possuir um elevado ganho em malha aberta. A Figura 6 apresenta um diagrama de blocos de um anemômetro operando à temperatura constante.

Figura 6: Diagrama de blocos de um anemômetro operando a temperatura constante.



Fonte: Autoria própria.

Para aplicações com ventos de alta velocidade, a corrente proveniente do amplificador diferencial é aumentada utilizando um amplificador de ganho unitário (*buffer*) atuando como um reforçador de corrente, de forma a assegurar uma corrente de aquecimento adequada para a manutenção da temperatura constante.

2.2.2 Equacionamento

Como explicado anteriormente, um anemômetro a fio quente relaciona a velocidade do vento incidente com a perda de calor no fio, gerada pelo aquecimento devido à passagem de corrente elétrica no condutor. É possível então obter o balanço de energia no anemômetro com a equação (1):

$$E_e = E_o + E_a \quad (1)$$

Onde E_e é a energia fornecida ao sistema, E_o é a energia perdida pelo sistema e E_a é a energia acumulada no sistema, em Joules. Derivando a equação (1) em relação à variável tempo, chega-se à relação de balanço de potência do sistema estudado, no caso, do sensor. A equação (2) define o balanço de potência do sistema.

$$P_e = P_o + P_a \quad (2)$$

Onde P_e é a potência fornecida ao sistema, P_o é a potência perdida pelo sistema e P_a é a potência acumulada no sistema, em Watts. A potência entregue ao sensor é devida tanto ao efeito Joule, causado pela passagem de corrente elétrica no mesmo, quanto pelo efeito térmico, proveniente da radiação incidente no sensor, conforme a equação (3).

$$P_e = R_s \cdot I_s^2 + \alpha \cdot S \cdot H \quad (3)$$

Onde R_s é a resistência elétrica do sensor, em Ohms, I_s é a corrente elétrica circulando através do sensor, em Ampères, H é a radiação incidente sobre o sensor, em Watts por metro quadrado, S é a área de superfície do sensor, em metros quadrados, e α é o coeficiente de transmissividade (quantidade de energia térmica que é realmente absorvida), que é adimensional.

A potência perdida pelo sensor é dada quase que inteiramente pela diferença de temperatura entre o sensor e o fluido em que está inserido, conforme a equação (4).

$$P_o = h \cdot S \cdot (T_s - T_f) \quad (4)$$

Onde h é o coeficiente de transferência de calor na superfície do sensor, em $^{\circ}\text{C}^{-1}\text{W}/\text{m}^2$, T_s é a temperatura do sensor, em Celsius, e T_f é a temperatura do fluido, também em Celsius. Podemos considerar também que a temperatura do fluido e a temperatura ambiente serão iguais, de forma que $T_a = T_f$.

A potência acumulada pelo sensor é devida ao aumento de temperatura do mesmo. Podemos associar a energia acumulada pelo sensor com seu aumento de temperatura pela equação (5):

$$E_a = m \cdot c \cdot \Delta T_s \quad (5)$$

Onde m é a massa do sensor, em kg, e c é o calor específico do sensor, em $^{\circ}\text{C}^{-1}\text{J}/\text{kg}$. Logo, a potência acumulada pelo sistema pode ser expressa pela equação (6):

$$P_a = \frac{dE_a}{dt} = m \cdot c \cdot \frac{dT_s}{dt} \quad (6)$$

Substituindo as equações (3), (4) e (5) na equação (2), chega-se à seguinte relação:

$$R_s \cdot I_s^2 + \alpha \cdot S \cdot H = h \cdot S \cdot (T_s - T_a) + m \cdot c \cdot \frac{dT_s}{dt} \quad (7)$$

Para medição da velocidade de fluido, a parcela proveniente da radiação térmica é usualmente muito pequena, devido ao tamanho muito pequeno dos sensores, podendo

ser desconsiderada. A equação simplificada que descreve o balanço de potência do sensor é dada por:

$$R_s \cdot I_s^2 = h \cdot S \cdot (T_s - T_a) + m \cdot c \cdot \frac{dT_s}{dt} \quad (8)$$

Para um anemômetro operando à temperatura constante, a parcela referente à variação de temperatura do sensor será nula quando o sistema atingir o equilíbrio estático. Assim, para o caso estudado, podemos simplificar a equação (8), obtendo a equação (9):

$$R_s \cdot I_s^2 = h \cdot S \cdot (T_s - T_a) \quad (9)$$

Podemos ainda reescrever a equação (9) de forma a representar a potência elétrica entregue ao sensor como função da diferença de potencial gerada sobre o mesmo, como mostra a equação (10).

$$\frac{V_s^2}{R_s} = h \cdot S \cdot (T_s - T_a) \quad (10)$$

Podendo ser reescrita como:

$$V_s^2 = R_s \cdot h \cdot S \cdot (T_s - T_a) \quad (11)$$

Por fim, pode-se assumir que o coeficiente de transferência de calor h , para baixas velocidades de fluido com densidade e viscosidade constantes, é dado pela equação (12):

$$h = a + b \cdot v^n \quad (12)$$

Onde a , b e n são constantes determinadas experimentalmente e v é a velocidade do fluido incidente no sensor.

Substituindo a equação (12) na equação (11) chega-se à equação (13).

$$V_s^2 = R_s \cdot (a + b \cdot v^n) \cdot S \cdot (T_s - T_a) \quad (13)$$

Pelo anemômetro estar operando à temperatura constante, a resistência elétrica do sensor R_s e sua respectiva temperatura T_s são constantes quando o sistema atinge o equilíbrio estático. É possível ver que a relação entre a tensão gerada no sensor e a velocidade do fluido incidente depende da temperatura ambiente em que o sistema se encontra. É por isso que este tipo de anemômetro deverá operar num ambiente com temperatura estável, devendo ser calibrado para cada temperatura na qual for submetido. Considerando então que a temperatura ambiente é constante, pode-se simplificar a equação (13), utilizando a equação (14), que é chamada de equação de calibração para um anemômetro operando à temperatura constante, ou também de equação de King (KING, 1914).

$$V_s^2 = A + B \cdot v^n \quad (14)$$

Onde A e B são constantes determinadas experimentalmente. A equação (14) é também chamada de lei de King modificada.

2.3 Trabalhos Relacionados

No trabalho realizado por (FERREIRA e PEPE, 2010) foi implementado um anemômetro operando a fio quente de baixo custo com a finalidade de medir a velocidade do vento em saídas de ar condicionado. O sensor utilizado neste trabalho foi um termistor tipo NTC com resistência nominal de 250Ω à 25°C . O circuito projetado foi calibrado com a utilização de um sensor de referência para diversas temperaturas de funcionamento de um ar condicionado. Os autores concluíram que a resposta do anemômetro possui alta influência da temperatura e por isso, sua resposta deve ser bem conhecida na faixa de temperatura em que o sensor irá atuar.

No trabalho realizado por (ARAUJO *et. Al.*, 2014) foi desenvolvido um anemômetro operando a fio quente com realimentação por tensão de forma a linearizar a resposta do circuito, utilizando um controlador capaz de ler a tensão sobre o sensor e a temperatura ambiente e comparar com valores de referência, modificando a corrente entregue ao circuito, de forma a manter a temperatura do sensor constante. Os autores concluíram que a topologia desenvolvida apresentou rápida resposta ao fluxo de fluido, mas não atua de forma efetiva no controle de temperatura do sensor. Foi observado por eles também uma grande influência da tensão de *offset* do amplificador utilizado na resposta do circuito.

No trabalho realizado por (LEAL, 2010) foi desenvolvido um anemômetro operando a fio quente com uma fonte de corrente capaz de compensar automaticamente a influência da temperatura do fluido na faixa dinâmica da tensão de saída. A autora concluiu que com o ajuste automático para temperatura utilizando uma corrente ajustável é possível minimizar drasticamente o efeito da variação de temperatura na faixa dinâmica da tensão de saída do anemômetro a fio quente.

No trabalho realizado por (GABRIEL, 2004) foi feita uma análise da sensibilidade em circuitos de anemômetros operando a temperatura constante utilizando termistores como sensores, de forma a encontrar diferenças entre utilizar termistores do tipo NTC e PTC. O autor concluiu que a máxima sensibilidade dos sensores tipo NTC se encontra a temperaturas não tão altas em relação a temperatura ambiente enquanto que os sensores do tipo PTC apresentam a sua sensibilidade máxima em temperatura muito acima da ambiente. Logo, a utilização de sensores do tipo NTC é mais vantajosa para temperaturas próximas da temperatura ambiente enquanto que a utilização de sensores do tipo PTC é mais vantajosa quando a temperatura da aplicação for bem mais elevada que a temperatura ambiente.

No trabalho realizado por (MONTEIRO, 2005) foi feita a modelagem teórica de um circuito de anemômetro a fio quente operando a temperatura constante. A modelagem foi submetida a uma série de testes computacionais, a fim de validar as teorias envolvidas no seu desenvolvimento. O autor concluiu que as simulações seguem de forma fidedigna as aproximações teóricas, apresentando desempenho satisfatório. Ele apresenta ainda uma abordagem modificada da teoria, levando em consideração algumas não idealidades inseridas pelo amplificador, conseguindo assim uma aproximação mais próxima dos valores simulados.

Este trabalho diferencia-se dos demais por associar uma rede de anemômetros a fio quente a uma rede de sensores sem fio, visando o baixo custo devido à possibilidade de emprego de uma grande quantidade de sensores, posicionados de forma distribuída.

3 Materiais Utilizados

Para a elaboração deste projeto foram utilizados diversos equipamentos e componentes. Os mesmos estão descritos a seguir.

3.1 Nó sensor *Namimote*

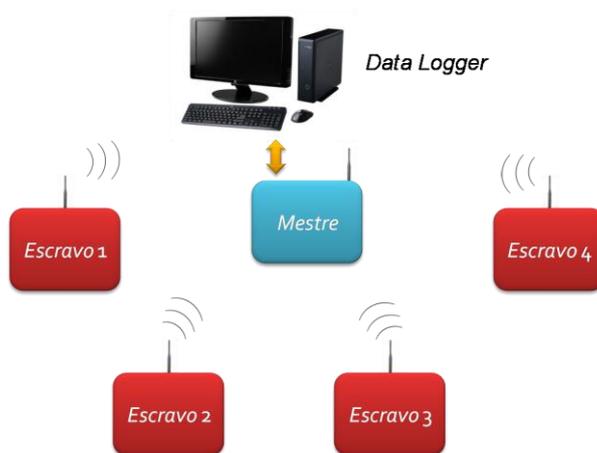
O *Namimote* é um nó sensor para redes de sensores sem fio (RSSF) desenvolvido no projeto Namitec (NAMITEC, 2017). Com ele é possível a aquisição de dados de inúmeras variáveis em diversas aplicações. O transceptor do *Namimote* opera na banda de 2,4 GHz. A aquisição de dados pode ser realizada através dos sensores do próprio *Namimote* ou através de outros sensores, que podem ser conectados nas diferentes portas de expansão, analógicas e digitais, do equipamento.

O *Namimote* possui internamente um sensor de temperatura, um sensor de luminosidade e um acelerômetro triaxial. Como para este trabalho os sensores internos do *Namimote* não foram utilizados, os mesmo não serão descritos neste documento.

A alimentação do *Namimote* é realizada através de uma bateria de Li-íon de 3,7 Volts, que pode ser recarregada através de uma porta USB. O *Namimote* possui ainda uma memória flash de 32Mbits, chaves e leds para interface com o usuário e um SoC MC13224 da *Freescale*, que contém um microcontrolador ARM7TDMI de núcleo de 32 bits e um transceptor de rádio de baixo consumo. Para aquisição de sinais externos, possui pinos de acesso à 6 canais de conversores Analógico-Digitais (AD) de 12bits. O *Namimote* consegue gerar em seus terminais de saída 3V para possível alimentação de sensores ou outros periféricos. Já para coleta de dados analógicos, o ADC do *Namimote* apresenta faixa de entrada de 0 até 2,56 V.

A comunicação entre os nós sensores é gerida via *firmware*, onde são definidos o nó de controle e os nós escravos. O nó de controle tem como função coletar os dados recebidos por todos os nós sensores e analisar ou armazenar os dados, dependendo da aplicação. Já os nós escravos são os responsáveis pela medição em si, tendo como função enviar os dados coletados para o nó coletor. A Figura 7 ilustra o diagrama de funcionamento de uma rede de sensores sem fio utilizando o *Namimote*.

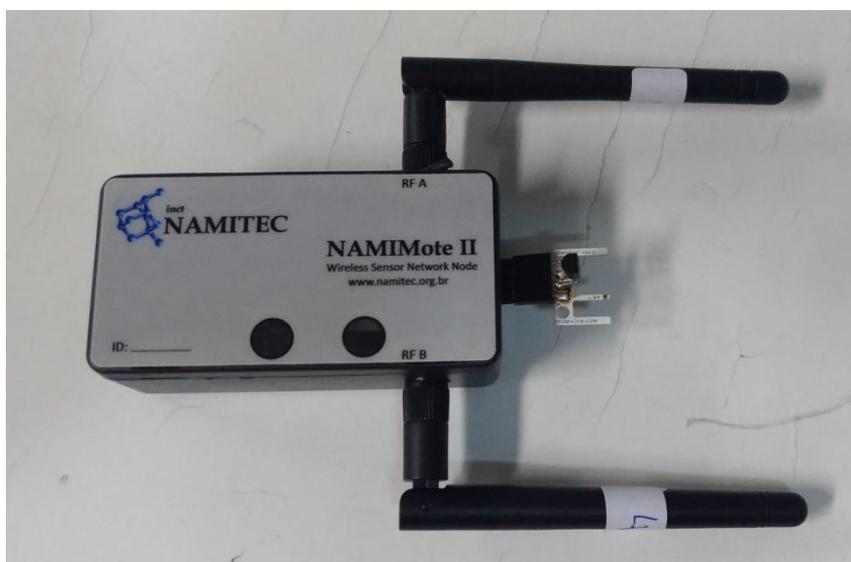
Figura 7: Diagrama de funcionamento da rede de sensores sem fio.



Fonte: Autoria própria.

O nó sensor devidamente montado é apresentado na Figura 8, onde é possível ver também as antenas e os sensores conectados à placa *Namimote*.

Figura 8: Imagem do nó sensor utilizado.



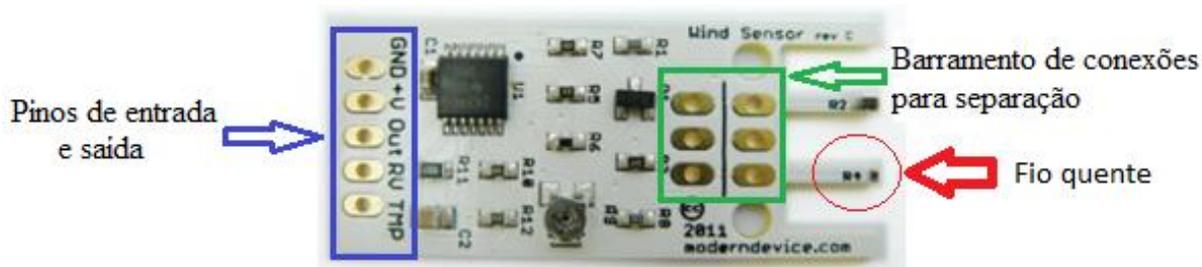
Fonte: Autoria própria.

3.2 Anemômetro *Wind Sensor*

Neste trabalho foram utilizadas 3 placas *Wind Sensor rev C*. da empresa *Modern Devices*. Esta placa deve ser alimentada com uma tensão contínua de 4V até 10V, operando com corrente nominal mínima de aproximadamente 20 mA. A Figura 9 apresenta uma imagem da placa utilizada. Esta placa foi escolhida pelo seu relativo baixo custo, onde cada unidade custa USD\$ 17,00, o que seria o equivalente a aproximadamente R\$ 55,00. Na Figura 9 pode-se reparar que a placa possui cinco conexões para entrada e saída, onde GND é a conexão do terra, a conexão +V é a entrada da alimentação CC, OUT é a conexão de saída do anemômetro à fio quente, RV (*raw voltage*) é a conexão de saída do sinal da ponte de Wheatstone e TMP é a conexão de saída do circuito de medição de temperatura da placa. As outras seis conexões restantes são para a conexão do anemômetro e do termistor para medição de temperatura. A função destas seis conexões é permitir a separação do sensor do resto do circuito de condicionamento, sendo possível realizar as medições de vento de forma menos intrusiva, separando-se os sensores da placa de condicionamento de sinais.

Para ligação da placa *Wind Sensor* de forma correta no *Namimote*, se faz necessário um conversor CC-CC para aumentar a tensão de alimentação disponível para o anemômetro, que precisa de uma tensão mínima de 4V. Foi implementado um conversor CC-CC tipo *step-up* de 5V para tal finalidade.

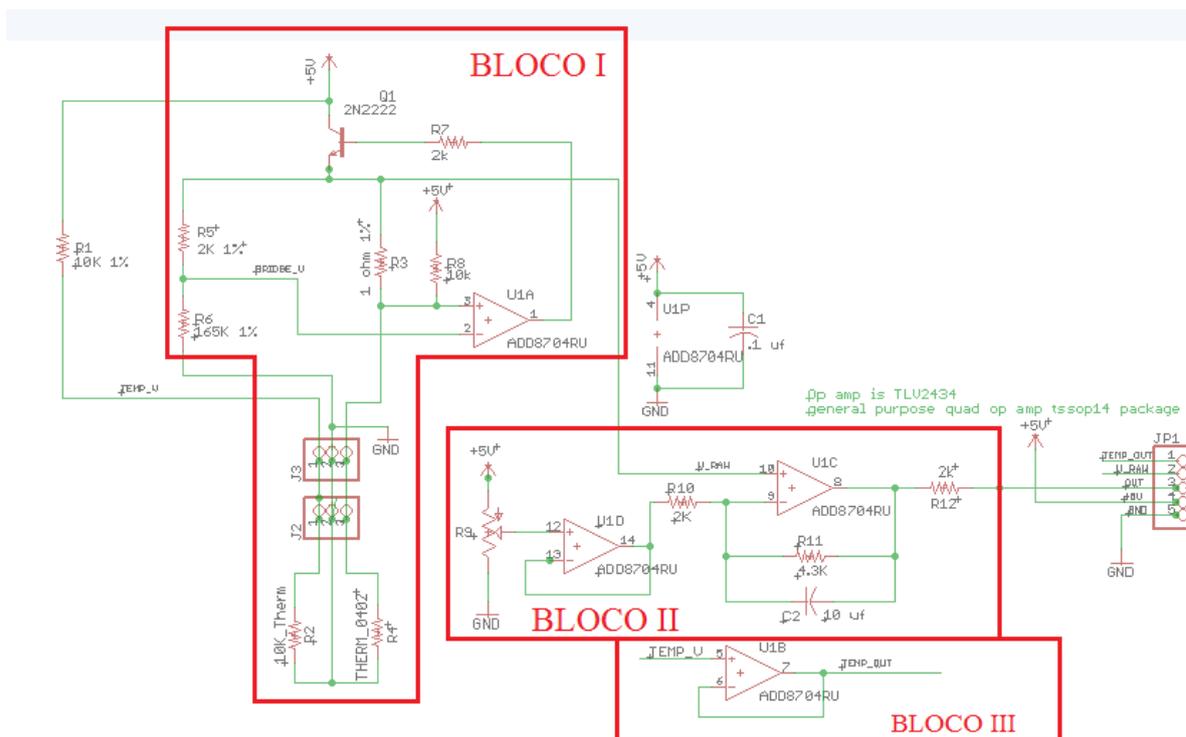
Figura 9: Placa de anemômetro a fio quente *Wind Sensor*.



Fonte: Adaptado de (MODERN DEVICES, 2017).

O elemento sensor desta placa é um termistor do tipo NTC, com resistência nominal de 470Ω a 25°C .

Na Figura 10 é apresentado o esquemático da placa, adaptado do manual do fabricante.

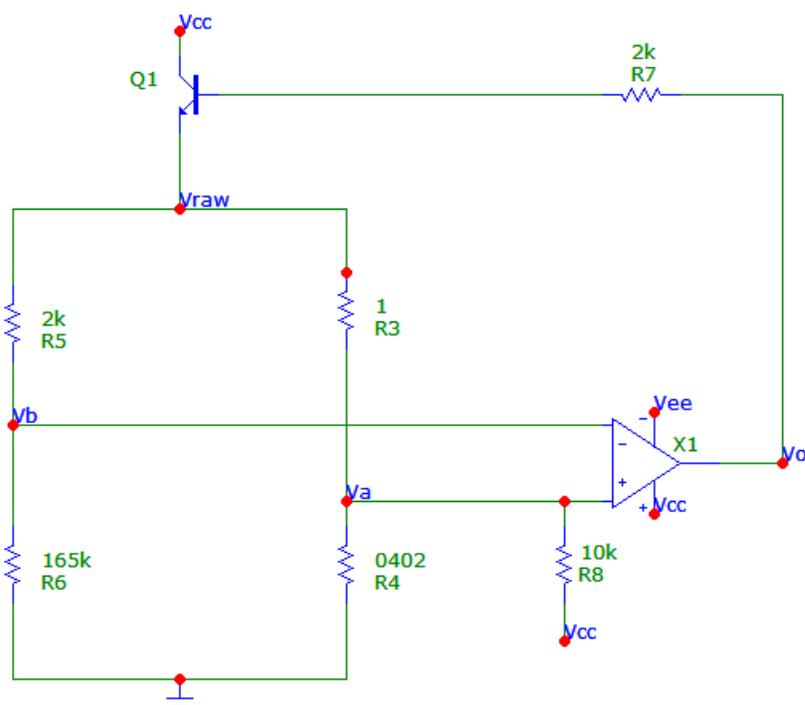
Figura 10: Esquemático elétrico da placa *Wind Sensor*.

Fonte: Adaptado de (MODERN DEVICES, 2017).

Pode-se verificar na Figura 10 que o circuito interno da placa pode ser dividido em três blocos, de forma a facilitar seu entendimento. A placa contém também um termistor para medição de temperatura, mas o mesmo não foi utilizado neste trabalho, pois o fabricante não apresenta curva de calibração para o mesmo.

No bloco I tem-se a ponte de Weathstone, com o amplificador extraído da diferença das tensões da ponte e alimentando um transistor de forma a garantir o ganho de corrente para o circuito. Já o bloco II tem como função zerar a saída do anemômetro manualmente, caso seja de interesse do usuário, com a utilização de um potenciômetro.

Primeiramente é feita a análise do bloco I e em seguida o bloco II. A Figura 11 apresenta o esquemático apenas do bloco I, de forma a facilitar o entendimento das etapas de equacionamento. Todos os esquemáticos presentes neste capítulo foram elaborados no *software MicroCAP 11*.

Figura 11: Esquemático do circuito do Bloco I da placa *Wind Sensor*.

Fonte: Autoria própria.

O objetivo desta análise é obter uma relação entre a tensão sobre o sensor, na figura, a variável V_a , e a tensão de saída da ponte V_{raw} .

A corrente que circula pelo resistor R6 é dada pela equação (15).

$$I_{R_6} = \frac{V_b}{R_6} \quad (15)$$

Que também é a corrente que atravessa o resistor R5. Assim, pode-se escrever a tensão V_{raw} como sendo a soma das quedas de tensões dos resistores R5 e R6, conforme a equação (16).

$$V_{raw} = V_b + R_5 \cdot \frac{V_b}{R_6} = V_b \cdot \left(1 + \frac{R_5}{R_6}\right) \quad (16)$$

Aplicando a propriedade de “curto-circuito” virtual nos terminais de entrada do amplificador operacional, estabelece-se a relação presente na equação (17).

$$V_b \cong V_a = V_s \quad (17)$$

Onde V_s é a tensão sobre o sensor. Aplicando (17) na equação (16) se obtém a equação (18), que relaciona a tensão V_{raw} diretamente com a tensão elétrica sobre o sensor.

$$V_{raw} = V_s \cdot \left(1 + \frac{R_5}{R_6}\right) \quad (18)$$

Esta é uma constante multiplicando a tensão gerada em cima do sensor. Faz-se então a relação da tensão de saída da ponte V_{raw} com a velocidade do vento incidente no sensor de acordo com a equação (19).

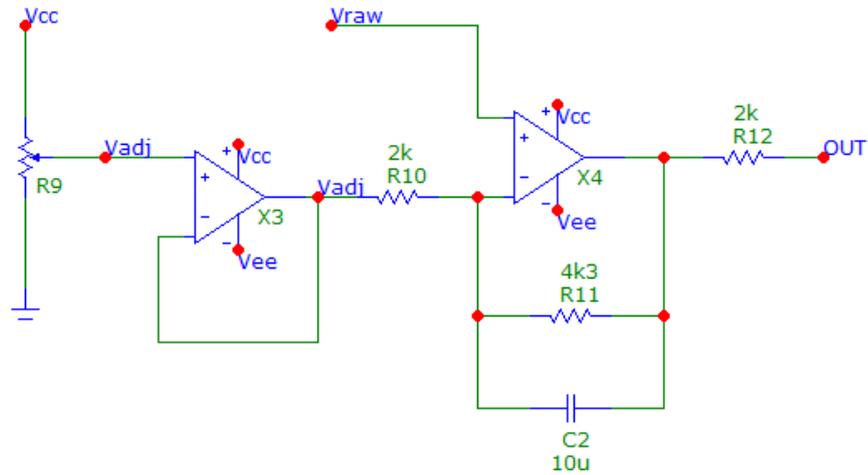
$$V_{raw}^2 = C + D \cdot v^n \quad (19)$$

Onde as constantes C , D e n são calculadas experimentalmente.

Note que a tensão V_{raw} nunca irá atingir o valor zero, mesmo quando a velocidade do vento for nula. Esta tensão apresenta valores próximos a 1,8V à temperatura ambiente, que é um valor muito próximo ao fundo de escala do conversor AD do *Namimote*. Este fato torna indesejado o uso direto desta tensão como saída da placa para a calibração e aplicação em campo. Não foi considerada na análise realizada a influência da tensão de *offset* do amplificador operacional utilizado na placa *Wind Sensor*. O amplificador em questão é um ADD8704, que possui tensão de *offset* máxima de 15mV.

Outra opção de saída da placa seria utilizar o bloco II, que consiste num ajuste de *offset* do sinal V_{raw} . O esquemático do bloco II é apresentado na Figura 12. A tensão proveniente do *trimpot*, chamada de V_{adj} , é utilizada para modificar a tensão de saída final do circuito.

Figura 12: Esquemático do circuito do Bloco II da placa *Wind Sensor*.



Fonte: Autoria própria.

Considerando o “curto-circuito” virtual nas entradas do amplificador X4, se obtém a relação presente na equação (20).

$$V_- \cong V_+ = V_{raw} \quad (20)$$

Logo, a corrente que circula pelo resistor R10 é dada pela equação (21).

$$I_{R_{10}} = \frac{(V_{raw} - V_{adj})}{R_{10}} \quad (21)$$

A tensão de saída é a tensão elétrica sobre o resistor R11 somada à própria tensão V_{raw} , resultando na equação (22).

$$OUT = V_{raw} + R_{11} \cdot \frac{(V_{raw} - V_{adj})}{R_{10}} \quad (22)$$

$$OUT = \left(1 + \frac{R_{11}}{R_{10}}\right) \cdot V_{raw} - \frac{R_{11}}{R_{10}} \cdot V_{adj} \quad (23)$$

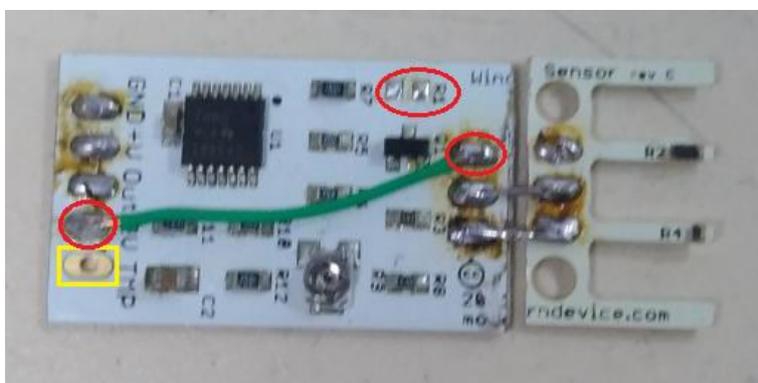
Pelo teorema de superposição linear, a tensão de saída do bloco II exposta na equação (23) também pode ser utilizada para calibrar o anemômetro. Este circuito tem por objetivo zerar a saída da ponte manualmente, de forma a permitir que a tensão de saída da placa excursione por toda a faixa de alimentação.

Como o ajuste deste bloco deve ser feito de forma manual para cada aplicação, se optou por não utilizar este bloco como saída da placa, pois este procedimento dificultaria a aplicação do projeto no objetivo proposto.

O bloco III nada mais é do que um seguidor de tensão para a tensão de saída do sensor de temperatura da placa, que não foi utilizado. A função deste amplificador é isolar eletricamente os resistores responsáveis pela medição da temperatura do terminal onde será medida a tensão, para evitar associações resistivas entre o circuito da placa e o circuito medidor.

Porém, o amplificador presente no bloco III teve suas conexões modificadas, de forma que foi conectado em sua entrada o terminal de V_{raw} . Isso foi realizado porque se verificou a necessidade de diminuir o valor da tensão V_{raw} , pois os valores que esta tensão apresenta, sem incidência de vento, são muito próximas do limite superior do conversor AD utilizado. O ajuste de forma constante é vantajoso também porque elimina a necessidade de ajustes manuais na troca de condições de operação. A mudança feita na placa pode ser visualizada na Figura 13.

Figura 13: Aparência final da placa *Wind Sensor*.

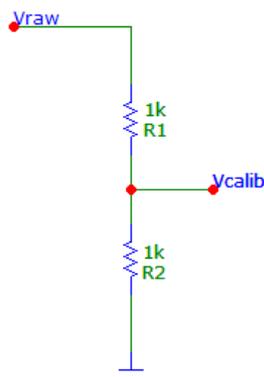


Fonte: Autoria própria.

As alterações realizadas são destacadas pelos círculos vermelhos e a saída da placa agora é pelo terminal *TMP*, destacado em amarelo.

Para diminuir a tensão V_{raw} , a saída do terminal *TMP* foi utilizada para alimentar um divisor resistivo de dois resistores de $1k\Omega$, conforme ilustrado na Figura 14.

Figura 14: Esquemático do circuito divisor de tensão para a tensão V_{raw} .



Fonte: Autoria própria.

Onde a tensão V_{calib} é a tensão utilizada para a calibração das placas *Wind Sensor*, cujo valor é dado pela equação (24).

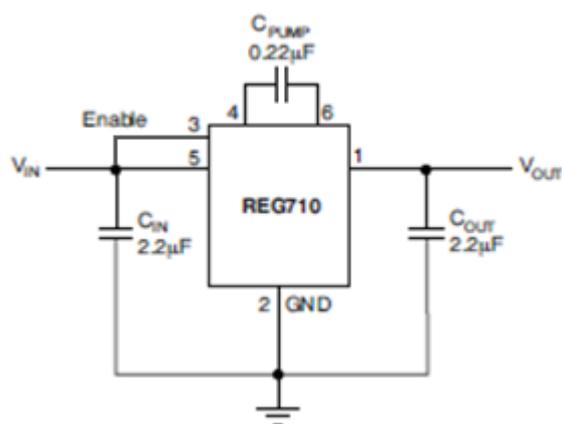
$$V_{calib} = \frac{1}{2} V_{raw} \quad (24)$$

Novamente, pelo princípio da linearidade, esta equação também pode ser utilizada para medição da velocidade do vento, visto que ocorre apenas a multiplicação da tensão V_{raw} por uma constante.

3.3 Placa Reguladora de Tensão

Como o *Namimote* opera com tensões de 3V nas suas portas de saída, foi necessária a implementação de um conversor CC-CC para elevar a tensão entregue à placa *Wind Sensor*, de forma que ela possa operar normalmente. Para isso foi escolhido o circuito integrado REG710-5, da *Texas Instruments*. Este regulador possui como característica, apresentar uma saída constante de 5V, desde que em sua entrada seja mantida uma tensão entre 2,7V e 5,5V. O circuito foi implementado conforme instruído na *datasheet* do fabricante, ilustrado pela Figura 15.

Figura 15: Esquemático elétrico do circuito regulador de tensão.

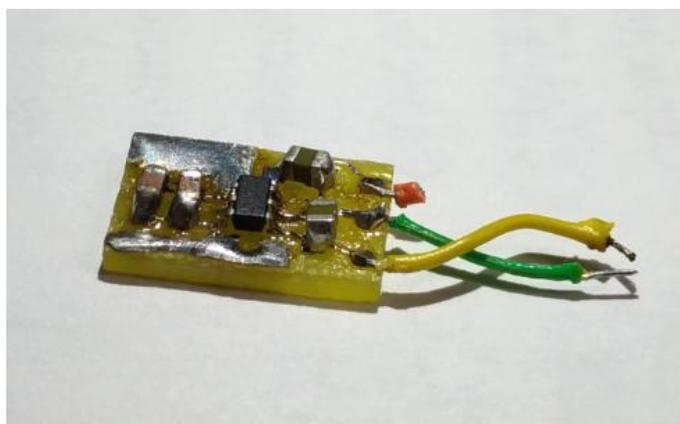


Fonte: Adaptado de (TEXAS INSTRUMENT, 2017).

O pino 3 deve possuir sempre valor alto para que o integrado sempre esteja em operação. Por isso este pino foi conectado diretamente com a tensão de entrada do mesmo, ou seja, no pino 5.

Com 5V é possível alimentar corretamente a placa *Wind Sensor*. A Figura 16 apresenta a implementação final da placa reguladora de tensão.

Figura 16: Placa reguladora de tensão implementado utilizando o integrado REG710-5.



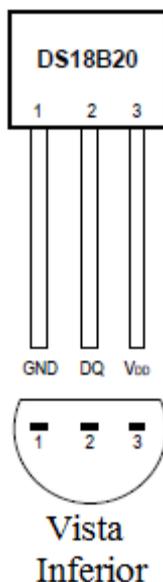
Fonte: Autoria própria.

3.4 Sensor de Temperatura DS18B20

O sensor de temperatura DS18B20 é um termômetro digital integrado fabricado pela empresa *Maxim Integrated*TM. Ele possui sistema de comunicação *onewire*, ou em português, “um fio” que recebe este nome por realizar a comunicação com o microcontrolador através de apenas uma via de dados serial bidirecional. Mede

temperaturas na faixa de -55°C a 125°C apresentando erro de medição de $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ na faixa de -10°C a 85°C . O diagrama dos pinos do sensor DS18B20 se encontra na Figura 17.

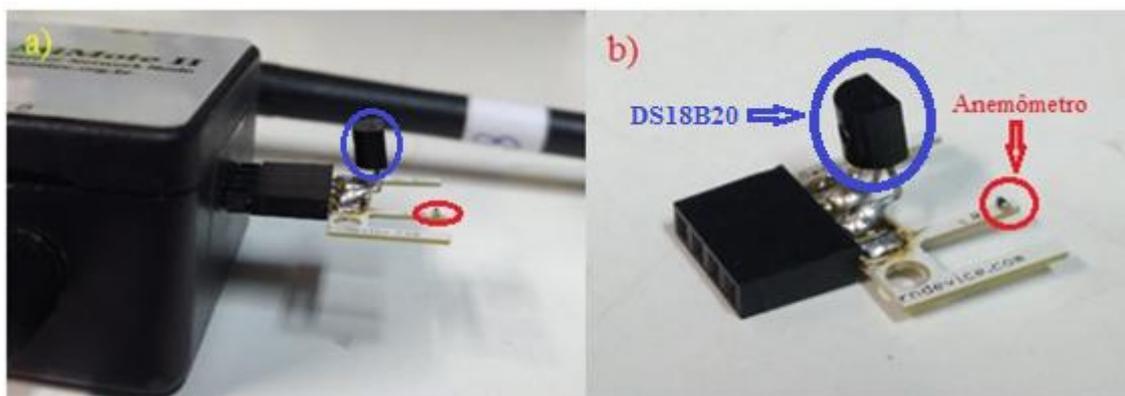
Figura 17: Sensor de temperatura DS18B20.



Fonte: Adaptado de (MAXIM INTEGRATED,2017).

Para utilização deste sensor é necessário que seja feita a correta programação dos comandos enviados ao sensor. A cada medição, deve ser enviado para o DS18B20 o comando para realização da leitura da temperatura, seguido do comando para leitura da temperatura no registrador do sensor, que irá enviar os dados ao *Namimote* em que está conectado. A linha de troca de dados entre o DS18B20 e o *Namimote* deve estar sempre em nível alto, sendo necessário o uso de um resistor de *pull-up*. O sensor de temperatura foi agregado ao anemômetro da placa *Wind Sensor*, que antes possuía um termistor para o circuito de medição de temperatura agregado à placa. A Figura 18 apresenta as disposições finais do sensor de temperatura junto com o anemômetro.

Figura 18: a) Sensor DS18B20 conectado à placa *Namimote*; b) Detalhe da junção dos sensores.



Fonte: Autoria própria.

3.5 Anemômetro tipo Hélice ICEL AN-3040

Para a calibração das placas *Wind Sensor* foi adquirido o anemômetro tipo hélice ICEL AN-3040. Este anemômetro é utilizado como referência para as medições realizadas com a placa *Wind Sensor*, visto que estas apresentam como saída valores de tensão elétrica. A Tabela 1 apresenta as características principais do equipamento e a Figura 19 ilustra o anemômetro.

Tabela 1: Tabela com as características do anemômetro ICEL AN-3040.

Measurement	Range	Resolution	Accuracy (% of reading)
m/s (meters per second)	0.40 - 30.00 m/s	0.01 m/s	$\pm (3\% + 0.20 \text{ m/sec})$
km/h (kilometers per hour)	1.4 - 108.0 km/h	0.1 km/h	$\pm (3\% + 0.8 \text{ km/hr})$
mph (miles per hour)	0.9 - 67.0 mph	0.1 mph	$\pm (3\% + 0.4 \text{ mph})$
knots (nautical miles per hour)	0.8 - 58.0 knots	0.1 knots	$\pm (3\% + 0.4 \text{ knots})$

Fonte: (ICEL MANAUS, 2017).

Figura 19: Anemômetro ICEL AN-3040.



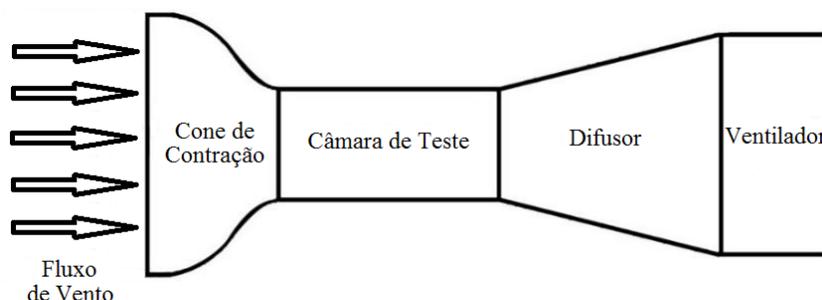
Fonte: (ICEL MANAUS, 2017).

Mesmo possuindo um erro de medição relativamente alto na faixa de medição pretendida e faixa de medição começando de 0,4m/s até 30m/s, o uso deste anemômetro foi decidido por questões financeiras, não sendo o ideal, pois há perda de informação considerável sobre o comportamento do sensor na faixa de 0 m/s até 0,4 m/s. Para se obter uma maior confiabilidade da calibração, seria necessário utilizar um equipamento com erro bem menor na faixa de medição pretendida e maior faixa de utilização. Contudo, equipamentos como o desejado apresentam valores bem mais elevado, não sendo possível utilizá-los neste projeto.

3.6 Túnel de Vento

O túnel de vento utilizado neste trabalho foi desenvolvido através de uma ferramenta computacional disponibilizada pela NASA, o *TunnelSim Open Return Version 1.0g*®. Este programa pode ser utilizado tanto online quanto offline, sendo necessária a plataforma *Java*® para ser executado. Com ele, é possível simular uma variedade de tamanhos de túneis de vento de circuito aberto. A Figura 20 ilustra as características de um túnel de vento de circuito aberto.

Figura 20: Diagrama estrutural de um túnel de vento de circuito aberto.



Fonte: Adaptado de (SHAHRIAR et. AL., 2016)

O túnel de vento se faz necessário, pois o mesmo tem como função uniformizar o fluxo de vento que percorre a câmara de teste o máximo possível. É na câmara de teste que os sensores a serem calibrados devem ser colocados.

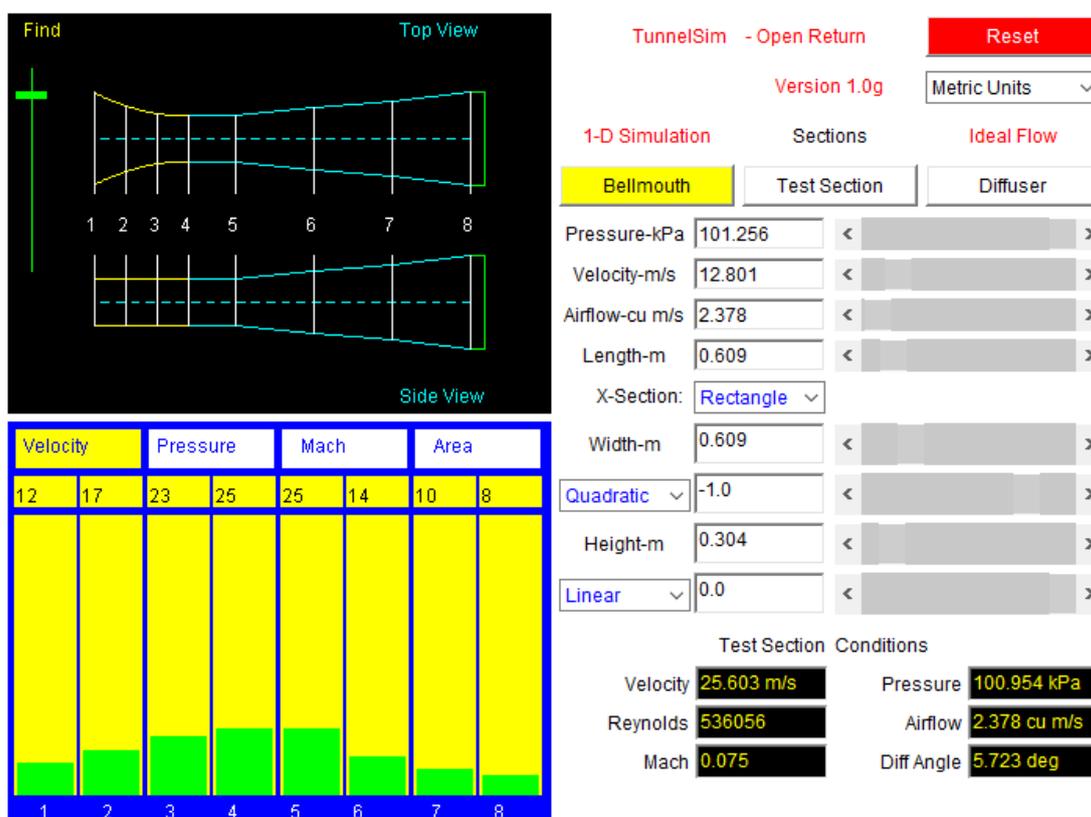
Há ainda túneis de vento de circuito fechado, que apresentam algumas vantagens como menor ruído e menor potência necessária para geração da velocidade do vento, mas estes túneis tendem a ser bem mais caros e complexos que os túneis de circuito aberto, sendo inviável para este projeto.

O programa apresenta uma série de variáveis que podem ser manipuladas, sendo que a cada manipulação de uma variável, o programa atualiza automaticamente as outras variáveis de forma a fazer valer a primeira alteração.

A Figura 21 apresenta a tela de operação do programa. Nesta tem-se, no canto superior esquerdo, as vistas superior e lateral do túnel de vento, no canto inferior esquerdo, um gráfico com a estimativa de velocidade do vento em diferentes pontos do túnel e, no lado direito, as variáveis de design do túnel. Estão presentes para modificação no programa as variáveis: pressão na área selecionada, velocidade de vento da seção, fluxo de ar na seção, altura da peça, comprimento da peça e largura da peça. Pode ser escolhida ainda a seção interna do túnel, nas opções quadrada, retangular ou circular. É possível transitar entre as partes do túnel através das abas indicativas, onde o difusor pode ser selecionado pressionando o botão “*Diffuser*”, a câmara de teste pode ser selecionada através do botão “*Test Section*” e o cone de contração através do botão “*Bellmouth*”. Abaixo destes dados se encontram as condições da câmara de teste (“*Test Section Conditions*”), informando os valores de velocidade, pressão, o número de Reynolds, que é um valor adimensional utilizado em mecânica dos fluidos para avaliar o tipo de escoamento na superfície, o número de Mach, que é a divisão da velocidade no

interior do túnel pela velocidade do som, o ângulo do difusor e o fluxo de ar, indiferentemente de qual parte do túnel está sendo alterada, de modo que é sempre possível ver as condições da câmara de teste durante o projeto. Vale atentar que o ângulo do difusor deve ser sempre menor que 7° , por motivos de estabilidade do fluxo no mesmo. Caso o ângulo do difusor seja maior, o programa emitirá sinal de erro tipo “*BL Separation*”, conforme indicado na Figura 22.

Figura 21: Tela inicial do programa *TunnelSim Open Return Version 1.0g*®.



Fonte: (NASA, 2017).

Figura 22: Mensagem de erro decorrente do ângulo elevado do difusor.

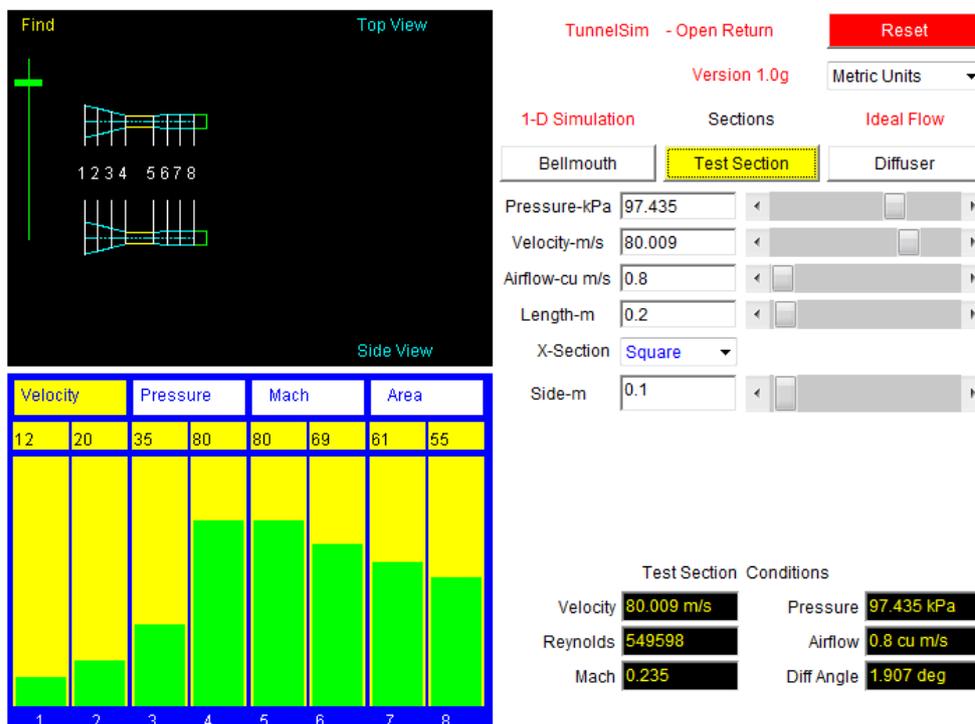
Mach **0.075** Diff Angle **13.053 deg**
Error: **BL Separation**

Fonte: (NASA, 2017).

O projeto do túnel implementado para a calibração dos anemômetros foi desenvolvido com o pressuposto de ser pequeno o suficiente para ser movido para dentro das câmaras térmicas, mas sem prejudicar a disposição dos elementos na câmara de teste, pois é nela que estão inseridos o anemômetro de referência e o anemômetro a

ser calibrado. As Figuras 23, 24 e 25 apresentam, respectivamente, as telas de resposta do programa *TunnelSim Open Return Version 1.0g*® para a câmara de teste, o difusor e o cone de contração.

Figura 23: Tela das dimensões finais da câmara de teste.



Fonte: (NASA, 2017).

Figura 24: Tela das dimensões finais do difusor.



Fonte: (NASA, 2017).

Figura 25: Tela das dimensões finais do cone de contração.



Fonte: (NASA, 2017).

O túnel de vento foi construído em acrílico com espessura de 4mm. A Figura 26 apresenta a montagem final do túnel utilizado.

Figura 26: Apresentação final do túnel de vento implementado.



Fonte: Autoria própria.

Na câmara de teste do túnel foram feitos dois orifícios por onde são inseridos o anemômetro de referência e o anemômetro a fio quente. O anemômetro de referência foi fixado na lateral externa do túnel, para simplificar o seu uso. A Figura 27 apresenta os orifícios de inserção dos sensores e a colocação do anemômetro de referência na lateral do túnel.

Figura 27: Detalhe dos furos para os anemômetros na câmara de teste.



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 27 foi ressaltado o detalhe do furo para inserção do anemômetro *Wind Sensor*.

Na saída do difusor foi fixado um ventilador 12V de dimensões 120x120x25mm, modelo 075-1212, da marca BLA, conforme ilustrado na figura 28. Este ventilador é o responsável por criar o fluxo de ar no interior do túnel.

Figura 28: Conexão do ventilador com a saída do difusor.



Fonte: Autoria própria.

Na entrada do cone de contração foi colocada uma tela de fios de aço, conforme ilustrado na Figura 29. Este procedimento é realizado a fim de minimizar a turbulência do fluxo de vento, de forma a tornar o fluxo de vento no interior do túnel mais constante. De acordo com (SCHEIMAN e BROOKS, 1981), seria mais vantajoso utilizar três telas em sequência ou duas telas combinadas com uma *honeycomb*. *Honeycombs* são peças que contém uma série de ductos paralelos por onde o fluxo de vento se divide, com o intuito de diminuir a turbulência do fluxo que entra em direção à câmara de teste.

Figura 29: Tela de fios de aço colocada na entrada do túnel.



Fonte: Autoria própria.

4 Metodologia Experimental

Para a realização da calibração dos anemômetros, cada uma das placas *Wind Sensor* foi submetida a diferentes velocidades de vento dentro da câmara de teste, tendo sua tensão de saída registrada pelo *Namimote* mestre, conectado ao computador.

Como a velocidade no interior da câmara de teste não é totalmente constante, ainda foi possível observar que a tensão do anemômetro variava de forma sutil, mesmo apresentando pouca variação no monitor do anemômetro de referência. Por isso, foram coletadas 20 medidas para cada velocidade a cada quinze segundos, onde a média dos valores de tensão elétrica obtidos foi utilizada como valor de tensão elétrica para cada velocidade do vento.

A velocidade do vento no interior do túnel pode ser variada ao variar a tensão de alimentação sobre o ventilador, na faixa de 3,5 V até 12,5 V. O ciclo de medições foi realizado apenas uma vez para cada placa *Wind Sensor*. A Figura 30 ilustra o procedimento realizado em laboratório.

Figura 30: Calibração dos anemômetros no interior do túnel de vento



Fonte: Autoria própria.

Foram realizadas medidas da tensão de saída das placas *Wind Sensor* num intervalo de quinze segundos, num total de vinte medições por velocidade de vento aplicada, numa duração total de cinco minutos por velocidade. Para cada medida de tensão realizada foram coletados também os valores da temperatura ambiente do termômetro digital DS18B20. Com os valores das medições de cada anemômetro, é possível estimar a curva de calibração através da equação (19), que relaciona a tensão de saída do anemômetro com a velocidade do vento incidente sobre o sensor. Para facilitar a obtenção dos parâmetros da curva de calibração são feitas as simplificações apresentadas nas equações (25) e (26).

$$X = v^n \quad (25)$$

$$Y = V_{raw}^2 \quad (26)$$

E assim, aplicando (25) e (26) na equação (19), chega-se à seguinte equação linear:

$$Y = C + D \cdot X \quad (27)$$

Esta equação pode ser resolvida através de uma simples regressão linear. Já o parâmetro n é um pouco mais difícil de ser obtido, sendo necessário calcular o valor que melhor se ajusta à relação exposta na equação (27).

Dos valores de temperatura medidos, foi obtida a média e o desvio padrão das amostras, de forma a quantificar a variação da temperatura no laboratório, tendo em vista que o mesmo não possui controle de temperatura interna.

Vale salientar que a relação presente na equação (27) só é válida quando a temperatura ambiente for correspondente à temperatura na qual o sistema foi calibrado, conforme explicado no item 2.2.2 da seção 2. Desta forma, o sensor deve ser calibrado para cada valor de temperatura no qual será submetido, preferencialmente no mesmo local onde serão realizados os testes, de forma a minimizar quaisquer fatores que alterem a sua precisão. Para cada calibração realizada neste projeto foi calculado também o maior erro de conformidade entre os pontos medidos e a curva de calibração, conforme a equação (28).

$$\varepsilon_{conf}^{\%} = \pm \frac{Dif_{max}}{FS_s} \cdot 100\% \quad (28)$$

Onde FS_s é o fundo de escala de saída do sensor e Dif_{max} é a diferença máxima entre um ponto medido em comparação com a curva de calibração obtida.

A aquisição de dados foi realizada via rede sem fio com as placas *Namimote* e os dados apresentados por uma interface computacional previamente implementada para o *Namimote*. Esta interface mostra os dados de até cinco nós sensores diferentes. Com ele é possível salvar os dados coletados pelos nós no formato .txt ou apresentar os dados coletados graficamente. Neste *software* é possível ainda monitorar o enlace de rádio entre os nós e a bateria de cada nó sensor, possibilitando maior controle da rede sem fio.

5 Resultados e Discussões

Para a realização dos testes foram utilizadas três placas *Wind Sensor* e três sensores DS18B20, onde cada par foi conectado a um nó sensor *Namimote*. Cada *Namimote* utilizado possui seu número identificador único. Foram utilizados os nós sensores de número 4, 5 e 33 e como controlador o nó número 12. As medidas apresentadas nas tabelas a seguir são as médias realizadas sobre os vinte pontos coletados ao longo dos períodos de cinco minutos. Todos os gráficos e tabelas apresentados nesta seção foram elaborados através do software *Microsoft Office Excel® 2016*.

As Tabelas 2, 3 e 4 apresentam os dados coletados durante a calibração para as placas 4, 5 e 33, respectivamente. As incertezas associadas às medições de velocidade foram calculadas conforme a Tabela 1, informada pelo fabricante do anemômetro ICEL AN-3040.

Tabela 2: Dados obtidos da tensão de saída da placa no. 4 em função da velocidade do vento incidente.

Tensão Saída (V)	Velocidade Medida (m/s)	Incerteza da Medição (m/s)
1,029	0	*
1,259	0,3	±0,209
1,277	0,46	±0,214
1,290	0,62	±0,219
1,303	0,81	±0,224
1,311	1,03	±0,231
1,318	1,35	±0,241
1,324	1,59	±0,248
1,330	1,81	±0,254
1,336	1,99	±0,260
1,341	2,25	±0,268
1,352	2,44	±0,273
1,358	2,55	±0,277
1,362	2,73	±0,282
1,366	2,82	±0,285
1,366	2,93	±0,288
1,375	3,03	±0,291
1,380	3,2	±0,296
1,380	3,34	±0,300
1,384	3,42	±0,303
1,386	3,49	±0,305

Tabela 3: Dados obtidos da tensão de saída da placa no. 5 em função da velocidade do vento incidente.

Tensão Saída (V)	Velocidade Medida (m/s)	Incerteza da Medição (m/s)
0,933	0	*
1,176	0,33	$\pm 0,210$
1,194	0,49	$\pm 0,215$
1,204	0,85	$\pm 0,226$
1,215	1,08	$\pm 0,232$
1,223	1,32	$\pm 0,240$
1,231	1,6	$\pm 0,248$
1,241	1,79	$\pm 0,254$
1,249	2,03	$\pm 0,261$
1,253	2,16	$\pm 0,265$
1,259	2,32	$\pm 0,270$
1,264	2,48	$\pm 0,274$
1,268	2,71	$\pm 0,281$
1,275	2,86	$\pm 0,286$
1,279	2,94	$\pm 0,288$
1,285	3,09	$\pm 0,293$
1,288	3,19	$\pm 0,296$
1,291	3,29	$\pm 0,299$
1,291	3,31	$\pm 0,299$
1,295	3,4	$\pm 0,302$
1,299	3,51	$\pm 0,305$

Tabela 4: Dados obtidos da tensão de saída da placa no. 33 em função da velocidade do vento incidente.

Tensão Saída (V)	Velocidade Medida (m/s)	Incerteza da Medição (m/s)
0,874	0	*
1,134	0,3	$\pm 0,209$
1,152	0,46	$\pm 0,214$
1,165	0,73	$\pm 0,222$
1,176	0,93	$\pm 0,228$
1,185	1,19	$\pm 0,236$
1,194	1,38	$\pm 0,241$
1,200	1,62	$\pm 0,249$
1,206	1,91	$\pm 0,257$
1,211	2,1	$\pm 0,263$
1,216	2,31	$\pm 0,269$
1,220	2,49	$\pm 0,275$
1,225	2,71	$\pm 0,281$
1,230	2,8	$\pm 0,284$
1,231	2,91	$\pm 0,287$
1,233	3,04	$\pm 0,291$
1,234	3,16	$\pm 0,295$
1,238	3,27	$\pm 0,298$
1,240	3,33	$\pm 0,300$
1,242	3,45	$\pm 0,304$
1,244	3,53	$\pm 0,306$

É possível perceber nas Tabelas 2, 3 e 4 que a faixa de saída dos sensores, em torno de 400 mV de variação ficou consideravelmente pequena em relação à faixa de entrada de 2,56V do ADC utilizado. Isso é indesejado pois diminui a faixa dinâmica útil de saída do sensor. Uma possível solução seria modificar o bloco de *offset* já existente na placa para que o mesmo seja constante, pois a saída deste bloco também amplifica a tensão de saída do anemômetro.

As Tabelas 5, 6 e 7 apresentam as respectivas temperaturas ambientes registradas pelos sensores DS18B20 das placas 4, 5 e 33, respectivamente. A incerteza das médias de temperatura são de $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$, conforme informado pelo fabricante.

Tabela 5: Dados obtidos da temperatura medida pela placa no. 4 ao longo do experimento.

Velocidade Medida (m/s)	Incerteza da Medição (m/s)	Temperatura Medida nº4 (°C)
0	*	21,8
0,3	±0,209	21,7
0,46	±0,214	21,9
0,62	±0,219	21,8
0,81	±0,224	21,6
1,03	±0,231	21,7
1,35	±0,241	21,9
1,59	±0,248	22,1
1,81	±0,254	22,3
1,99	±0,260	22,3
2,25	±0,268	22,3
2,44	±0,273	22,2
2,55	±0,277	22,2
2,73	±0,282	22,2
2,82	±0,285	22,2
2,93	±0,288	21,9
3,03	±0,291	21,7
3,2	±0,296	21,6
3,34	±0,300	21,9
3,42	±0,303	21,8
3,49	±0,305	22,0

Tabela 6: Dados obtidos da temperatura medida pela placa no. 5 ao longo do experimento.

Velocidade Medida (m/s)	Incerteza da Medição (m/s)	Temperatura Medida n°5 (°C)
0	*	20,7
0,33	$\pm 0,210$	20,7
0,49	$\pm 0,215$	20,8
0,85	$\pm 0,226$	20,8
1,08	$\pm 0,232$	21,0
1,32	$\pm 0,240$	21,1
1,6	$\pm 0,248$	21,1
1,79	$\pm 0,254$	21,2
2,03	$\pm 0,261$	21,2
2,16	$\pm 0,265$	21,2
2,32	$\pm 0,270$	21,2
2,48	$\pm 0,274$	21,2
2,71	$\pm 0,281$	21,3
2,86	$\pm 0,286$	21,2
2,94	$\pm 0,288$	21,2
3,09	$\pm 0,293$	20,5
3,19	$\pm 0,296$	20,4
3,29	$\pm 0,299$	20,3
3,31	$\pm 0,299$	20,3
3,4	$\pm 0,302$	20,3
3,51	$\pm 0,305$	20,3

Tabela 7: Dados obtidos da temperatura medida pela placa no. 33 ao longo do experimento.

Velocidade Medida (m/s)	Incerteza da Medição (m/s)	Temperatura Medida nº33 (°C)
0	*	25,0
0,3	±0,209	24,8
0,46	±0,214	24,7
0,73	±0,222	24,6
0,93	±0,228	24,6
1,19	±0,236	24,6
1,38	±0,241	24,6
1,62	±0,249	24,7
1,91	±0,257	24,8
2,1	±0,263	24,8
2,31	±0,269	24,8
2,49	±0,275	24,8
2,71	±0,281	24,8
2,8	±0,284	24,8
2,91	±0,287	24,9
3,04	±0,291	25,0
3,16	±0,295	25,2
3,27	±0,298	25,1
3,33	±0,300	25,2
3,45	±0,304	25,3
3,53	±0,306	25,3

A temperatura média registrada pela placa no. 4 é de 21,9 °C com desvio padrão de 0,23 °C. A temperatura média registrada pela placa no. 5 é de 20,9 °C com desvio padrão de 0,36 °C e a temperatura média registrada para a placa no. 33 é de 24,9 °C com desvio padrão de 0,22 °C. Vale salientar que os dados extraídos deste experimento só são válidos para aplicações que respeitem a temperatura ambiente no qual eles foram realizados. Caso haja mudança da temperatura no meio de aplicação, os sensores devem ser calibrados novamente.

Da análise dos dados coletados, foram estimadas as curvas de calibração para cada placa, indicadas nas equações (31), (32), e (33), que correspondem às placas 4, 5 e 33, respectivamente.

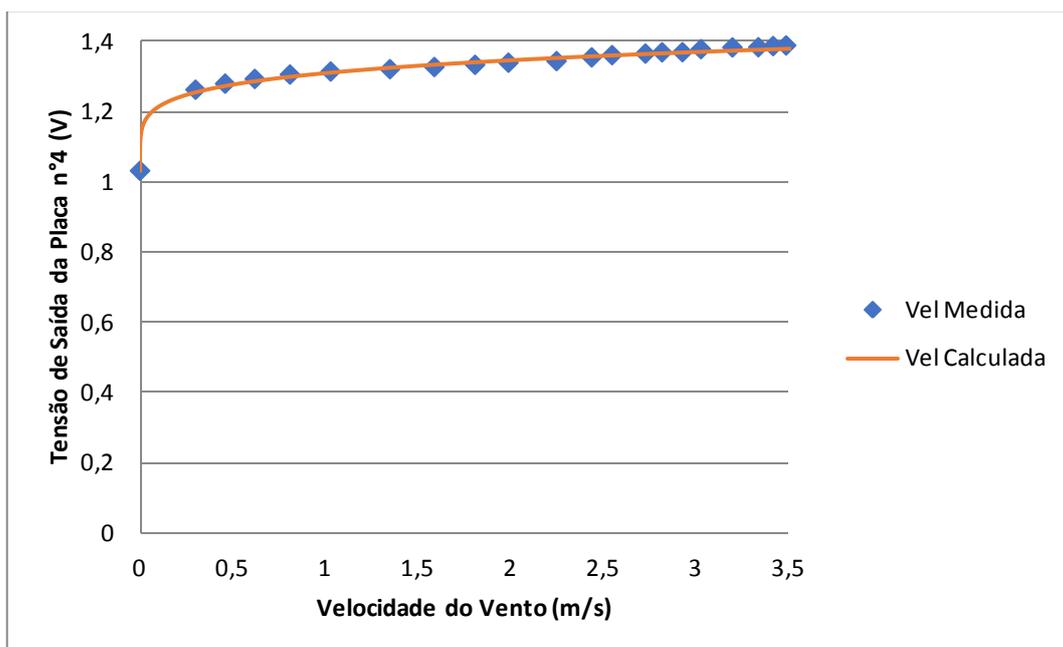
$$V_{med4}^2 = 1,057812 + 0,653036 \cdot v^{0,2008} \quad (31)$$

$$V_{med5}^2 = 0,870676 + 0,618900 \cdot v^{0,211} \quad (32)$$

$$V_{med33}^2 = 0,764575 + 0,626367 \cdot v^{0,1664} \quad (33)$$

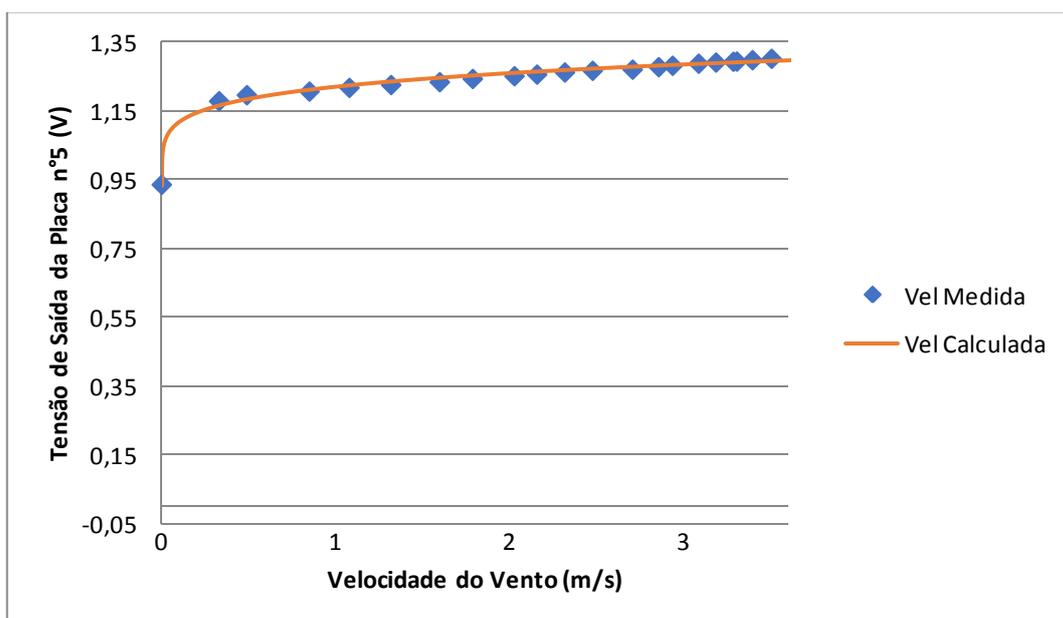
As Figuras 31, 32 e 33 apresentam os gráficos da tensão de saída do sensor pela velocidade do vento, onde foram plotados os pontos medidos juntamente com a equação de calibração aproximada para as placas 4, 5 e 33, respectivamente.

Figura 31: Gráfico da tensão de saída do sensor no. 4 pela velocidade do vento.



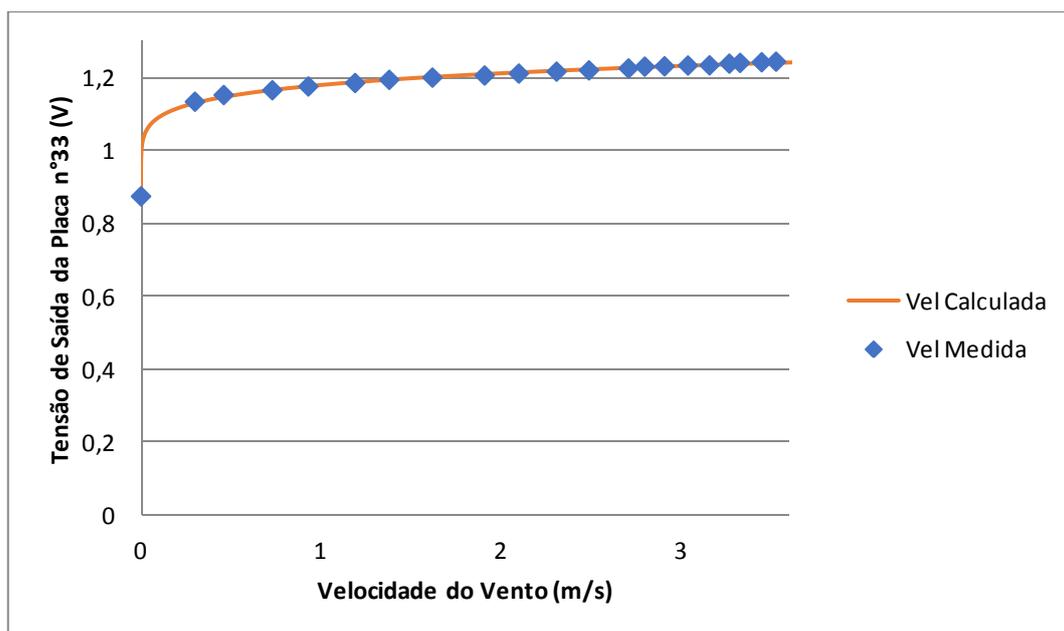
Fonte: Autoria própria.

Figura 32: Gráfico da tensão de saída do sensor no. 5 pela velocidade do vento.



Fonte: Autoria própria.

Figura 33: Gráfico da tensão de saída do sensor no. 33 pela velocidade do vento.



Fonte: Autoria própria.

As tabelas 8, 9 e 10 apresentam uma comparação entre os valores medidos e calculados a partir das equações de calibração das placas 4, 5 e 33, respectivamente. Nas mesmas tabelas é calculado também o erro de conformidade, de acordo com a equação (28), de cada medida, deixando destacado o maior erro de conformidade encontrado para cada calibração.

Tabela 8: Comparação entre os valores de velocidade do vento medidos e calculados para a placa no.4.

Velocidade Medida (m/s)	Velocidade Calculada no. 4 (m/s)	Erro de Conformidade (%)
0	0	*
0,3	0,35	1,38
0,46	0,52	1,67
0,62	0,69	2,09
0,81	0,90	2,50
1,03	1,07	1,05
1,35	1,22	3,84
1,59	1,37	6,40
1,81	1,54	7,79
1,99	1,72	7,79
2,25	1,86	11,04
2,44	2,25	5,35
2,55	2,52	0,86
2,73	2,71	0,44
2,82	2,89	1,94
2,93	2,91	0,65
3,03	3,36	9,37
3,2	3,63	12,43
3,34	3,67	9,35
3,42	3,86	12,72
3,49	3,98	14,15

Tabela 9: Comparação entre os valores de velocidade do vento medidos e calculados para a placa no.5.

Velocidade Medida (m/s)	Velocidade Calculada no. 5 (m/s)	Erro de Conformidade (%)
0	0	*
0,33	0,41	2,22
0,49	0,59	2,86
0,85	0,73	3,49
1,08	0,90	5,20
1,32	1,05	7,78
1,6	1,22	10,79
1,79	1,44	9,89
2,03	1,65	10,72
2,16	1,80	10,36
2,32	1,99	9,43
2,48	2,16	9,19
2,71	2,28	12,28
2,86	2,56	8,54
2,94	2,74	5,83
3,09	3,00	2,46
3,19	3,17	0,67
3,29	3,28	0,40
3,31	3,31	0,11
3,4	3,51	3,27
3,51	3,73	6,39

Tabela 10: Comparação entre os valores de velocidade do vento medidos e calculados para a placa no. 33.

Velocidade Medida (m/s)	Velocidade Calculada no. 33 (m/s)	Erro de Conformidade (%)
0	0	*
0,3	0,33	0,85
0,46	0,53	1,85
0,73	0,72	0,24
0,93	0,92	0,35
1,19	1,14	1,54
1,38	1,38	0,14
1,62	1,57	1,42
1,91	1,77	3,87
2,1	1,98	3,31
2,31	2,21	2,79
2,49	2,37	3,32
2,71	2,64	2,06
2,8	2,91	3,11
2,91	2,96	1,48
3,04	3,10	1,59
3,16	3,12	1,04
3,27	3,42	4,23
3,33	3,56	6,45
3,45	3,68	6,50
3,53	3,79	7,47

O maior erro de conformidade encontrado foi de 14,15% para a placa no. 4, enquanto que a placa que apresentou menor erro de conformidade foi a placa no. 33, cujo erro de conformidade máximo foi de 7,47%. Esta discrepância com relação à placa no. 5 pode ser explicada pelo fato de os testes terem sido realizados em um laboratório sem controle sobre uma gama de variáveis que podem influenciar seu funcionamento, como a temperatura, a umidade e vibrações. Estes valores de erro são esperados, levando em conta que a calibração foi realizada num ambiente onde a temperatura não é um fator controlável. De modo geral, as respostas apresentadas pelos anemômetros seguem o repertório da literatura sobre o assunto.

6 Conclusões e Trabalhos Futuros

Com a elaboração de um método funcional para calibração e medição no interior de câmaras térmicas desenvolvido e validado, se faz necessária a calibração dos anemômetros nas temperaturas de interesse da aplicação para a qual este trabalho foi desenvolvido. A seguir são apresentadas algumas sugestões de trabalhos que podem ser abordados no futuro:

- Calibração dos anemômetros no interior das câmaras térmicas;
- Modificação da tensão de saída da placa de forma a aumentar a faixa dinâmica de saída do sistema;
- Desenvolvimento de uma plataforma capaz de compensar a variação da saída do sensor em função da temperatura, na faixa de temperatura de interesse;
- Implementação de um anemômetro de baixo consumo, para maior durabilidade da bateria do sistema sem fio, podendo ser incluído ainda um método de compensação da temperatura via *hardware*;
- Adição de blocos condicionadores de sinal, como, por exemplo, um filtro passa-baixa para minimizar os efeitos da resposta em frequência do anemômetro.

Conclui-se que a resposta dos anemômetros testados ficou de acordo com a literatura, apresentando erros de conformidade abaixo de 15%, tendo em vista que o objetivo é desenvolver uma rede de sensores sem fio de baixo custo capaz de realizar medições através de vários nós sensores. A placa que apresentou o maior erro de conformidade foi a placa de no. 4. Atribui-se que estes erros são oriundos de vários fatores, como, por exemplo, o fato de a calibração ter sido realizada num laboratório cuja temperatura não é controlável. No restante, a rede sem fio funcionou de forma correta, recebendo as mensagens dos nós sensores nos intervalos de tempo corretos e armazenando os dados coletados para posterior análise ou consulta.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] LEAL, S. V.; “Anemômetro Baseado em Sensor Termo-Resistivo Operando a Temperatura Constante com Ajuste Automático de Faixa Dinâmica”, 2010, 69 f, Dissertação de Mestrado em Engenharia de Eletricidade – UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO, São Luís, 2010.
- [2] GABRIEL, M. V.; “Análise de Sensibilidade de Anemômetros a Temperatura Constante Baseados em Sensores Termo-Resistivos”, 2004, 121 f, Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica – UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO, São Luís, 2003.
- [3] MONTEIRO, L. H.; “Estudo e Modelagem de um Anemômetro a Fio Quente Operando em Temperatura Constante”, 2015, 85 p, Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Elétrica – UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, Rio de Janeiro, 2015.
- [4] EGUTI, C. C. A.; “Desenvolvimento de um Circuito Eletrônico Experimental de Anemômetro de Fio Quente”, 2005, 182 p, Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica – UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA, Ilha Solteira, 2005.
- [5] ARAUJO, L. V.; CATUNDA, S. Y. C.; DÓREA, C. E. T.; FREIRE, R. C. S.; “A Controlled-temperature Hot-wire Anemometer with Voltage Feedback Linearization”, In: Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC) Proceedings, 2014 IEEE International

- [6] SAMPAIO, C. A. de P.; PASSOS, E. F.; DIAS, G. P.; CORREA, P. C., “Desenvolvimento e Avaliação de um Anemômetro de Fio Quente Operando à Temperatura Constante”, *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.2, n.2, p.229-234, 1998, Campina Grande, PB, DEAg/UFPB.
- [7] LOMAS, C. G.; “Fundamentals of Hot Wire Anemometry”. New York: Cambridge University Press, 2011.
- [8] BARLOW, J. B.; RAE, W. H. Jr.; POPE, A.; “Low-speed Wind Tunnel Testing”, 3^a Ed, New York: John Wiley & Sons, INC., 1999.
- [9] SMOL’YAKOV, A. V.; TKACHENKO, V. M.; “The Measurements of Turbulent Fluctuations: An Introduction to Hot-Wire Anemometry and Related Transducers”,
- [10] MODERN DEVICE; “Wind Sensor Rev. C”. Disponível em: < <https://moderndevice.com/product/wind-sensor/>>. Acesso em: 12 de Abril de 2017.
- [11] TEXAS INSTRUMENTS; “REG710-5”. Disponível em: <<http://www.ti.com/product/REG710-5>>. Acessado em: 20 de Maio de 2017.
- [12] MAXIM INTEGRATED; “DS18B20”. Disponível em: <<https://www.maximintegrated.com/en/products/analog/sensors-and-sensor-interface/DS18B20.html>>. Acessado em: 10 de Junho de 2017.
- [13] BOYES, W.; “Instrumentation Reference Book”, 3^a Ed, Boston: Butterworth Heinemann, 2003.

- [14] SHAHRIAR, A.; HOSSAIN, S.; HASAN, Md. K.; RAHMAN, K. A.; “Design and Construction of a Low Reynolds Number Subsonic Wind Tunnel”, European Journal of Advances in Engineering and Technology, v.3, n.11, p.15-21, 2016.
- [15] NASA; “TunnelSim Open Return Version 1.0g”. Disponível em:
<<https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/tunopen.html>>.
Acessado em: 15 de Abril de 2017.
- [16] ICEL MANAUS; “AN-3040”. Disponível em:
<http://www.ice1-manaus.com.br/produto_descricao.php?id=717>.
Acessado em: 2 de Maio de 2017.
- [17] AMMONIT; “Anemometer Thies”. Disponível em:
<http://www.ammonit.com/images/stories/download-pdfs/DataSheets/Anemometers/Anemometer_ThiesFirstClassAdvanced_S11100-H.pdf>. Acesso em: 20 de Junho de 2017.
- [18] AMMONIT; “Ultrasonic Anemometer”. Disponível em:
<http://www.ammonit.com/images/stories/download-pdfs/DataSheets/UltrasonicAnemometers/Ultrasonic_Thies2D_S82100H-S82200H-S82300H.pdf>. Acesso em: 20 de Junho de 2017.
- [19] TSI; “Thermal Anemometry Probes”. Disponível em:
<http://www.tsi.com/uploadedFiles/_Site_Root/Products/Literature/Catalogs/Hotwire_Catalog_2980465.pdf>. Acesso em: 20 de Junho de 2017.
- [20] IMPAC; “Anemômetro Digital IP720”. Disponível em:
<<http://www.impac.com.br/anemometro/digitalimpac/anemometrodigitalhelice.htm>>. Acesso em: 20 de Junho de 2017.

- [21] NAMITEC; “Namitec”. Disponível em:
< <http://www.namitec.org.br/>>. Acesso em: 01 de Agosto de 2017.
- [22] KING, L. V.; “On the Convection of Heat From Small Cylinders in a Stream of Fluid: Determination of the Convection Constants of Small Platinum Wires with Applications to Hot-Wire Anemometry”, *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, Vol. 214, pp. 273-432, 1914.